



# Carrières de roches massives

## Potentialités écologiques

*Analyse bibliographique et réflexions*

**Ce travail a été initié et financé par**  
**Les COMITÉS RÉGIONAUX DE LA CHARTE BRETAGNE, BASSE-NORMANDIE ET PAYS DE LA LOIRE**  
**et le COMITÉ NATIONAL DE LA CHARTE**  
**IL EST RÉALISÉ SOUS L'ÉGIDE DE L'UNPG**

3, rue Alfred Roll – 75849 PARIS CEDEX 17 – Tél : 01 44 04 47 01 – Fax 01 40 54 03 28

**Il a été suivi par un Comité de Pilotage constitué des personnes suivantes**

| <b>Comité scientifique</b>    |                                                                             |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Robert BARBAULT               | Muséum National d'Histoire Naturelle                                        |
| Frédéric BIORET               | Université de Bretagne Occidentale - BREST                                  |
| Bruno de FOUCAULT             | Conseil Scientifique Pour l'Environnement                                   |
| Bernard FROCHOT               | Université de Bourgogne                                                     |
| Didier LECOEUR                | Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes                            |
| Jean-Yves MONNAT              | Université de Bretagne occidentale                                          |
| <b>Scientifiques associés</b> |                                                                             |
| James ARONSON                 | CEFE/CNRS - Restoration ecology group                                       |
| Serge MULLER                  | Université de Metz                                                          |
| <b>Comité de pilotage</b>     |                                                                             |
| Yves ADAM                     | UNPG                                                                        |
| Gabriel BECKER                | Président de la commission Roches Eruptives – UNPG - Screg Est              |
| Eric CARENCO                  | Granulats Rhône-Alpes - Groupe VICAT                                        |
| Cristiana CIARALDI            | Syndicat Français de l'Industrie Cimentière                                 |
| Julien DECAUX                 | Cemex, Service Environnement et Foncier                                     |
| Louis DESCOMBES               | LAFARGE CEMENTS - Syndicat Français de l'Industrie Cimentière               |
| Jean-Marc DUBOIS              | SNCG/ Eurovia Bretagne                                                      |
| Stéphane DURAND-GUYOMARD      | Lafarge granulats Bretagne                                                  |
| Véronique ESVAN               | Morillon Corvol                                                             |
| Michel GIVELET                | Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes |
| Marc LANSIART                 | BRGM/Service Environnement                                                  |
| Patrick LECOMTE               | GSM OPL                                                                     |
| Louis de MAUPEOU              | UNICEM Pays de la Loire                                                     |
| Thierry MEILLAND-REY          | Groupe VICAT                                                                |
| Louis NATTER                  | UNPG                                                                        |
| Gilles POULAIN                | Président de la commission Roches Calcaires – UNPG - Carrière du Boulonnais |
| Olivier VERDIER               | Encem Paris                                                                 |

L'organisation, le suivi et la coordination de l'étude ont été pilotés par François Maubert (Lafarge Granulats), puis par Eric Carencio (groupe VICAT) et Patrick Lecomte (GSM-Ouest), et réalisés par le bureau d'études ENCEM

Didier VOELTZEL, supervision, coordination  
 Gilles PAILLAT, rédaction de l'étude sur les roches éruptives  
 Nathalie & Frédéric ANDRIEU, rédaction de l'étude sur les roches calcaires  
 Matthias ROHAUT, synthèse des deux études

**La citation de ce document dans les références bibliographiques doit se faire comme suit :**

© ENCEM, 2007. Carrières de roche massives - Potentialités écologiques. Analyse bibliographique et réflexions. ENCEM & CNC - UNPG.



# Potentialités écologiques des carrières de roches massives

## > Analyse bibliographique et réflexions

### SOMMAIRE

|                    |                                                                              |            |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| TABLE DES MATIÈRES |                                                                              | 4          |
| LISTE DES FIGURES  |                                                                              | 8          |
| LISTE DES TABLEAUX |                                                                              | 9          |
| AVANT-PROPOS       |                                                                              | 10         |
| <b>I</b>           | <b>PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                               | <b>12</b>  |
| 1.                 | Contexte de l'étude                                                          | 12         |
| 2.                 | Objectifs de l'étude                                                         | 13         |
| 3.                 | Plan de l'étude                                                              | 13         |
| <b>II</b>          | <b>PRÉSENTATION DES CARRIÈRES DE ROCHES MASSIVES</b>                         | <b>16</b>  |
| 1.                 | Les carrières en France                                                      | 16         |
| 2.                 | Les modes d'exploitation d'une carrière                                      | 18         |
| 3.                 | Les différentes natures de roches                                            | 22         |
| 4.                 | Le cadre réglementaire national et incitatif européen                        | 23         |
| <b>III</b>         | <b>L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                             | <b>29</b>  |
|                    | <b>PARTIE 1 : L'ÉCOLOGIE DES CARRIÈRES</b>                                   | <b>29</b>  |
| 1.1                | La biodiversité                                                              | 29         |
| 1.2                | Notions d'écologie fondamentale adaptées aux carrières                       | 32         |
| 1.3                | Trajectoire écologique d'une carrière                                        | 32         |
|                    | <b>PARTIE 2 : LA FLORE ET LA FAUNE DES CARRIÈRES</b>                         | <b>67</b>  |
| 2.1                | Les habitats des carrières                                                   | 67         |
| 2.2                | La flore des carrières                                                       | 71         |
| 2.3                | La faune des carrières                                                       | 79         |
|                    | <b>PARTIE 3 : LES FACTEURS DE LA DIVERSITÉ ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES</b>      | <b>93</b>  |
| 3.1                | Origine du potentiel écologique des carrières                                | 93         |
| 3.2                | Les facteurs de variabilité des carrières                                    | 95         |
| 3.3                | Spécificités des carrières de roches massives                                | 97         |
| 3.4                | Éléments d'évaluation de la valeur écologique d'un site                      | 97         |
|                    | <b>PARTIE 4 : LE RÉAMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES</b>                  | <b>129</b> |
| 4.1                | La réaffectation écologique des carrières en France                          | 129        |
| 4.2.               | Concepts de réaffectation écologique                                         | 130        |
| 4.3.               | Définition des objectifs de réaménagement                                    | 132        |
| 4.4.               | L'intégration d'un projet de réaménagement écologique dans son environnement | 135        |
| 4.5                | Les principes d'interventions                                                | 140        |
| 4.6.               | Exemple de la Chalandrue                                                     | 146        |
| 4.7                | L'évaluation des coûts                                                       | 148        |
| <b>IV</b>          | <b>CONCLUSION</b>                                                            | <b>150</b> |
|                    | <b>ANNEXES</b>                                                               | <b>152</b> |
|                    | <b>ANNEXE I - LA DÉMARCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                | <b>152</b> |
| 5.1                | Sources explorées et obtentions des données                                  | 152        |
| 5.2                | Présentation des documents                                                   | 156        |
| 5.3                | Analyse critique de la bibliographie                                         | 158        |
|                    | <b>ANNEXE II - LISTE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                     | <b>159</b> |
|                    | <b>ANNEXE III - GLOSSAIRE</b>                                                | <b>172</b> |

# TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                  |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>LISTE DES FIGURES</b>                                                                         | <b>7</b>      |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b>                                                                        | <b>9</b>      |
| <b>AVANT-PROPOS</b>                                                                              | <b>10</b>     |
| <br><b>I PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                             | <br><b>12</b> |
| 1. Contexte de l'étude                                                                           | 12            |
| 2. Objectifs de l'étude                                                                          | 13            |
| 3. Plan de l'étude                                                                               | 13            |
| <br><b>II PRÉSENTATION DES CARRIÈRES DE ROCHES MASSIVES</b>                                      | <br><b>16</b> |
| 1. Les carrières en France                                                                       | 16            |
| 2. Les modes d'exploitation d'une carrière                                                       | 18            |
| 3. Les différentes natures de roches                                                             | 22            |
| 3.1 Roches calcaires                                                                             | 22            |
| 3.2 Roches éruptives dures                                                                       | 22            |
| 4. Le cadre réglementaire national et incitatif européen                                         | 23            |
| 4.1. La réglementation relative aux carrières et à leur remise en état                           | 23            |
| 4.2. Anticiper la législation européenne : les industriels français partenaires de son évolution | 24            |
| <br><b>III - L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                                       | <br><b>29</b> |
| <br><b>PARTIE 1 : L'ÉCOLOGIE DES CARRIÈRES</b>                                                   | <br><b>29</b> |
| 1.1 La biodiversité                                                                              | 29            |
| 1.1.1 Le concept de biodiversité et ses implications                                             | 29            |
| 1.1.2 L'évolution de la diversité biologique                                                     | 31            |
| 1.2 Notions d'écologie fondamentale adaptées aux carrières                                       | 32            |
| 1.3 Trajectoire écologique d'une carrière                                                        | 32            |
| 1.3.1 Le concept de trajectoire écologique                                                       | 33            |
| 1.3.2 Une colonisation rapide                                                                    | 37            |
| 1.3.3 Les facteurs de colonisation                                                               | 37            |
| 1.3.3.1 Les facteurs régissant les successions écologiques observées                             | 37            |
| 1.3.3.2 Les modalités de dissémination                                                           | 37            |
| 1.3.3.3 Le contexte environnemental de la carrière                                               | 40            |
| 1.3.3.4 Les propriétés du substrat                                                               | 41            |
| 1.3.4 Les successions sur roches calcaires                                                       | 41            |
| 1.3.4.1 Succession sur matériaux peu compacts (sables calcaires et craies)                       | 41            |
| 1.3.4.2 Succession sur calcaire compact                                                          | 45            |
| 1.3.4.3 Succession sur éboulis et verses                                                         | 46            |
| 1.3.4.4 Succession sur merlons et matériaux terreux                                              | 47            |
| 1.3.5 Les successions sur roches éruptives                                                       | 47            |
| 1.3.5.1 Les rochers et fronts de taille                                                          | 47            |
| 1.3.5.2 Les éboulis                                                                              | 49            |
| 1.3.5.3 Les carreaux                                                                             | 50            |
| 1.3.6 La dynamique spatiale de la succession végétale                                            | 51            |
| 1.3.7 Les successions animales en carrières de roches calcaires et éruptives                     | 52            |
| 1.3.7.1 Succession des invertébrés                                                               | 52            |
| 1.3.7.2 Succession des batraciens et reptiles                                                    | 54            |
| 1.3.7.3 Succession des oiseaux                                                                   | 54            |
| 1.3.8 Les vitesses d'évolution                                                                   | 55            |
| 1.3.8.1 Les vitesses d'évolution des successions végétales                                       | 56            |
| 1.3.8.2 Les vitesses d'évolution des successions animales                                        | 58            |



|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.3.9 Autres dynamiques écologiques                                     | 61         |
| 1.3.10 Les limitations                                                  | 64         |
| 1.3.11 Le rôle des perturbations                                        | 64         |
| <b>PARTIE 2 : LA FLORE ET LA FAUNE DES CARRIÈRES</b>                    | <b>67</b>  |
| 2.1 Les habitats des carrières                                          | 67         |
| 2.1.1 Les formations végétales                                          | 67         |
| 2.1.1.1 Les formations végétales calcaires                              | 68         |
| 2.1.1.2 Les formations végétales éruptives                              | 70         |
| 2.2 La flore des carrières                                              | 71         |
| 2.2.1 Les végétaux non vasculaires et les organismes fongiques          | 71         |
| 2.2.1.1 Calcaire                                                        | 72         |
| 2.2.1.2 Éruptif                                                         | 72         |
| 2.2.2 Les végétaux vasculaires                                          | 72         |
| 2.2.2.1 Calcaire                                                        | 72         |
| 2.2.2.2 Éruptif                                                         | 77         |
| 2.3 La faune des carrières                                              | 79         |
| 2.3.1 Les invertébrés                                                   | 79         |
| 2.3.2 Les vertébrés                                                     | 81         |
| 2.3.2.1 Les batraciens                                                  | 81         |
| 2.3.2.2 Les reptiles                                                    | 83         |
| 2.3.2.3 Les oiseaux                                                     | 84         |
| 2.3.2.4 Les mammifères                                                  | 88         |
| 2.3.2.4.1 Les chauves-souris                                            | 88         |
| 2.3.2.4.2 Les autres mammifères                                         | 89         |
| 2.3.6 Analyse générale                                                  | 89         |
| <b>PARTIE 3 : LES FACTEURS DE LA DIVERSITÉ ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES</b> | <b>93</b>  |
| 3.1 Origine du potentiel écologique des carrières                       | 93         |
| 3.2 Les facteurs de variabilité des carrières                           | 95         |
| 3.2.1 Climat                                                            | 96         |
| 3.2.2 Nature de la roche mère des sites d'extraction                    | 97         |
| 3.2.3 Environnement de la carrière                                      | 97         |
| 3.2.4 Eau                                                               | 99         |
| 3.2.5 Granulométrie et nature du substrat                               | 100        |
| 3.2.5.1 Morphologie des substrats                                       | 101        |
| 3.2.5.2 Facteurs pédologiques                                           | 105        |
| 3.2.6 Age de la carrière                                                | 109        |
| 3.2.7 Configuration et orientation des carrières                        | 111        |
| 3.2.8 Superficie de la carrière                                         | 114        |
| 3.2.9 Modalités d'exploitation                                          | 115        |
| 3.2.10 Perturbations et pressions anthropiques                          | 117        |
| 3.2.11 Synthèse                                                         | 118        |
| 3.3 Spécificités des carrières de roches massives                       | 119        |
| 3.4 Éléments d'évaluation de la valeur écologique d'un site             | 120        |
| 3.4.1 Approche multi-critères                                           | 120        |
| 3.4.2 Approche multicritères simplifiée                                 | 120        |
| 3.4.3 Approche par les bio-indicateurs                                  | 125        |
| <b>PARTIE 4 : LE RÉAMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES</b>             | <b>129</b> |
| 4.1 La réaffectation écologique des carrières en France                 | 129        |
| 4.2. Concepts de réaffectation écologique                               | 130        |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3. Définition des objectifs de réaménagement                                    | 132        |
| 4.3.1 Principes                                                                   | 132        |
| 4.3.2 Nécessité d'un diagnostic                                                   | 132        |
| 4.3.3 Quels objectifs ?                                                           | 133        |
| 4.4. L'intégration d'un projet de réaménagement écologique dans son environnement | 135        |
| 4.4.1 La place des différents acteurs                                             | 135        |
| 4.4.2 Composer avec les dynamiques naturelles                                     | 135        |
| 4.4.3 La nécessité d'un suivi scientifique                                        | 136        |
| 4.4.4 Organisation administrative, économique et foncière                         | 136        |
| 4.4.5 La gestion du site                                                          | 137        |
| 4.4.6 Un modèle pour la réaffectation écologique des carrières                    | 139        |
| 4.5 Les principes d'interventions                                                 | 140        |
| 4.5.1 Le traitement des fronts de taille                                          | 140        |
| 4.5.2 Le traitement des carreaux                                                  | 141        |
| 4.5.3 Le traitement des talus et merlons                                          | 145        |
| 4.5.4 Le traitement des puits                                                     | 146        |
| 4.5.5 L'accès au site                                                             | 146        |
| 4.6. Exemple de la Chalandrue                                                     | 146        |
| 4.7 L'évaluation des coûts                                                        | 148        |
| <b>IV - CONCLUSION</b>                                                            | <b>150</b> |
| <b>ANNEXE I - LA DÉMARCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                     | <b>152</b> |
| 5.1 Sources explorées et obtentions des données                                   | 152        |
| 5.1.1 Étude « Carrière de roches éruptives »                                      | 152        |
| 5.1.2 Étude des potentialités écologiques des carrières de roches calcaires       | 153        |
| 5.2 Présentation des documents                                                    | 156        |
| 5.3 Analyse critique de la bibliographie                                          | 158        |
| <b>ANNEXE II - LISTE BIBLIOGRAPHIQUE</b>                                          | <b>159</b> |
| <b>ANNEXE III - GLOSSAIRE</b>                                                     | <b>172</b> |

## LISTE DES FIGURES

|                  |                                                                                                                                                                                   |          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Figure 1</b>  | Les quatre zones biogéographiques françaises et les principaux affleurements du substrat calcaire                                                                                 | 13       |
| <b>Figure 2</b>  | Productions dominantes de granulats                                                                                                                                               | 18       |
| <b>Figure 3</b>  | Les quatre modes d'exploitation des roches massives                                                                                                                               | 19       |
| <b>Figure 4</b>  | Schéma d'une carrière en exploitation                                                                                                                                             | 21       |
| <b>Figure 5</b>  | Illustration des mécanismes se déroulant lors de la mise en place des successions*                                                                                                | 34       |
| <b>Figure 6</b>  | Modèle d'une succession végétale simplifiée.                                                                                                                                      | 35       |
| <b>Figure 7</b>  | Dynamique écologique d'une carrière calcaire en cours de « renaturation »                                                                                                         | 36       |
| <b>Figure 8</b>  | Exemple d'insecte pionnier                                                                                                                                                        | 39       |
| <b>Figure 9</b>  | Exemple d'anémochorie, les fruits du Bouleau pubescent ( <i>Betula pubescens</i> )                                                                                                | 39       |
| <b>Figure 10</b> | Quelques exemples de colonisation en carrière calcaire                                                                                                                            | 42       |
| <b>Figure 11</b> | Stades pionniers sur sables calcaires                                                                                                                                             | 43       |
| <b>Figure 12</b> | Formation d'un sol (Donadieu & Rumelhart, 1983)                                                                                                                                   | 44       |
| <b>Figure 13</b> | Succession végétale observée en fond de carrière de craie du nord de la France                                                                                                    | 44       |
| <b>Figure 14</b> | Schémas des successions des anciennes carrières de roches massives de Bourgogne                                                                                                   | 45       |
| <b>Figure 15</b> | Succession végétale observée sur roche calcaire massive de Bourgogne                                                                                                              | 46       |
| <b>Figure 16</b> | Illustration de l'influence de la fracturation du substrat                                                                                                                        | 46       |
| <b>Figure 17</b> | Évolutions progressives des différents groupements* végétaux des carrières de roches massives de la Basse-Normandie armoricaine                                                   | 48<br>48 |
| <b>Figure 18</b> | Dynamique de la végétation sur éboulis littoral                                                                                                                                   | 49       |
| <b>Figure 19</b> | Dynamique de la végétation sur substrat* aride (carreaux* secs à sol peu compacté et filtrant)                                                                                    | 50       |
| <b>Figure 20</b> | Modèles de dynamique spatiale de la reconquête végétale des carrières de roches massives                                                                                          | 51       |
| <b>Figure 21</b> | Modèle de la diversité insectes / végétation                                                                                                                                      | 53       |
| <b>Figure 22</b> | Évolution théorique de l'avifaune d'une carrière de roches massives de l'est de la France                                                                                         | 55       |
| <b>Figure 23</b> | Rythme de colonisation d'une carrière abandonnée                                                                                                                                  | 56       |
| <b>Figure 24</b> | Vitesse relative de végétalisation totale (strates herbacée*, arbustive et arborescente) de quatre carrières acides de Basse-Normandie en fonction de leur âge après exploitation | 56       |
| <b>Figure 25</b> | Évolution de la fermeture totale (à gauche) et de la strate ligneuse* seule (à droite), de deux carrières acides de Basse-Normandie                                               | 57       |
| <b>Figure 26</b> | Formation des sols sur les carreaux* de carrières de granites du Limousin                                                                                                         | 57       |
| <b>Figure 27</b> | L'Oedipode turquoise ( <i>Oedipoda caerulea</i> )                                                                                                                                 | 59       |
| <b>Figure 28</b> | Étude diachronique* et synchronique* de l'évolution des peuplements de criquets de sept anciens sites miniers revégétalisés du Limousin                                           | 60       |
| <b>Figure 29</b> | Exemple de succession « raccourcie »                                                                                                                                              | 61       |
| <b>Figure 30</b> | Interprétation du référentiel floristique dans un modèle statistique de la dynamique successionnelle de la végétation                                                             | 63       |
| <b>Figure 31</b> | Évolution et régression, un équilibre fragile du milieu                                                                                                                           | 65       |
| <b>Figure 32</b> | Colonisation naturelle de la carrière de Faucouzy (02)                                                                                                                            | 68       |
| <b>Figure 33</b> | Exemple d'une pelouse sèche à Brome érigé en carrière                                                                                                                             | 70       |
| <b>Figure 34</b> | Évolutions possibles de la végétation sur carreaux*                                                                                                                               | 71       |
| <b>Figure 35</b> | Sisymbre couché ( <i>Sisymbrium supinum</i> )                                                                                                                                     | 74       |
| <b>Figure 36</b> | Quelques orchidées relevées en carrières calcaires                                                                                                                                | 76       |
| <b>Figure 37</b> | L'Hélianthème à gouttes, <i>Tuberaria guttata</i>                                                                                                                                 | 77       |
| <b>Figure 38</b> | Distribution de <i>Lycopodiella inundata</i>                                                                                                                                      | 78       |
| <b>Figure 39</b> | <i>Pompilus cinereus</i>                                                                                                                                                          | 81       |
| <b>Figure 40</b> | Quelques batraciens cités en carrières et leur biotope                                                                                                                            | 82       |
| <b>Figure 41</b> | Reptiles cités en carrières calcaires                                                                                                                                             | 84       |
| <b>Figure 42</b> | Quelques oiseaux cités en carrières calcaires                                                                                                                                     | 86       |
| <b>Figure 43</b> | Chauves-souris citées dans les carrières souterraines calcaires                                                                                                                   | 88       |
| <b>Figure 44</b> | Oseille à feuilles rondes ( <i>Rumex scutatus</i> )                                                                                                                               | 94       |



## LISTE DES FIGURES

|                  |                                                                                                                                                               |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 45</b> | Les facteurs de variabilité des carrières                                                                                                                     | 96  |
| <b>Figure 46</b> | L'importance des corridors biologiques pour la colonisation d'un site.                                                                                        | 98  |
| <b>Figure 47</b> | Portion de carreau* inondé en permanence où se développe une végétation hygrophile*                                                                           | 100 |
| <b>Figure 48</b> | L'Oseille à feuilles rondes, <i>Rumex scutatus</i>                                                                                                            | 103 |
| <b>Figure 49</b> | Merlon* colonisé par le Tussilage ( <i>Tussilago farfara</i> ).                                                                                               | 104 |
| <b>Figure 50</b> | Pelouse* à Canche précoce, <i>Aira praecox</i>                                                                                                                | 105 |
| <b>Figure 51</b> | Relation entre les différentes unités de landes* dans les carrières de la Basse-Normandie armoricaine                                                         | 106 |
| <b>Figure 52</b> | Lande* haute à Genêt à balais ( <i>Cytisus scoparius</i> ) et Ajonc d'Europe ( <i>Ulex europaeus</i> )                                                        | 107 |
| <b>Figure 53</b> | Le Bouleau pubescent ( <i>Betula pubescens</i> )                                                                                                              | 108 |
| <b>Figure 54</b> | Saulaie à Saule roux, <i>Salix acuminata</i>                                                                                                                  | 109 |
| <b>Figure 55</b> | Évolution de la richesse moyenne en espèces végétales de 30 carrières sèches calcaires d'âge différent                                                        | 110 |
| <b>Figure 56</b> | Évolution du nombre d'espèces d'orthoptères sur d'anciennes mines à ciel ouvert (Haute-Vienne) en fonction de l'âge de leur réaffectation (semis de gazon...) | 111 |
| <b>Figure 57</b> | Évolution de la température dans différents habitats d'une carrière                                                                                           | 112 |
| <b>Figure 58</b> | Mesures de l'humidité relative et de la température pendant une journée sur des versants rocheux d'Ille-et-Vilaine                                            | 113 |
| <b>Figure 59</b> | Nombre d'espèces de plantes vasculaires en fonction de la taille de la carrière                                                                               | 114 |
| <b>Figure 60</b> | L'ancienne carrière de Kerhoual (Morbihan)                                                                                                                    | 115 |
| <b>Figure 61</b> | Carrière des Deux-Sèvres                                                                                                                                      | 116 |
| <b>Figure 62</b> | Exemple d'un impact de la faune sur la flore                                                                                                                  | 117 |
| <b>Figure 63</b> | Approche multicritères simplifiée                                                                                                                             | 121 |
| <b>Figure 64</b> | Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises                                                                                | 122 |
| <b>Figure 65</b> | Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises                                                                                | 123 |
| <b>Figure 66</b> | Méthode d'évaluation de la valeur écologique des terrils                                                                                                      | 125 |
| <b>Figure 67</b> | Méthode d'échantillonnage pour des relevés botaniques                                                                                                         | 126 |
| <b>Figure 68</b> | Les étapes d'un diagnostic écologique sur le terrain                                                                                                          | 127 |
| <b>Figure 69</b> | Vocabulaire de la renaturation                                                                                                                                | 131 |
| <b>Figure 70</b> | Rosotis à feuilles rondes                                                                                                                                     | 139 |
| <b>Figure 71</b> | Un modèle pour la réaffectation écologique                                                                                                                    | 140 |
| <b>Figure 72</b> | Exemple de traitement des fronts de taille                                                                                                                    | 141 |
| <b>Figure 73</b> | Reconstitution d'un sol pour un objectif productif (sylvicole)                                                                                                | 142 |
| <b>Figure 74</b> | Comparaison d'un aménagement « camouflage » et d'un aménagement écologique                                                                                    | 144 |
| <b>Figure 75</b> | Exemple de traitement des pentes selon leur exposition                                                                                                        | 145 |
| <b>Figure 76</b> | Exemple de valorisation des terrils, merlons et éboulis                                                                                                       | 145 |
| <b>Figure 77</b> | Exemple d'aménagement d'une entrée de site                                                                                                                    | 146 |
| <b>Figure 78</b> | Un réaménagement exemplaire ? La Chalandrue, autoroute A31 (Côte-d'Or)                                                                                        | 147 |
| <b>Figure 79</b> | Répartition chronologique des documents                                                                                                                       | 156 |
| <b>Figure 80</b> | Répartition géographique des références                                                                                                                       | 157 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                   |                                                                                                                                                         |     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau 1</b>  | Composition de la production de l'activité carrière en 2004                                                                                             | 16  |
| <b>Tableau 2</b>  | Production régionale de roches massives en 2004                                                                                                         | 17  |
| <b>Tableau 3</b>  | Eventail des instruments de la politique environnementale                                                                                               | 25  |
| <b>Tableau 4</b>  | Richesse floristique et faunistique en Europe et en France métropolitaine                                                                               | 31  |
| <b>Tableau 5</b>  | Processus se développant au cours des successions* primaires sur site dégradé                                                                           | 33  |
| <b>Tableau 6</b>  | Classification des principaux modes de dissémination                                                                                                    | 38  |
| <b>Tableau 7</b>  | Évolution de la population de batraciens et reptiles dans une mine de lignite du nord-est de l'Espagne                                                  | 54  |
| <b>Tableau 8</b>  | Résumé quantitatif de la succession* de la faune du sol dans des sites miniers germaniques                                                              | 58  |
| <b>Tableau 9</b>  | Nombre d'individus de la batrachofaune et de l'herpétofaune potentielles d'anciens sites miniers espagnols en fonction de leur âge après végétalisation | 61  |
| <b>Tableau 10</b> | Nombres d'invertébrés mentionnés dans les carrières calcaires                                                                                           | 79  |
| <b>Tableau 11</b> | Synthèse des potentialités biologiques des carrières calcaires                                                                                          | 90  |
| <b>Tableau 12</b> | Exigences écologiques des groupements* hygrophiles                                                                                                      | 99  |
| <b>Tableau 13</b> | Répartition des groupements* dans les carrières siliceuses                                                                                              | 101 |
| <b>Tableau 14</b> | Situation stationnelle relative des groupements* de lande* en fonction de la profondeur et du degré d'humidité des sols                                 | 106 |
| <b>Tableau 15</b> | Situation stationnelle des groupements* arbustifs et arborescents en fonction du gradient trophique et du degré d'humidité des sols                     | 107 |
| <b>Tableau 15</b> | Les facteurs de variabilité des carrières, synthèse                                                                                                     | 118 |
| <b>Tableau 17</b> | Comparaison de bio-indicateurs                                                                                                                          | 124 |
| <b>Tableau 18</b> | Les éléments principaux des successions primaires sur terrain dégradé et les différentes façons de les assister                                         | 138 |
| <b>Tableau 19</b> | Récapitulatif des sources explorées et des résultats obtenus                                                                                            | 155 |



Une carrière est souvent perçue par le grand public comme une atteinte à l'environnement : elle modifie une surface de milieu « naturel » et influe sur le paysage. Dès les premières phases d'exploitation pourtant, des signes de reconquête spontanée apparaissent : flore et faune ne tardent pas à s'installer sur ce milieu nouveau. Peut-être moins spectaculaire dans les carrières de roches massives que dans les gravières en eau, ce phénomène transforme parfois le site en îlot de nature original, dans un environnement souvent banalisé et appauvri par les effets de l'agriculture ou de l'urbanisation.

En fin d'exploitation une carrière donne souvent naissance à un plan d'eau, une base de loisirs, une parcelle agricole ou sylvicole. Ces modes de réaménagement sont habituels. Quel que soit l'objectif retenu, la carrière, faite d'habitats créés, est colonisée par des espèces animales et végétales sauvages pendant et après son exploitation. Si la carrière modifie un paysage, elle crée aussi des **conditions d'installation d'espèces naturelles souvent originales, contribuant ainsi à la préservation et à la restauration d'une « biodiversité » générale.**

Cette observation, faite il y a déjà plus de vingt ans par des scientifiques et des naturalistes, fait émerger l'idée qu'un retour à la nature de la carrière en fin d'exploitation peut constituer un objectif de réaménagement en soi, au même titre qu'une reprise agricole ou forestière. Dans un contexte de perte constatée de biodiversité, de volonté de préservation des espèces et des habitats, ce type de remise en état ouvre des champs d'études pour les scientifiques, offre des opportunités d'aménagement aux gestionnaires du territoire et donne une image différente des carrières.

Une carrière, dont l'exploitation a été arrêtée à une époque où la réglementation n'imposait pas encore la remise en état des lieux au fur et à mesure de l'exploitation, présente parfois ce qui passe pour un fouillis végétal, témoin d'une expression spontanée et rapide de la nature. Les potentialités écologiques de ce type de site se révèlent à cette occasion.

Quelles sont-elles ?

De quels facteurs dépendent-elles ?

Quelles interventions peuvent les favoriser ou leur nuire ?

La présente étude bibliographique sur les potentialités écologiques des carrières de roches massives tente de répondre à ces questions.





# Présentation de l'étude



- > Contexte de l'étude
- > Objectifs de l'étude
- > Plan de l'étude



# I PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Un programme d'étude sur les potentialités écologiques des carrières de roches massives a été engagé en 2000 par l'Union Nationale des Producteurs de Granulats. Il s'inscrit dans la même logique que l'étude précédemment réalisée par le Comité National de la Charte (C.N.C.), qui évaluait le rôle et l'intérêt écologiques des carrières en eau en tant que zones humides (Écosphère, 2001). Ce programme fait également suite à une étude menée dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats qui portait sur l'évaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation ainsi que sur les modalités de leur restauration écologique (Sauveterre, 1985).

L'ensemble de ces démarches engagées à l'instigation des producteurs de granulats constitue autant de recherches de réponses aux questions que se posent les différents acteurs (exploitants de carrières, propriétaires fonciers, état, collectivités locales, associations, administrations de tutelles...) sur le devenir des sites de carrières. Elles manifestent également la volonté de prise en compte du sujet par la profession.

Il s'agit ici de recherches appliquées, visant à améliorer concrètement la connaissance de l'écologie des carrières de roches massives et de leurs modalités de réaffectation afin d'optimiser leur participation éventuelle à la conservation de la nature.

Concrètement, le présent document est une synthèse de deux études distinctes dont la complémentarité et les similitudes justifiaient le regroupement :

- « Carrières de roche éruptive - Potentialité écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions » (ENCEN, 2001c), étude réalisée dans le cadre du premier volet du programme de recherches sur les potentialités écologiques des carrières de roches massives, consacré aux roches éruptives du Massif armoricain et financé par les comités régionaux de la Charte des producteurs de granulats de Bretagne, de Basse-Normandie et des Pays de la Loire ainsi que le Comité National de la Charte (C.N.C.) ;
- « Les potentialités écologiques des carrières calcaires – Étude bibliographique » (ENCEN, 2004), travail financé et réalisé sous l'égide du C.N.C. et de l'UNPG\* dans le cadre du volet relatif aux carrières de roches massives calcaires.

Comme pour l'étude « carrières et zones humides » (Écosphère, 2001), dès l'origine, la démarche des comités régionaux et du Comité national de la Charte s'est voulue transparente. Pour ce faire, le caractère objectif et scientifique du programme a été affirmé. Un comité de pilotage comprenant des scientifiques, des représentants des professionnels de l'industrie du granulat et du ministère chargé de l'environnement a été mis en place, avec pour vocation le suivi technique, scientifique et financier du déroulement des études.

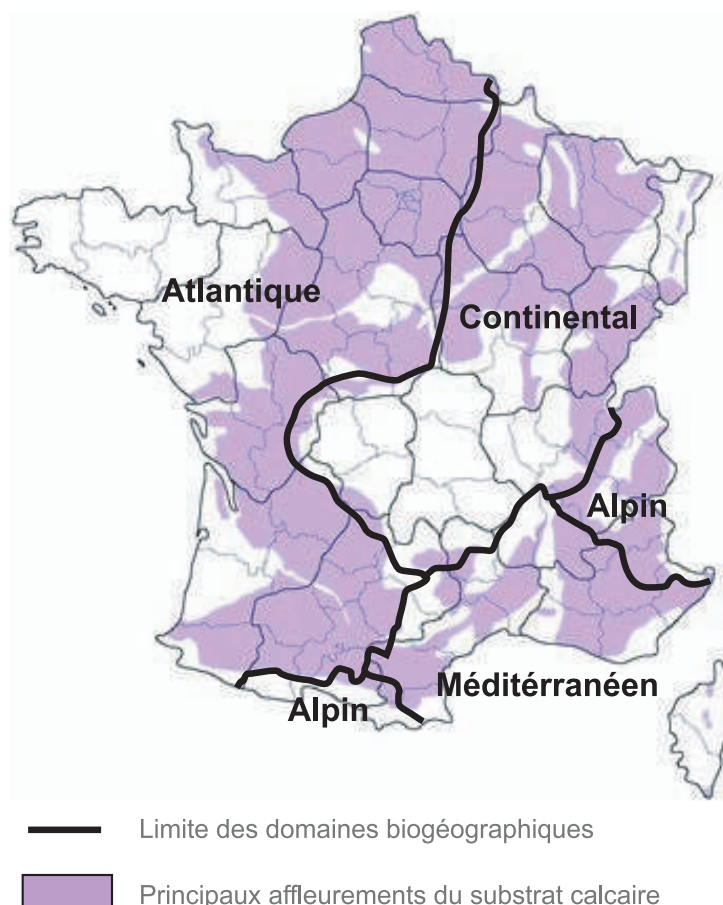
Ce programme d'études comprend trois phases principales dont la chronologie est la suivante :

- 1- réalisation d'une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances concernant l'écologie des carrières de roches massives ;
- 2- réalisation d'une expertise écologique d'un échantillon de sites de carrières ;
- 3- rédaction d'un rapport de synthèse et d'un guide technique pour la restauration des carrières, à destination de la profession et des partenaires ;

Le programme engagé concerne l'ensemble du territoire national et donc quatre zones biogéographiques\* : continentale, atlantique, alpine et méditerranéenne (Figure 1). Sur un total de six zones biogéographiques\* distinguées à l'échelle de la Communauté européenne (zones macaronésienne et boréale en plus des précédentes), la France joue ainsi un rôle majeur dans la préservation du patrimoine naturel en Europe.

**Figure 1**

Les quatre zones biogéographiques françaises et les principaux affleurements du substrat calcaire



## 2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les objectifs de cette synthèse bibliographique sont les suivants :

- mettre en évidence les potentialités écologiques des carrières de roches massives ;
- comprendre le fonctionnement des écosystèmes et les facteurs qui guident et favorisent leur installation ;
- mieux maîtriser la mise en oeuvre des programmes de réaménagement écologique de ces carrières.

## 3. PLAN DE L'ÉTUDE

Le présent document concerne la première phase du programme de recherche, c'est-à-dire l'analyse bibliographique destinée à faire le bilan des connaissances disponibles sur l'écologie des carrières de roches massives. Cette analyse est étoffée d'une réflexion introduisant les modalités de réaffectation des sites d'extraction de granulats dans le cadre d'une écologie de la restauration appliquée aux carrières.

L'analyse bibliographique comporte quatre parties :

**1. Une présentation de l'écologie des carrières de roches massives en termes de colonisation puis d'évolution des biocénoses et des habitats.**

Elle montre que la mise à nu de roches que provoque l'activité d'extraction et le caractère pionnier des biocénoses qui colonisent ces milieux minéraux sont les éléments majeurs qui ressortent de la spécificité écologique des carrières de roches massives.

**2. Un bilan de la faune et de la flore rencontrées dans les carrières de roches massives.**

Celui-ci montre qu'un nombre important d'espèces animales et végétales rares, endémiques ou menacées se développent dans ces milieux particuliers. Appréhendées à l'échelle du paysage, les carrières jouent de multiples rôles pour les espèces (aussi bien pendant que suite à l'exploitation) : zone refuge, zone de reproduction, aire de nourrissage...

**3. Une analyse des facteurs influençant la diversité écologique des carrières de roches massives.**

Cette étude inventorie les différents facteurs abiotiques à l'origine des variations au sein des écosystèmes de carrières et tente d'appréhender leur fonctionnement. Nombreux, ils ne sont pas systématiquement bien connus.

**4. Une réflexion sur le réaménagement écologique des carrières.**

Celle-ci s'appuie sur les modalités techniques, scientifiques et sociales d'un tel projet. Elle montre la nécessité de concevoir en amont une réflexion technique et sociale tout en gardant une souplesse qui permette de s'adapter aux particularités de chaque site.



# Présentation des carrières de roches massives



- > *Les carrières en France*
- > *Les modes d'exploitation d'une carrière*
- > *Les différentes natures de roches*
- > *Le cadre réglementaire national et incitatif européen*



## II PRÉSENTATION DES CARRIÈRES DE ROCHES MASSIVES

### 1. LES CARRIÈRES EN FRANCE

Elles couvrent 0,02% du territoire – la consommation annuelle moyenne est de **6,8 tonnes** par habitant  
**55% de la production nationale de granulats est issue des carrières de roches massive**

La pierre est exploitée par l'Homme pour ses constructions depuis plus de 5 000 ans (Brunet, 1983). Elle constitue un matériau indispensable au développement économique et à l'aménagement du territoire.

Les carrières occupent actuellement en France 0,02% du territoire (statistiques 2000 UNICEM\*). Après l'air et l'eau, cette ressource minérale représente la matière première la plus utilisée par l'Homme avec une consommation moyenne d'environ 6,8 tonnes par habitant et par an, loin devant le pétrole (1,5 t/hab./an), le bois (0,8 t/hab./an) ou le charbon (0,7 t/hab./an). La production totale de matériaux se répartit en trois grandes familles (Tableau 1).

| Tableau 1 Composition de la production de l'activité carrière en 2004<br>Source : UNICEM*        |                              |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|
| <b>GRANULATS (UNPG)</b>                                                                          |                              |             |
| Roches massives calcaires                                                                        | 105 000 000 t                | 26%         |
| Roches massives éruptives et métamorphiques                                                      | 118 000 000 t                | 29%         |
| Roches meubles (alluvionnaire, marin, autres)                                                    | 168 000 000 t                | 41%         |
| Recyclage                                                                                        | 17 000 000 t                 | 4%          |
| <b>Total</b>                                                                                     | <b>408 000 000 t</b>         | <b>100%</b> |
| <b>MATÉRIAUX POUR L'INDUSTRIE (SFIC)</b>                                                         |                              |             |
| Roches de nature calcaire                                                                        | 19 600 000 t                 | 85%         |
| Roches d'autres natures (galets, pouzzolane...) - valeur estimée en raison du secret statistique | 3 500 000 t                  | 15%         |
| <b>Total</b>                                                                                     | <b>21 600 000 t</b>          | <b>100%</b> |
| <b>PIERRE DE TAILLE (SNROC)</b>                                                                  |                              |             |
| Roches calcaires                                                                                 | 396 000 m <sup>3</sup>       | 72%         |
| Roches autres (granites, grès, schistes...)                                                      | 155 000 m <sup>3</sup>       | 28%         |
| <b>Total</b>                                                                                     | <b>551 000 m<sup>3</sup></b> | <b>100%</b> |

LES GRANULATS, destinés aux travaux publics, sont de loin le matériau dont la production est la plus élevée. De 75 millions de tonnes en 1950, elle est passée à 500 millions de tonnes en 1975. Elle a par la suite baissé lentement pour atteindre 400 millions de tonnes en 2003. La production a de nouveau augmenté de 2% entre 2003 et 2004 pour atteindre 408 millions de tonnes. Ces matériaux étaient produits en 2004 par 1770 entreprises sur environ 4 000 sites, avec une tendance progressive à la réduction du nombre de carrières et d'entreprises (statistiques UNICEM\*).

Les granulats sont issus pour l'essentiel de roches meubles ou massives :

- les matériaux meubles, généralement d'origine alluvionnaire, sont constitués d'accumulation d'éléments issus de l'érosion des roches affleurant en surface, transportés et déposés par les cours d'eau ou glaciers dans les vallées ;
- les roches massives regroupent l'ensemble des roches consolidées, qu'elles soient d'origine sédimentaire (calcaires et grès), éruptive ou métamorphique (granites, porphyres, gneiss, amphibolites, quartzites, schistes, basaltes...).

En 2004, les roches massives représentaient **plus de la moitié (55%) de la production nationale de granulats**. Les matériaux de recyclage contribuaient à 4% de la production, les deux cinquième (41%) restants provenaient des gisements alluvionnaires. Malgré une augmentation de 2,3%, la part des roches massives reste constante ces dernières années, la production de roches meubles ayant augmenté dans les mêmes proportions.

LES MATÉRIAUX DESTINÉS À L'INDUSTRIE représentent une production environ vingt fois plus faible que celle des granulats avec un peu plus de 22 millions de tonnes produites en 2004. Les matériaux d'origine calcaire y jouent un rôle majeur, assurant près des **90% des besoins**. Ce sont des gisements particuliers, recherchés pour leur richesse, voire leur pureté, en carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), leur blancheur, leur composition chimique particulière. Ils trouvent des applications dans une large gamme d'activités : industries cimentières (calcaires marneux, craies...) et de la chaux, activités agricoles pour l'amendement calcaire, industries pharmaceutiques, chimiques (élaboration des peintures, crépis, plastiques, PVC...), agro-alimentaires, papetières... comme charge minérale notamment.

LA PIERRE DE TAILLE est l'activité la moins importante, mais elle se rapporte au mode le plus ancien de valorisation de la pierre. Son implication est forte dans la construction, en particulier la rénovation, la production de dalles et d'objets divers, la sculpture, la décoration. Elle fait vivre plus de 930 entreprises sur de nombreux sites (statistiques UNICEM\*). Pour 2004 la production se monte à environ 550 000 m<sup>3</sup>, dont presque les trois quarts sont d'origine calcaire.

**Tableau 2**

Production régionale de roches massives en 2004

Source : UNICEM\*/UNPG\*

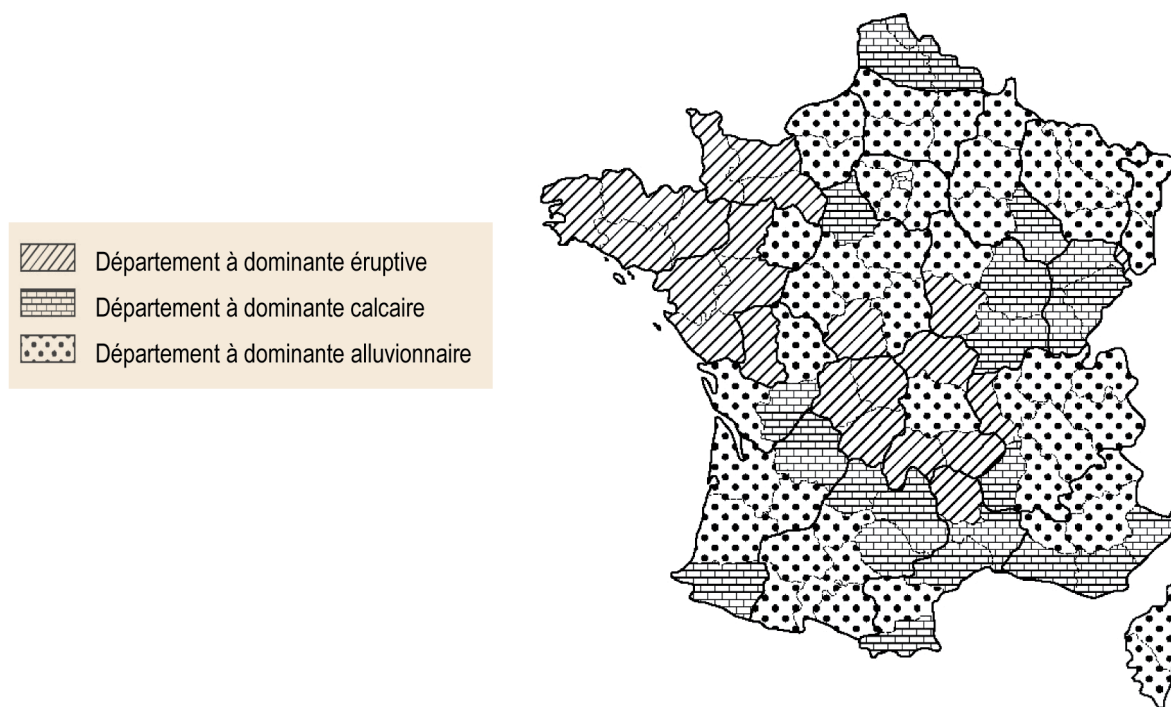
Estimation en raison du secret statistique ou de l'absence de donnée

| Région                  | En million(s) de tonnes | Calcaire   | Éruptif    | Pourcentage de la production totale |
|-------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------------------|
| PAYS DE LA LOIRE        | 31,7                    | 5%         | 95%        | 13,2                                |
| BRETAGNE                | 26,1                    | 1%*        | 99%        | 10,9                                |
| BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ | 19,7                    | 70%        | 30%        | 8,2                                 |
| PROVENCE                | 18,7                    | 84%        | 16%        | 7,8                                 |
| LANGUEDOC-ROUSSILLON    | 17,1                    | 85%        | 15%*       | 7,1                                 |
| NORD-PAS DE CALAIS      | 16,4                    | 97%        | 3%*        | 6,9                                 |
| POITOU-CHARENTES        | 16,2                    | 32%        | 68%        | 6,7                                 |
| NORMANDIE               | 14,9                    | 18%*       | 82%        | 6,2                                 |
| RHÔNE-ALPES             | 13,0                    | 54%        | 46%        | 5,4                                 |
| LORRAINE                | 12,5                    | 37%        | 63%*       | 5,2                                 |
| MIDI-PYRÉNÉES           | 10,6                    | 87%        | 13%        | 4,4                                 |
| AUVERGNE                | 9,0                     | 5%*        | 95%        | 3,7                                 |
| AQUITAINE               | 8,4                     | 86%        | 14%        | 3,5                                 |
| CENTRE                  | 8,1                     | 75%        | 25%*       | 3,4                                 |
| ILE-DE-FRANCE           | 5,5                     | 35%        | 65%*       | 2,3                                 |
| LIMOUSIN                | 5,1                     | 20%*       | 80%        | 2,1                                 |
| CHAMPAGNE ARDENNE       | 5,0                     | 100%       | 0%         | 2,1                                 |
| ALSACE                  | 1,4                     | 50%*       | 50%*       | 0,6                                 |
| PICARDIE                | 0,6                     | 70%        | 30%*       | 0,2                                 |
| <b>FRANCE</b>           | <b>240,2</b>            | <b>47%</b> | <b>53%</b> | <b>100</b>                          |

Le détail des productions régionales et départementales de roches massives et de roches meubles en France est donné par le Tableau 2 et la . Les principales régions productrices de roches massives produisent essentiellement des roches éruptives (Pays de la Loire, Bretagne...), des roches calcaires (Provence, Languedoc-Roussillon...) ou les deux (Rhône-Alpes...).

**Figure 2**

Productions dominantes de granulats  
D'après les statistiques UNICEM\* / UNPG\*



## 2. LES MODES D'EXPLOITATION D'UNE CARRIÈRE

Il est classiquement cité deux principaux modes d'exploitation en roches massives (Figure 2) :

- **la carrière à flanc de coteau** : l'exploitation attaque d'abord le pied de versant puis entame le coteau sur sa hauteur, en partie ou en totalité ;
- **la carrière en fosse** : cette exploitation dite également « en dent creuse » entame le gisement depuis le plateau en formant une excavation de plus en plus profonde et large à l'ouverture. Les profondeurs sont de l'ordre de quelques dizaines à une centaine de mètres. Un phénomène courant dans les carrières en fosse est leur remplissage par les eaux superficielles et souterraines, qui nécessite un pompage constant durant l'exploitation et provoque l'enneigement de la fosse après arrêt de l'activité. Ces cas peuvent s'apparenter pour partie aux zones humides décrites dans les travaux antérieurs menés sur les gravières (Kovacs et al., 2001).

Des situations mixtes existent entre ces deux types. À partir d'une carrière à flanc de coteau, l'exploitation peut se poursuivre par abaissement du carreau (à savoir le fond de la carrière) à la manière d'une exploitation en fosse.

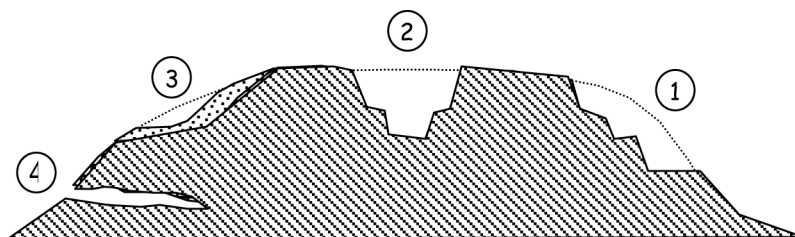
Deux autres modes d'exploitation peuvent être rencontrés :

- **l'exploitation d'éboulis naturels** : l'exploitation enlève tout ou partie de l'éboulis développé sur le versant et peut aussi entamer le substratum calcaire. Ce mode peut être considéré comme une variante de la carrière à flanc de coteau. Les éboulis exploités sont généralement d'origine postglaciaire et concernent un matériau meuble.
- **la carrière souterraine** : elle exploite un gisement par creusement de galeries et avancée progressive. Il s'agit d'exploitations de pierre de taille dans la majorité des cas, de gypse pour la fabrication de plâtre (en Ile-de-France, Lorraine...), plus rarement de calcaire marneux pour l'industrie cimentière (Isère).



**Figure 3**

Les quatre modes d'exploitation des roches massives  
(Photos ENCEM)



1 - Carrière à flanc de coteau



2 - Carrière en fosse



3 - Carrière d'éboulis



4 - Carrière souterraine

La spécificité des exploitations en souterrain est liée à leur stratification naturelle plus ou moins horizontale (roche sédimentaire). Pour des gisements particuliers comme les gypses ou certaines pierres de taille, la roche recherchée forme ainsi une veine plus ou moins épaisse mais étendue (à l'image des veines de charbon). Lorsqu'elle s'enfonce dans un coteau, sous une épaisse couche de matériaux stériles, l'extraction en souterrain s'impose alors. Les roches éruptives n'offrent pas une telle disposition, elles se présentent ordinairement en massifs largement affleurant. Leur exploitation en souterrain ne s'impose donc pas comme une nécessité, même pour des roches particulières.

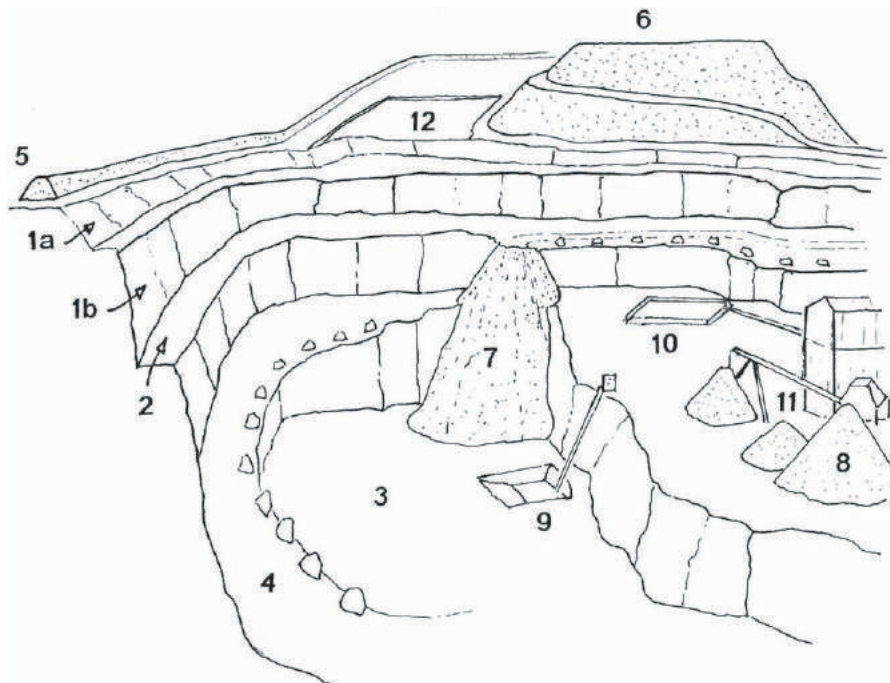
Les gisements d'éboulis naturels sont hérités pour la plupart d'entre eux des périodes inter-glaciaires. Face au phénomène de gélifraction, les roches fracturées sont les plus sensibles. Elles se désagrègent en blocs, rocailles et cailloux, entraînant la formation de vastes éboulis en pied de falaise et sur des versants marqués.

Les sites d'extraction de matériaux massifs présentent classiquement deux types de zones : une zone d'extraction, marquée par la formation de fronts de taille (ou de galeries dans le cas d'extraction souterraine), et une zone de traitement ou « carreau », zone plane et compactée, qui accueille souvent les activités de concassage, criblage et stockage des matériaux et des engins (). Les différentes zones d'exploitation de la carrière sont donc les suivantes.

1. Les **fronts de taille\*** sont les parois verticales de la carrière, obtenues par abattage de la roche à l'explosif (tirs de mines). La hauteur réglementaire de chaque front (c'est-à-dire le gradin situé entre deux banquettes) est actuellement de 15 m et peut atteindre 30 m par dérogation. On distingue les fronts inférieurs (du gisement exploité) du front de découverte constitué de matériaux superficiels altérés (matériaux de découverte).
2. La **banquette\*** est la partie horizontale qui sépare deux fronts de taille\* (le front et sa banquette inférieure constituent un gradin). La largeur des banquettes\* en exploitation est de plusieurs dizaines de mètres. En phase ultime, les banquettes dites « résiduelles » excèdent rarement une largeur de cinq mètres.
3. Le **carreau\*** est la partie horizontale formée par l'avancée progressive des fronts et donc localisée en fond de fosse. Sur les plus grandes carrières, le carreau atteint des surfaces de quelques dizaines voire quelques centaines d'hectares.
4. Les **pistes** relient entre elles les différentes parties de la carrière. Elles permettent notamment l'accès des engins aux fronts en exploitation. Leur largeur est souvent d'une dizaine de mètres.
5. Un **merlon\*** est un dépôt linéaire de faible dimension (souvent 2 à 4 m de haut sur 5 à 10 m de large), édifié généralement comme élément de protection en périphérie de la carrière (sécurité du public, bruit, protection visuelle, etc.). Les merlons sont constitués de matériaux de découverte\* : terre végétale et/ou roche altérée.
6. Un **terril\*** est un dépôt volumineux de matériaux non commercialisables appelés «**stériles\***». On distingue les stériles de découverte (roche superficielle altérée) et les stériles de production correspondant à la partie non commercialisable du gisement après traitement. Le volume de stériles\* produit est très variable d'une carrière à l'autre.
7. Les matériaux stériles peuvent être mis en **remblais** dans la fosse même quand les conditions d'exploitation le permettent.
8. La roche est concassée et criblée au niveau de l'installation de traitement pour la production de **granulats** de dimensions variables en fonction des besoins (ballasts ferroviaires, couches routières, mortiers, enduits...). En attendant d'être évacués vers les chantiers, les granulats sont stockés en dépôts de plusieurs mètres de hauteur sur des surfaces parfois importantes (plusieurs hectares).
9. Le **bassin d'exhaure\*** (ou de fond de fosse) est destiné à recueillir les eaux pluviales et souterraines collectées par la fosse (eaux d'exhaure) afin de pouvoir les évacuer par pompage vers l'extérieur (après passage dans un bassin de décantation). Sa superficie est souvent de l'ordre de 100 à 200 m<sup>2</sup>. Il n'est pas présent sur toutes les carrières, en particulier en roches calcaires du fait du caractère drainant du substrat.
10. Les **bassins de décantation** permettent le traitement des eaux par simple gravitation pour réduire leur taux de matière en suspension (MES). Ils servent soit au traitement des eaux de lavage des matériaux en circuit fermé, soit au traitement des eaux d'exhaure avant rejet dans le milieu naturel. Leur nombre varie en fonction des capacités de l'installation de traitement et du volume d'exhaure. Les bassins sont curés si nécessaire à la pelle mécanique. Les boues récupérées sont généralement stockées avec les matériaux stériles.
11. La zone affectée à l'**installation de traitement** et aux stocks constituent le secteur de plus grande activité de la carrière puisque c'est à ce niveau qu'aboutissent tous les matériaux extraits et que repartent les matériaux traités. Ce secteur abrite également, le plus souvent, diverses structures annexes telles que les ateliers, le pont-bascule, les réserves de carburants, etc.
12. L'exploitation du front de découverte nécessite d'enlever préalablement les différents horizons humifères qui constituent le sol. Cette opération laisse des **zones décapées** sur des surfaces plus ou moins importantes en fonction de la fréquence des travaux de décapage. La terre végétale décapée est stockée en merlons et peut être réutilisée pour la remise en état du site.

**Figure 4**

Schéma d'une carrière en exploitation  
D'après ENCEM, 2001



**Fosse :**

- 1. Front de taille
- 1a. Front de découverte
- 1b. Front sain
- 2. Banquette
- 3. Carreau
- 4. Piste

**Stocks et dépôts :**

- 5. Merlon
- 6. Terril
- 7. Remblai et verse
- 8. Stock de granulats

**Bassins :**

- 9. Bassin d'exhaure
- 10. Bassin de décantation

**Annexes :**

- 11. Aire des installations de traitement
- 12. Zone décapée

### 3. LES DIFFÉRENTES NATURES DE ROCHES

#### 3.1 ROCHES CALCAIRES

Les calcaires sont des **roches carbonatées** : leur formule chimique est à base de carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). D'autres roches carbonatées lui sont associées dans la présente étude, comme les craies, formées d'accumulation de tests coquilliers d'organismes microscopiques, et les dolomies. Ces roches sont essentiellement d'origine marine. Elles proviennent d'une accumulation d'éléments détritiques, d'une activité biologique ou d'une précipitation chimique. Ces trois facteurs sont souvent combinés, ce qui contribue à la diversité des roches calcaires rencontrées.

Les calcaires exploités en carrière ont des aspects et des caractéristiques différentes. Selon plusieurs critères (origine, granulométrie, nature chimique), sont distinguées les principales roches suivantes :

- Les **calcaires constitués par des organismes vivants** (calcaire construit ou roche de bioherme calcaire bioclastique et craie) : ils résultent de l'accumulation de coquilles et squelettes calcaires de plantes et d'animaux. La précipitation chimique des carbonates joue le rôle de ciment entre les éléments constitutifs de ces roches.
- Les **calcaires chimiques et détritiques** (calcaires cryoclastiques, sableux, silteux, argileux, lithographique, compact, oolithique, siliceux, marneux, dolomitique et dolomie) : ce sont des roches issues soit de débris de roches ou boues calcaires, soit d'une précipitation directe de carbonates.
- Les **calcaires métamorphiques** : il s'agit des roches comme le marbre, issues de la transformation par métamorphisme de matériaux riches en carbonate.

Ces roches ont en commun la présence de carbonate. Mais leur diversité reste très importante selon leur nature (teneur en carbonate, en dolomie, en argile, en silice...), leurs caractéristiques physiques (compacité, porosité, dureté, fracturation...), leur structure (bancs épais compacts ou bancs alternant plus ou moins régulièrement avec des lits plus ou moins épais de marnes ou d'argiles...). Cette variabilité induit inévitablement des comportements tout aussi variables de la roche face au climat (érosion, altération et fragmentation, infiltration d'eau...) et donc la création d'habitats variés entraînant des réactions différentes de la végétation et de la faune associée.

#### 3.2 ROCHES ÉRUPTIVES DURES

Le terme de roches éruptives est un terme générique utilisé par la profession pour désigner un ensemble de roches riches en silice mais aux origines géologiques différentes. Peuvent ainsi être distingués :

- Les **matériaux magmatiques éruptifs (ou encore effusifs ou volcaniques)** proprement dits, tels que le basalte ou la rhyolite : ceux-ci résultent d'un refroidissement rapide du magma. C'est par exemple le cas des coulées de lave. Les cristaux n'ont pas eu le temps de se former et ne sont donc pas visibles à l'oeil nu : la roche présente une structure microlitique.
- Les **matériaux magmatiques intrusifs** comme les gabbros ou les granites : si le refroidissement du magma est suffisamment lent, les cristaux sont largement développés. La roche présente alors une texture grenue où les minéraux de dimension millimétrique sont bien visibles à l'oeil nu.

Les matériaux éruptifs ou magmatiques sont classés en fonction de leur teneur en silice (entre 20 et 60% pour un granite), en feldspaths alcalins (plus de 90% pour une syénite), en plagioclases (plus de 90% pour une diorite) et en feldspathoïdes (de 60 à 100% pour un feldspathoïdolite). En dehors des granites, le plus souvent exploités en pierre de taille, ils sont utilisés pour la production de granulats.



- **Les matériaux métamorphiques** : ils résultent de la transformation à l'état solide d'autres roches (sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques) lors d'un changement de leurs conditions de pression et/ou de température. Ce changement entraîne une modification minéralogique (par réaction chimique) et texturale de la roche. Deux sortes de métamorphisme peuvent être distinguées :

- **le métamorphisme de contact** dû à l'intrusion d'un corps chaud (magma, laves) dans une roche préexistante. Il est généralement d'origine thermique et son extension est relativement réduite autour de l'intrusion (de quelques mètres à quelques centaines de mètres). Les roches types sont les schistes et les cornéennes.
- **le métamorphisme plus général** affecte l'ensemble des roches sur des épaisseurs et des surfaces importantes. Il est généralement lié aux zones de contraintes engendrées par la tectonique des plaques. Les roches types sont les micaschistes et les gneiss.

Les roches métamorphiques, en dehors de l'andalousite qui sert à la fabrication de produits réfractaires dans toute l'Europe, sont généralement réservées à la production de granulats.

- **Les matériaux sédimentaires massifs** : il s'agit de roches comme les grès ou les quartzites, issues de la transformation par diagenèse<sup>1</sup> d'un sédiment après son dépôt pour le transformer en roche sédimentaire.

## 4. LE CADRE RÉGLEMENTAIRE NATIONAL ET INCITATIF EUROPÉEN

### 4.1. LA RÉGLEMENTATION RELATIVE AUX CARRIÈRES ET À LEUR REMISE EN ÉTAT

Avec le développement de la préoccupation environnementale, l'activité d'extraction de matériaux comme d'autres interventions d'aménagement du territoire (route, urbanisme) se trouve progressivement réglementée. Jusqu'en 1970, le Code minier impose une simple déclaration d'ouverture de carrière en mairie. Entre 1971 et 1979, la déclaration d'exploitation doit être présentée en préfecture, assortie d'un plan de **remise en état**. À partir de 1979, une autorisation préfectorale est nécessaire pour toute carrière de taille supérieure à 5 ha ou de production supérieure à 150 000 t/an. La procédure prévoit une enquête publique comprenant la présentation d'une **étude d'impact**.

Depuis 1994 (application de la loi carrière de janvier 1993), les carrières sont régies par la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (I.C.P.E) et soumises à autorisation préfectorale avec enquête publique, quels que soient leur taille et leur niveau de production. Une **remise en état** assortie de **garanties financières** est obligatoire. La durée maximale des autorisations est limitée à trente ans.

**L'obligation de remise en état** des lieux après exploitation s'applique aux carrières depuis 1971, elle a été reprise dans la loi carrière de 1993. La « remise en état » consiste à nettoyer le terrain et à le mettre en sécurité avant de le restituer à son propriétaire. L'arrêté du 22.09.94 prévoit (art. 12.2) : « *La mise en sécurité des fronts de taille, le nettoyage de l'ensemble des terrains et, d'une manière générale, la suppression de toutes les structures n'ayant pas d'utilité après remise en état du site, l'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation dans le paysage, compte tenu de la vocation ultérieure du site* ».

<sup>1</sup> Ensemble des processus biochimiques et physico-chimiques qui, dans les conditions de subsurface (faibles pressions et températures), affectent un sédiment.

L'exploitant est donc tenu de remettre le site en état en fonction du projet de réaménagement défini dans l'étude d'impact de la demande d'autorisation (par exemple taluter les berges en pente douce pour un réaménagement en base nautique...).

La **mise en sécurité**, énoncée dans l'article 12.2, porte pour l'essentiel sur les fronts de taille (et les puits, lorsqu'il s'agit d'exploitations souterraines). Les fronts de taille peuvent être traités de façon directe (grillages et ancrages pour protéger des chutes de blocs ; purges manuelles renouvelées ; reprises de terrassement pour aménagement de pentes douces) ou indirecte (isolement des zones dangereuses par pièges à blocs en pieds de fronts, clôture du sommet interdisant l'accès).

Le « **réaménagement** » n'est pas défini dans les textes réglementaires : il ne s'agit plus seulement de remettre en état un site mais de le transformer en un lieu apte à une nouvelle utilisation (cf. *supra*).

La mise en place des **garanties financières** constitue l'avancée la plus notable de ces dernières décennies dans le domaine de la réglementation de la remise en état des carrières. Outre l'obligation d'obtenir une caution financière, cette réglementation impose à l'exploitant de fournir des évaluations de montants de garanties par phases quinquennales et oblige donc à une remise en état coordonnée. Les **plans quinquennaux de remise en état** sont maintenant obligatoires dans les demandes d'autorisation.

## 4.2. ANTICIPER LA LÉGISLATION EUROPÉENNE : LES INDUSTRIELS FRANÇAIS PARTENAIRES DE SON ÉVOLUTION

Il existe une panoplie d'instruments conçus pour intégrer la dimension environnementale dans le processus de prise de décision économique. Par exemple, l'étude d'impact sur l'environnement (EIE : Directive 85/337 modifiée par la Directive 97/11/CE) pour réduire les dommages occasionnés par les grands projets d'aménagement est aujourd'hui une procédure bien établie. Ainsi, au début des années 90, parmi 7000 études d'impacts estimées par année au sein de l'Union européenne, plus de 70% étaient françaises (AEE, 1999).

L'importance de l'intégration des considérations écologiques dans les décisions économiques et sectorielles est officiellement reconnue par l'article 6 de la version consolidée du traité d'Amsterdam, qui établit l'obligation d'intégrer les exigences de la protection de l'environnement dans toutes les politiques et actions communautaires.

### - Le traité d'Amsterdam -

Le traité d'Amsterdam est entré en vigueur le 1er mai 1999, après avoir été ratifié par tous les États membres de l'Union européenne. Il fait évoluer le traité de l'Union européenne : l'article 2 décrivant les objectifs de la CE a été modifié dans le sens où les buts économiques et sociaux sont complémentaires des dimensions écologiques pour atteindre l'objectif du développement durable et l'article 6 stipule que les exigences de protection de l'environnement doivent être intégrées dans la définition et la mise en oeuvre des politiques et actions de la Communauté...

Cette obligation s'est traduite dans le cadre du cinquième programme communautaire d'action pour l'environnement (5PAE) par la reconnaissance de quatre grandes catégories d'instruments (Tableau 3) :

- les instruments législatifs,
- les instruments liés au marché (instruments économiques et fiscaux et accords volontaires notamment),
- les instruments horizontaux d'appui (recherche, information, éducation...),
- les mécanismes de soutien financier.

**Tableau 3**

Eventail des instruments de la politique environnementale  
(AEE, 1999)



Ce développement a entraîné une modification de la législation et a amené les décideurs politiques à directement tenir compte des considérations environnementales au moment de formuler leurs politiques ; il est vécu par les professionnels (agriculteurs, industriels...) comme un ensemble de contraintes supplémentaires de plus en plus difficile à supporter au plan économique.

En examinant les instruments financiers de l'Union européenne, on constate qu'ils comportent tous un volet concernant directement ou indirectement l'environnement. **LIFE** (L'Instrument Financier pour l'Environnement) est précisément l'instrument spécifique du soutien au développement et à la mise en œuvre de la politique communautaire de l'environnement. Plus particulièrement, il finance des actions novatrices de démonstration visant entre autres à l'intégration des considérations environnementales dans l'aménagement et la mise en valeur du territoire, ainsi qu'à la minimisation des incidences environnementales des activités économiques.

L'objectif général de LIFE est notamment de contribuer à la mise en œuvre, à l'actualisation et au développement de la législation en matière de protection de l'environnement, pour ce qui concerne en particulier l'intégration des considérations environnementales dans d'autres politiques et au développement durable au sein de la Communauté.

Ainsi, l'Union européenne, par l'intermédiaire des instruments financiers qu'elle propose, soutient l'ensemble des acteurs (industrie, agriculture, collectivités, associations...) concernés par des aspects environnementaux et qui sont désireux de proposer de nouvelles orientations transférables à l'ensemble de la Communauté (éventuellement par une évolution de la législation).

L'Union européenne fournit donc à travers ces instruments financiers l'opportunité aux professionnels de l'industrie d'extraction des matériaux :

- de **développer des méthodes et techniques novatrices** afin d'intégrer les considérations relatives à l'environnement et au développement durable ;
- d'**anticiper les conséquences de l'évolution de la législation et de la politique en matière de protection de l'environnement** ;
- de contribuer, par des propositions concrètes et déjà mises en oeuvre dans le cadre de leur activité, à l'**actualisation et au développement de la législation et de la politique environnementale en adéquation avec les contraintes techniques et économiques.**



# L'analyse bibliographique



- > *Partie 1 : l'écologie des carrières*
- > *Partie 2 : la flore et la faune des carrières*
- > *Partie 3 : Les facteurs de la diversité écologique des carrières*
- > *Partie 4 : le réaménagement écologique des carrières*





***Partie 1 : l'écologie des carrières***

## PARTIE 1 : L'ÉCOLOGIE DES CARRIÈRES

### 1.1 LA BIODIVERSITÉ

#### 1.1.1 Le concept de biodiversité et ses implications

Les travaux et concepts portant sur la diversité biologique (ou biodiversité) connaissent depuis quelques années un développement intense, consolidé et amplifié par l'adoption de textes internationaux (convention sur la diversité biologique, Directive «Habitats»...). L'enjeu majeur réside dans le respect de l'équilibre des écosystèmes\*, clé d'un développement durable pour les activités humaines et l'environnement naturel (Duhautois, 1998).

##### **Du Sommet de la Terre à la Stratégie paneuropéenne de la diversité biologique et paysagère**

En 1972, la Conférence des Nations unies sur l'environnement a abouti à la «Déclaration de Stockholm» qui plaçait les questions écologiques au rang des préoccupations internationales.

Vingt ans plus tard, en juin 1992, a eu lieu à Rio de Janeiro la seconde Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement – connue sous le nom de «Sommet de la Terre». Ce Sommet a vu se concrétiser la signature de deux conventions, la première sur le changement climatique, la seconde sur la biodiversité.

Les objectifs de la Convention sur la diversité biologique sont la conservation de la diversité biologique, l'utilisation durable de ses éléments et le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques.

Son application est favorisée par la **Stratégie paneuropéenne de la diversité biologique et paysagère** dont les buts sont de réduire les menaces qui pèsent sur la diversité biologique, de consolider la diversité biologique et paysagère de l'Europe, de renforcer la cohérence écologique de l'Europe dans son ensemble et d'assurer la pleine participation du public à la conservation de la diversité biologique et paysagère.

Chaque écosystème\* est caractérisé par un cortège\* d'espèces ainsi que par des relations fonctionnelles assurant sa conservation ou son développement. La biodiversité est constituée de cet ensemble complexe et sa prise en compte s'appuie principalement sur la diversité **écologique** (écosystèmes\* ou habitats), la diversité spécifique (des espèces) et la diversité **génétique** (le patrimoine génétique et la variabilité à l'intérieur des espèces).

Le maintien de la biodiversité, ou tout du moins le ralentissement de son déclin, passe par une plus grande compréhension des mécanismes écologiques qui la régulent, à l'échelle du globe mais aussi à l'échelle plus restreinte des activités humaines qui font notre quotidien. La biologie de **la conservation s'attache ainsi à intégrer l'ensemble des éléments écologiques, économiques et sociologiques qui contrôlent l'évolution de la biodiversité.**

Les stratégies et outils développés aujourd'hui pour répondre aux enjeux du maintien de la biodiversité sont le résultat de l'évolution conjointe des idées et des connaissances scientifiques qui ont touché d'abord à la protection de la nature, puis à la conservation de la nature et à la biologie de la conservation.

Si le concept de «protection de la nature» date au moins du XIXe siècle, pour la France, les premiers pas significatifs datent du début du XXe. Jusqu'au début des années soixante-dix, conserver la nature revenait essentiellement à créer des parcs et des réserves pour préserver des morceaux de nature, des éléments ponctuels du paysage (**loi de 1930 relative à la protection des monuments naturels et des sites**), des communautés ou des espèces «phares». Cette démarche très naturaliste (l'Homme agresseur) va évoluer sous l'influence conjointe de la prise en compte de l'espace dans son ensemble, des relations Homme-Nature et des avancées de l'écologie (Lefeuvre, 1990 ; Barnaud, 1995).

La protection des espèces ne peut se concevoir sans celle de leurs habitats dont le maintien dépend du fonctionnement des systèmes écologiques de niveaux supérieurs (communautés, écosystèmes\*, paysages). Et pourtant, cette approche «espèce» et maintenant «population\*» a joué un rôle capital dans la cristallisation de la biologie de la conservation (Barnaud, 1998). Les règlements nationaux et internationaux ont ainsi d'abord pris pour cible certaines espèces bien identifiées, notamment pour leur rôle d'auxiliaires pour l'agriculture (**Convention sur les oiseaux utiles à l'agriculture, 1902**, complétée par la **Convention internationale pour la conservation des oiseaux, 1950**) ou pour leur intérêt cynégétique. L'autre étape a été la constitution de réserves sanctuaires aux objectifs bien précis. On se rappellera notamment de la réserve naturelle des Sept-Iles créée dès 1913 pour protéger les macareux moines.

Avec le lancement du programme MAB (Man And Biosphere) de l'UNESCO en 1971, la Convention du patrimoine mondial adoptée en 1972, l'utilisation de listes d'espèces ou de biotopes\* comme critères pour établir les priorités d'action ou de sélection de sites s'est alors généralisée : ce sont les annexes des **conventions de Bonn (1979) et de Berne (1979)**, ratifiées par la France en 1990, des **directives européennes concernant la conservation des oiseaux sauvages (1979), la conservation des habitats ainsi que la flore et la faune sauvages (1992)**.

En France, c'est la **loi relative à la protection de la nature (1976)** qui marque le tournant. Elle stipule dans son article premier : «La protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques auxquels ils participent et la protection des ressources naturelles contre toutes les causes de dégradation qui les menacent sont d'intérêt général». Les premières listes d'espèces protégées, publiées dès 1979, permettent la mise en place des arrêtés préfectoraux de protection de biotopes décidés par les préfets.

Au cours des années 1980, une démarche plus écologique de la conservation de la nature, prenant en compte les activités humaines et leurs conséquences sur la structuration et l'évolution des paysages, s'est développée (Lefeuvre & Barnaud, 1988). Le véritable changement dans la manière de procéder est venu de la prise de conscience des limites de la stratégie consistant à isoler des espaces clos qui fonctionneraient de façon autonome, indépendamment du reste du territoire. Elle s'est faite sous l'influence d'avancées théoriques simultanées dans le domaine de la biogéographie\* et de l'écologie du paysage, dans le cadre du développement des travaux sur les effets de la fragmentation des milieux, des propriétés des lisières, des corridors, des perturbations\*... On conçoit aujourd'hui que les systèmes écologiques sont fragmentés, hétérogènes, modelés ou créés par les activités humaines et interdépendants. Leur préservation sur le moyen terme oblige à prendre en compte les perturbations\* naturelles et surtout anthropiques\* permettant de comprendre leurs dynamiques, inerties et blocages. Il faut également raisonner à des échelles spatio-temporelles conformes à leur configuration en mosaïque. Cette approche écosystémique mettant l'accent sur les processus plutôt que sur les éléments et composantes (espèces, habitats) a également permis le développement d'un génie écologique (écologie de la restauration) dans le but de gérer et restaurer les écosystèmes\* à l'aide de techniques biologiques et d'interventions physiques. Ces progrès restent cependant plus théoriques que pratiques : la mise en oeuvre sur le terrain en est à ses balbutiements.

L'aboutissement actuel de cette évolution se traduit, sous l'impulsion de mesures incitatives émanant de l'Europe, par la volonté de conservation de sites ou de territoires tout en maintenant les activités économiques, sociales et récréatives qui y ont cours. On retiendra notamment la constitution et la conservation d'un réseau de sites «spéciaux», dit réseau «NATURA 2000»<sup>2</sup>, ou la mise en place de mesures agro-environnementales (les «contrats territoriaux d'exploitation» suivis des «contrats d'agriculture durable»).

<sup>2</sup> Le réseau NATURA 2000 a pour objectif de contribuer à préserver la diversité biologique sur le territoire de l'Union européenne. Il assurera le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des habitats naturels et des habitats d'espèces de la flore et de la faune sauvages d'intérêt communautaire. Il est composé de sites désignés spécialement par chacun des Etats membres en application des directives européennes dites «Oiseaux» et «Habitats» de 1979 et 1992.



Les conditions nécessaires à la réalisation d'une véritable politique de biologie de la conservation, qui permettrait de faire face à l'effondrement généralisé et accéléré de la biodiversité, ne sont pourtant pas suffisamment souvent réunies. Les «traditionnels» conflits d'usages et d'intérêts, la difficulté du transfert des avancées théoriques vers des applications pratiques, le manque d'intégration de cette dimension systémiste par les naturalistes, l'inadéquation entre le moyen ou long terme inhérent à tout programme de conservation et la durée des mandats électoraux... ne fournissent généralement pas, que ce soit à un niveau local ou régional, les bases nécessaires à l'installation d'une réflexion sereine autour des questions de conservation.

### 1.1.2 L'évolution de la diversité biologique

Quelle est la mesure de la biodiversité spécifique en France ? Pour l'ensemble des groupes biologiques, la proportion des espèces uniquement présentes en Europe, et notamment en zone méditerranéenne, est très élevée : 75% des amphibiens et 58% des poissons recensés en Europe y sont spécifiques. Au sein de ce territoire, la France a donc une responsabilité élevée dans la gestion de ce patrimoine. Recouvrant quatre des six grandes régions biogéographiques\* (continental, atlantique, alpin et méditerranéen), elle présente en Europe le plus grand nombre d'habitats et d'espèces. Mais une part non négligeable des espèces françaises est menacée du fait de la disparition des habitats, de l'envahissement par des espèces introduites ou de perturbations des relations proie/prédateur. Ainsi, 39% des mammifères, 28% des oiseaux, 33% des reptiles et amphibiens, 10% des plantes vasculaires de France sont menacés (Tableau 4).

**Tableau 4** Richesse floristique et faunistique en Europe et en France métropolitaine (AEE, 1999 ; Barnaud, 1998)

|                             | Diversité spécifique actuelle |        |        | Espèces présentes uniquement en Europe |                                                | Espèces éteintes en France | Espèces menacées en France                |
|-----------------------------|-------------------------------|--------|--------|----------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
|                             | Monde                         | Europe | France | Nombre                                 | Proportion par rapport aux espèces européennes |                            |                                           |
| <b>Mammifères</b>           | 4 300                         | 270    | 119    | 78                                     | 29%                                            | 3                          | 46 dont 9 en danger, 15 vulnérables       |
| <b>Oiseaux</b>              | 9 600                         | 514    | 281    | 30                                     | 6%                                             | 2                          | 78 dont 22 en danger, 29 vulnérables      |
| <b>Reptiles</b>             | 6 500                         | 198    | 36     | 90                                     | 45%                                            | 1                          | 12 dont 2 en danger, 4 vulnérables        |
| <b>Amphibiens</b>           | 4 000                         | 75     | 37     | 56                                     | 75%                                            | 0                          | 18 dont 3 en danger, 8 très vulnérables   |
| <b>Poissons d'eau douce</b> | 8 400                         | 334    | 73     | 200                                    | 58%                                            | 2                          | 24 dont 2 en danger, 16 vulnérables       |
| <b>Papillons</b>            | 30 000                        | 575    | -      | 189                                    | 33%                                            | ?                          | 18 Lépidoptères, 52 Coléoptères en danger |
| <b>Insectes</b>             | -                             | -      | 34600  | -                                      | -                                              | ?                          |                                           |
| <b>Mollusques</b>           | -                             | -      | 1400   | -                                      | -                                              | ?                          |                                           |
| <b>Plantes vasculaires</b>  | 260 000                       | 12 500 | 4800   | 3 500                                  | 28%                                            | 34                         | 461 espèces ou sous-espèces en danger     |

La contribution des carrières à la biodiversité paraît évidente aux yeux des naturalistes contactés. Cela se traduit par les nombreux classements en zone d'intérêt écologique (ZNIEFF, Natura 2000...) des sites de carrières (près de 120 recensés sur la France) en raison de la présence d'espèces rares. Cette contribution reste néanmoins difficile à quantifier réellement du fait de l'identification délicate des carrières dans les fiches ZNIEFF consultées.

Dès que diminue la pression des activités humaines sur un site de carrière, celui-ci est spontanément colonisé par des espèces végétales et animales. L'environnement de la carrière, comme source de colonisateurs, joue un rôle fondamental. Des caractères physico-chimiques du site dépend sa capacité d'accueil. En générant de multiples habitats, ils peuvent permettre l'expression d'une grande biodiversité.

## 1.2 NOTIONS D'ÉCOLOGIE FONDAMENTALE ADAPTÉES AUX CARRIÈRES

Pour décrire la composante écologique d'une carrière, il paraît nécessaire de rappeler quelques notions fondamentales d'écologie qui s'y appliquent.

N'importe quelle espèce ne se trouve pas n'importe où. Chaque espèce animale ou végétale présente une répartition territoriale donnée, dite « **aire de répartition** », dépendant des conditions du milieu, plus ou moins favorable pour celle-ci. Une **aire disjointe** ou une **limite** de répartition pour une espèce mérite attention : d'elle peut dépendre l'**expansion** ou la **régression** de l'espèce en question.

Pour certains oiseaux, insectes et mammifères, une carrière de petite taille ne constitue qu'un fragment de leur territoire, qu'une étape de leur cycle de vie. Ainsi, la carrière est reliée à son environnement par des liens fonctionnels. L'**unité écologique** à considérer est « la carrière + son environnement ».

L'**expansion** d'une espèce et la colonisation de nouveaux sites sont assurées par déplacement de l'animal ou par dissémination de graines pour les végétaux. Des sources telles qu'îlots boisés, délaissés... favorisent la colonisation naturelle des espaces « vides ». Les corridors tels que fossés, haies, bordures herbeuses des chemins peuvent aussi assurer un lien entre la carrière et son environnement. La végétation s'étend de place en place, par tache, de façon centrifuge, au gré des modes de reproduction ou de multiplication des espèces en cause (dissémination des semences par le vent, émergence de stolons...) ou des transports assurés par des vecteurs tels que l'Homme.

Les essences locales et **indigènes** sont, par définition, adaptées au milieu dans lequel s'inscrit la carrière. Autant les utiliser si la nécessité d'un reverdissement rapide du site (impact paysager) amène à planter. Le sol en place constitue une véritable **banque de semences** d'espèces favorables. La terre végétale présente avant exploitation peut ainsi avantageusement être utilisée : manipulée et stockée avec précaution, elle peut même être mise en germination chez les horticulteurs pour un aménagement futur (Allion, 1993 ; Bouffort, 1996).

## 1.3 TRAJECTOIRE ÉCOLOGIQUE D'UNE CARRIÈRE

Dès qu'une roche nue est laissée à son propre sort, on constate en général une évolution dans le temps : **des espèces pionnières\*** colonisent les surfaces minérales puis la composition floristique change, la structure se complique souvent en relation avec les processus de pédogénèse (apparition de plusieurs strates de végétation...), etc. Ce processus est habituellement appelé **succession\***. Il a essentiellement été décrit à partir de l'étude de la végétation, mais certaines de ses modalités peuvent partiellement s'appliquer à la faune.

La notion de «succession\*» au sens de Clements (1916), ainsi que ses corollaires, le «climax\*» et les associations végétales agissant comme «super-organismes», sont à ce jour considérés comme trop simplistes, linéaires et déterministes (Le Floch & Aronson, 1995). Ces auteurs suggèrent qu'il est préférable aujourd'hui d'interpréter tout système écologique comme un système dynamique, complexe et parfois chaotique. **Le concept général de trajectoire d'un écosystème\* recouvre à la fois la succession\* «naturelle» d'un écosystème\* et tous les autres itinéraires que peut suivre cet écosystème\* sous les diverses pressions qui lui sont applicables.** Le terme de «trajectoire» paraît alors préférable, la possibilité de parvenir à un état parfaitement stable et ne nécessitant plus aucune gestion déterministe semblant illusoire, mais également peu souhaitable, quoique la gestion soit inutile quand l'écosystème fonctionne de manière autonome. Les successions\* se déroulant dans les carrières de roches massives semblent, comme nous le verrons plus loin, illustrer cette complexité. Néanmoins le terme de succession\* reste très répandu dans la littérature et, afin d'éviter de dénaturer les propos des auteurs en faisant usage, nous l'employons ici en accord avec les textes originaux.

### 1.3.1 Le concept de trajectoire écologique

Les travaux portant sur les mécanismes et les modèles de successions\* ou trajectoires donnent encore lieu à une littérature abondante (e.g. Wali, 1999, Young et al., 2001) et nous ne tenterons pas ici d'en proposer une synthèse. Nous rapportons seulement quelques éléments à même de mieux éclairer notre approche de l'écologie des carrières.

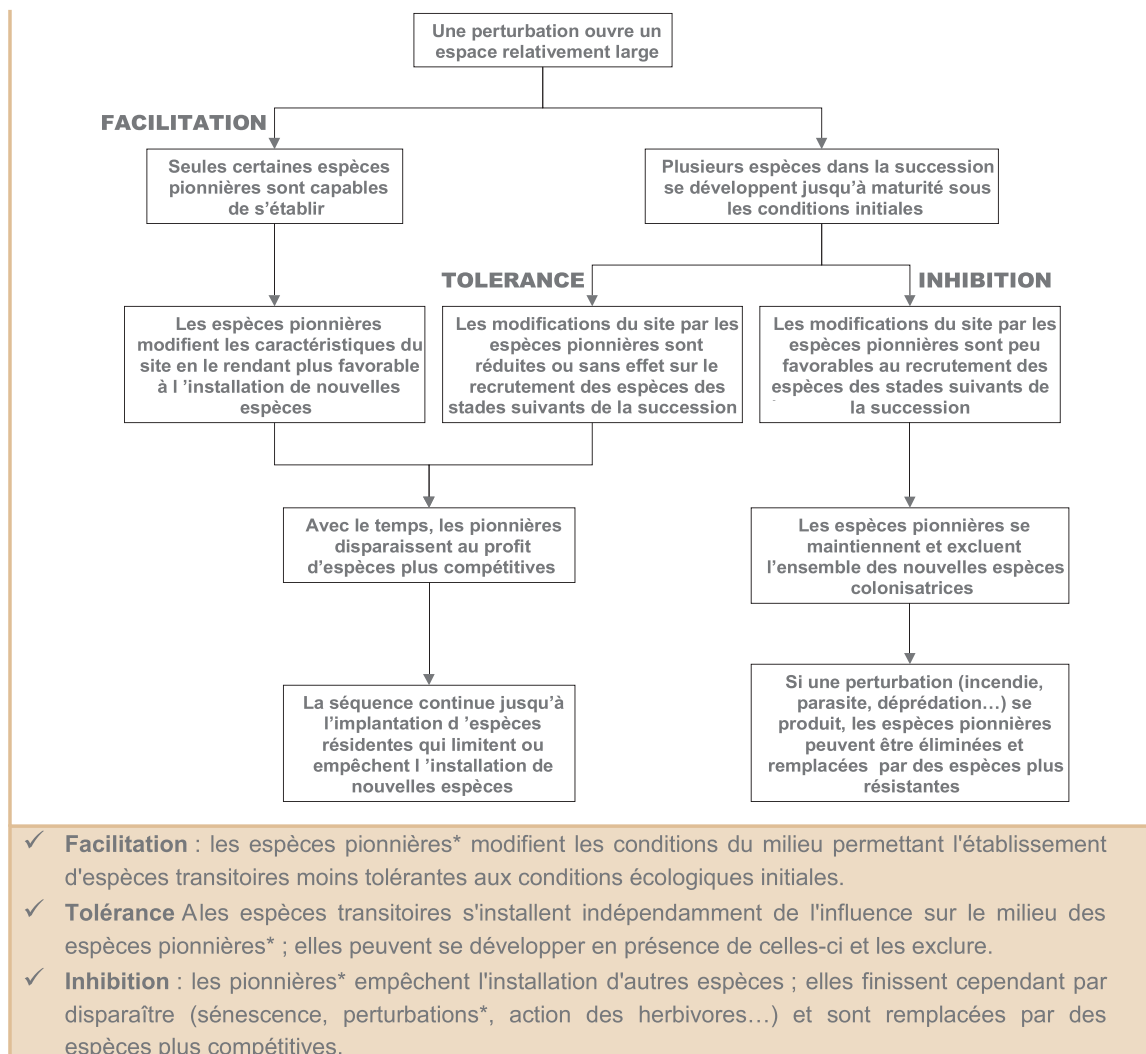
Bradshaw (2000) identifie une série d'étapes dans le déroulement des successions\* se développant dans les sites dégradés. Il les classe en deux groupes interagissant fortement : celles d'origine biologique et celles d'ordre principalement physique (Tableau 5). Les processus biologiques débutent avec la colonisation des plantes et leur implantation, ce qui permet le développement d'un sol biologiquement actif et de sa faune associée. Cette dynamique est assistée par les changements physiques, principalement en raison d'une dégradation des substrats\* minéraux et du relargage de nutriments pour aboutir à la formation de sols.

| <b>Tableau 5</b> Processus se développant au cours des successions* primaires sur site dégradé<br>Une période de temps sur laquelle ils se réalisent est proposée (d'après Bradshaw, 1997, in Bradshaw 2000). |                                                                                              |                     |                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Processus biologiques                                                                                                                                                                                         |                                                                                              | Processus physiques |                                                                                  |
| Temps (année)                                                                                                                                                                                                 | Processus                                                                                    | Temps (année)       | Processus                                                                        |
| 1-50                                                                                                                                                                                                          | 1. Immigration des espèces végétales appropriées                                             | 1-100               | 1. Fragmentation des surfaces compactes par le gel ou des périodes de sécheresse |
| 1-50                                                                                                                                                                                                          | 2. Implantation des espèces appropriées                                                      | 1-1000              | 2. Accumulation de matériel fin par altération des roches                        |
| 1-10                                                                                                                                                                                                          | 3. Stabilisation et accumulation de matériel minéral fin en surface par les végétaux         | 1-1000              | 3. Décomposition des minéraux du sol                                             |
| 1-100                                                                                                                                                                                                         | 4. Accumulation de nutriments par les végétaux à partir des minéraux du sol                  | 1-100               | 4. Augmentation de la capacité de rétention en eau du sol                        |
| 1-100                                                                                                                                                                                                         | 5. Accumulation d'azote d'origine atmosphérique par fixation par des végétaux                | 1-1000              | 5. Relargage de nutriments par les minéraux du sol                               |
| 1-20                                                                                                                                                                                                          | 6. Immigration de la flore et de la faune du sol grâce à l'accumulation de matière organique | 10-10000            | 6. Lixiviations des matériaux mobiles                                            |
| 1-20                                                                                                                                                                                                          | 7. Modification des propriétés du sol sous l'action des végétaux, des organismes du sol      | 100-10000           | 7. Formation d'horizons distincts au niveau du profil des sols                   |
| 10-1000                                                                                                                                                                                                       | Réduction de la toxicité (acidité...) par accumulation de matière organique et lessivage     |                     |                                                                                  |

Plusieurs modèles de successions\* ont été proposés, mais ceux de Connell & Slatyer (1977) semblent être reconnus, malgré leurs imperfections, comme les plus convaincants (Lepart & Escarre, 1983 ; Harris et al., 1996). Ces auteurs proposent trois modèles (facilitation, tolérance et inhibition) orientés vers l'analyse du rôle de la compétition dans les changements de la composition spécifique. La façon dont opèrent ces modèles, à l'occasion de la mise à nu d'un espace, est illustrée par la Figure 5.

**Figure 5**

Illustration des mécanismes se déroulant lors de la mise en place des successions\* (d'après Connell & Slatyer (1977), in Harris et al. (1996))

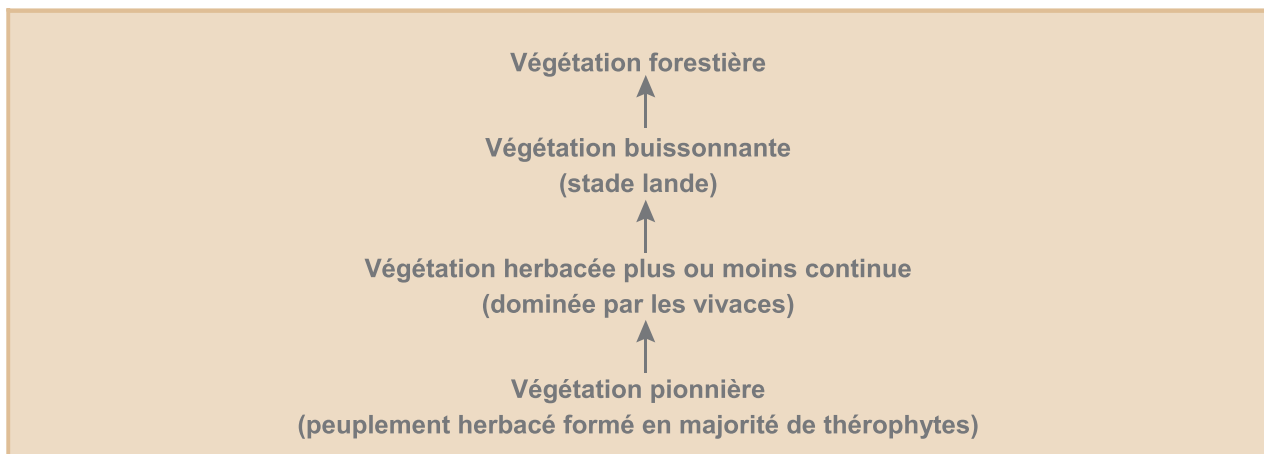




Selon Boulet (1996), ces processus généraux se traduisent par l'évolution la plus courante (décrite), avec comme idée sous-jacente que les végétaux pionniers\* permettent l'arrivée d'autres espèces moins spécialisées (Petit, 1980). Ensuite apparaissent les phénomènes de compétition pour l'espace (par la réduction des aires de germination) et la mise en place d'une strate dominante et d'une strate dominée. Des contraintes nouvelles s'instaurent quant à l'absorption des éléments biogènes, de l'eau et pour la réception de l'énergie lumineuse.

**Figure 6**

Modèle d'une succession végétale simplifiée.  
D'après Boulet (1996)



Le point de départ de la succession écologique est donné par une perturbation\* initiale, qui a détruit partiellement ou totalement l'écosystème précédent. On distingue la **succession\* primaire**, apparaissant sur un terrain neuf dénué de tout organisme vivant, de la **succession\* secondaire**, se développant sur un terrain végétalisé dégradé, mais renfermant des organismes vivants, au moins sous forme de propagules\*. Grâce à celles-ci, l'état mature est plus rapidement atteint dans la succession\* secondaire que dans la succession\* primaire. En carrière de roches massives, la succession\* primaire telle que définie précédemment prévaut sur toutes les zones où la roche est mise à nu. À l'inverse, au niveau des surfaces régénées de terre végétale, des successions\* secondaires peuvent être distinguées dans la mesure où ces terres utilisées renferment a priori les semences, rhizomes ou bulbes contenus dans les couches superficielles des sols décapés antérieurement.

À l'arrêt de la perturbation\*, les mécanismes de la succession\* écologique se mettent en place sur le sol nu. Une évolution se produit selon un schéma classique décrit par divers auteurs (Blondel, 1976 ; Bournérias, in Donadieu & Rumelhart, 1983 ; Chambaud, 1993...). Plusieurs étapes se succèdent (Figure 7) dans l'hypothèse où le carreau est laissé nu volontairement :

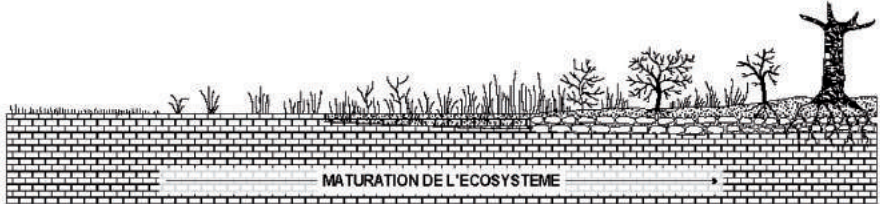
- ▶ un stade pionnier\* à lichens et mousses, végétation discrète se développant sur la roche de façon discontinue ;
- ▶ une pelouse\* pionnière discontinue à annuelles, rase ;
- ▶ une pelouse\* (parfois friche) post-pionnière : la végétation se ferme peu à peu pour former un tapis herbacé continu et dense, où prédominent des bisannuelles puis des vivaces ;
- ▶ la végétation ligneuse jusque là discrète devient de plus en plus fournie, d'abord sous forme de fourrés arbustifs puis de petits bosquets ;
- ▶ la dernière étape de la succession\* aboutit le plus souvent sous notre climat tempéré à des boisements denses.

Au terme de nombreuses années, échelle du siècle le plus souvent, cette succession\* théorique tend donc vers un état d'équilibre boisé décrit par les spécialistes comme le « climax\* », hypothèse aujourd'hui contestée par beaucoup d'entre eux (Lecomte *et al.*, 1995).

Les premiers stades de la succession\*, ou stades pionniers\*, observés dans les carrières sèches (Donadieu & Rumelhart 1983 ; Sauveterre 1985) sont déterminés par des groupements d'espèces annuelles. Ces stades sont éphémères. Les espèces qui les composent sont des vagabondes, caractérisées par :

- leur potentiel de croissance élevé (taille réduite) ;
- leur aptitude à se multiplier rapidement (dormance peu marquée, petites graines nombreuses) ;
- leur capacité de dispersion (dissémination par le vent) (Blondel, 1976).

**Figure 7** Dynamique écologique d'une carrière calcaire en cours de « renaturation »  
(Source partielle : Chambaud, 1993)

| Temps                      | 0                                                                                    |                                                                                                   |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                 | 50 à 100 ans                              |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Stades                     | PIONNIER                                                                             | POST-PIONNIER                                                                                     |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                 | CLIMACIQUE                                |
| Substrat                   | Minéral                                                                              | Organo-minéral                                                                                    |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                 |                                           |
| Sol                        | Absent                                                                               | Apport de matière organique et d'azote, structuration du sol... 30 cm d'épaisseur                 |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                 |                                           |
| Strates végétales          | rase                                                                                 | herbacée                                                                                          | + arbustive                                                                                                                                       |                                                                                                                                                 | + arborée                                 |
| Formations végétales       | Lichens mousses                                                                      | Pelouse* ouverte-fermée                                                                           | Pelouse* haute<br>Fruticée ouverte-fermée                                                                                                         |                                                                                                                                                 | Taillis, futaie                           |
| Espèces fréquentes         |                                                                                      | Catapode rigide<br>Céraiste nain<br>Luzerne lupuline<br>Pâturin bulbeux<br>Erodium<br>Vergerettes | Brome érigé<br>Brachypode penné<br>Dactyle aggloméré<br>Calamagrostis<br>Coronille<br>Sarriette<br>Origan<br>Ophrys<br>Hélianthème<br>Pimprenelle | Cornouiller sanguin<br>Eglantiers<br>Saulx marsault<br>Cerisier Ste-Lucie<br>Aubépine monogyne<br>Prunellier<br>Troène<br>Camérisier<br>Tremble | Frêne<br>Hêtre<br>Chêne<br>Pin<br>Bouleau |
| Représentation schématique |  |                                                                                                   |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                 |                                           |

Elles s'implantent de façon imprévisible (Chapin III, 1993). Ces espèces pionnières relèvent d'une stratégie démographique de « type r » (quantité), par opposition à la stratégie de « type K » (qualité) des populations\* plus durables et stables des derniers stades de la succession\* (Blondel, 1976).

L'application de ces modèles **aux espaces modifiés** n'est pas facile, certaines successions\* suivant les schémas classiques, d'autres non (Harris *et al.*, 1996), comme cela a été montré dans le cas de terroirs\* miniers du nord de la France (Petit, 1980), des carrières du Limousin (Frain, 1991) et de celles de Basse-Normandie (Boulet, 1996).

### 1.3.2 Une colonisation rapide

A l'arrêt de l'exploitation, la carrière est un **site essentiellement minéral** : carreau dénudé, front de taille, éboulis et pierriers paraissent stériles. Le plus souvent, il y a peu de trace d'humidité. Lessivé par les pluies, exposé au soleil et à des températures extrêmes, le site présente **des conditions de vie particulièrement difficiles**.

En l'espace d'une année, les lieux sont néanmoins colonisés par une flore, certes discrète mais présente, de lichens, mousses, herbacées pionnières. Celles-ci s'adaptent à un site hostile, s'y développent et le rendent plus accueillant à d'autres espèces. **Ces pionniers\*** (ex : Catapode rigide, Liondent, Oseille ronde...) **sont souvent des espèces rares, peu présentes ailleurs où elles ne trouvent pas de milieux neufs**. Par leur présence, elles modifient le milieu : leurs racines et rosettes de feuilles retiennent les poussières et l'humidité, leur pivot stabilise les éboulis. Elles sont moins exigeantes que celles répandues aux alentours, originales car adaptées à ces conditions de vie difficiles. Elles sont sensibles à la concurrence d'autres végétaux auxquels elles préparent le terrain.

Les espèces colonisatrices de la carrière sont celles qui sont les plus présentes dans les environs. Elles sont dans leur majorité peu exigeantes et possèdent un large spectre écologique (Sionneau, 1993). Elles peuvent se classer en deux catégories selon leur pouvoir de dissémination :

- les espèces à fort pouvoir , capables de dissémination sur de longues distances comme les papillons, les libellules, les oiseaux, les plantes anémochores\*. Ces espèces proviennent aussi bien des abords immédiats de la carrière que d'un environnement très éloigné ;
- les espèces à faible pouvoir comme la plupart des invertébrés non ailés (cloportes, mollusques...), mais également les reptiles ou les batraciens et de nombreux végétaux, notamment un grand nombre ligneux. Pour ces espèces, la proximité de la carrière est un atout important. Mais il est parfois surprenant de constater leur présence dans des sites isolés et apparemment éloignés de tout milieu source. C'est par exemple le cas de certains amphibiens (Crapaud accoucheur et calamite, Triton alpestre, Pélodyte ponctué) capables de coloniser en quelques années, voire quelques semaines, des mares oligotrophes\* peu ou pas végétalisées de carrières isolées dans des plaines agricoles ou au cœur d'un massif de garrigue dépourvu de toute trace d'eau.

### 1.3.3 Les facteurs de colonisation

#### 1.3.3.1 Les facteurs régissant les successions écologiques observées

L'implantation de la flore et de la faune dans les sites modifiés se fait d'abord par une phase de colonisation-immigration, par des espèces pionnières\*.

L'établissement d'une espèce végétale ou animale dans une carrière après exploitation est fonction de nombreux facteurs, tels que les conditions édaphiques\*, la configuration de la carrière, les capacités de dissémination des espèces, son contexte environnemental, mais également du hasard qui détermine l'implantation des premières espèces végétales (Brunaud, 1997a). L'ensemble de ces facteurs a d'importantes répercussions sur la colonisation des carrières durant leur phase d'exploitation et après leur désaffectation.

#### 1.3.3.2 Les modalités de dissémination

Que ce soit pour les végétaux ou pour les animaux, l'implantation d'une espèce dans une carrière nécessite qu'un individu, un oeuf, une graine, une spore, un rhizome... arrive jusqu'à l'emplacement à coloniser.

**Les végétaux** ont mis en oeuvre de nombreuses stratégies pour coloniser de nouveaux espaces. Ils peuvent se multiplier de façon végétative par stolons, bulbes, marcottes... à partir d'une plante mère ou bien se reproduire sexuellement.

La stratégie de dissémination par reproduction sexuée se décline suivant plusieurs modalités (Tableau 6) :

- en dehors des semences déjà en place, l'anémochorie\* constitue la principale source de colonisation d'un milieu neuf (Wiegleb & Felinks, 2001 ; Lepart & Escarre, 1983) ;
- la zoochorie\* (en particulier l'ornithochorie) est ensuite le mode de dissémination le plus important pour les espèces des stades avancés de la succession\* (Lepart & Escarre, 1983).

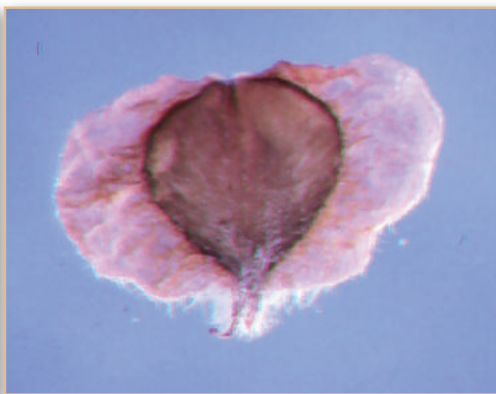
Frain (1991) et Boulet (1996) confirment l'application de ces considérations générales au cas des carrières : «C'est l'anémochorie .../... qui est la mieux représentée .../...et plus particulièrement les espèces munies d'expansions telles que l'aigrette ou les soies» (Boulet, 1996). C'est le cas notamment des fruits de la Vergerette du Canada (*Conyza canadensis*), légers et munis d'un pappus qui favorise leur transport par le vent, et des graines du Saule roux, légères et munies de plumes de soies, des fruits du Bouleau pubescent (Figure 8)...

| <b>Tableau 6</b> Classification des principaux modes de dissémination<br>(Lepart & Escarre, 1983)              |                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ANÉMOCHORIE – Diaspores (graines, spores) disséminées par le vent.</b>                                      |                                                                                                                                                                          |
| PLANEURS                                                                                                       | - Diaspores présentant des dispositifs leur permettant de planer longtemps dans l'air (aigrettes, plumes, poches à air) et/ou diaspores de faible poids.                 |
| ROULEURS                                                                                                       | - Diaspores roulées à la surface du sol.                                                                                                                                 |
| TIGE PROJETANTE                                                                                                | - Le vent assure la dissémination des diaspores en secouant les pédoncules ou les rameaux supportant les organes qui les renferment                                      |
| <b>ZOOCHORIE – Diaspores disséminées par les animaux.</b>                                                      |                                                                                                                                                                          |
| ÉPIZOOCHORIE                                                                                                   | - Diaspores disséminées accrochées sur le corps des animaux.                                                                                                             |
| ENDOZOOCHORIE                                                                                                  | - Diaspores avalées par les animaux. Les graines sont rejetées avec les excréments.                                                                                      |
| MYRMÉCOCHORIE                                                                                                  | - Diaspores présentant une partie extérieure qui contient des huiles (élaïosome). Les fourmis consomment cette partie et rejettent la graine normalement non comestible. |
| DYSZOOCHORIE                                                                                                   | - Diaspores récoltées et emmagasinées par les animaux pour les consommer ultérieurement. Certaines d'entre elles ne sont pas retrouvées et peuvent germer.               |
| <b>AUTOCHORIE – Diaspores disséminées par la plante elle-même.</b>                                             |                                                                                                                                                                          |
| <b>HYDROCHORIE – Diaspores disséminées par l'eau.</b>                                                          |                                                                                                                                                                          |
| <b>BAROCHORIE – Diaspores sans adaptation apparente. À maturité elles se détachent et tombent par gravité.</b> |                                                                                                                                                                          |

Il est bien évident que sans les micro-organismes du sol (champignons, bactéries...) il n'y a pas de transformation de la matière organique et de mise en place des cycles de nutriments (cycle de l'azote...). Selon Bradshaw (2000), ces organismes sont très mobiles et développent rapidement des populations\* importantes une fois que les substrats\* correspondants sont disponibles. La limitation de leur développement est vraisemblablement plus souvent liée à des facteurs tels que l'acidité, plutôt qu'à un manque de substrats\* disponibles.



**Figure 8** Exemple d'anémochorie, les fruits du Bouleau pubescent (*Betula pubescens*)



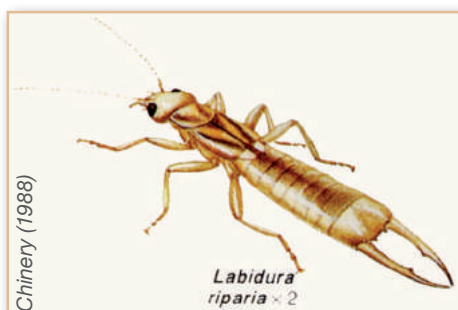
■ Les infrutescences du Bouleau pubescent (*Betula pubescens*) sont de petits cônes allongés groupant des écailles minces à 3 lobes qui portent chacune 3 petits fruits (ou samares) bordés d'une aile membraneuse et dispersés par le vent.

**Les animaux** colonisent les carrières par transport passif (aérien, autres animaux...) ou par déplacement actif (vol, marche...). Frochot et al. (2000) ont pu montrer, dans certaines carrières de roches massives calcaires, **le transport via les engins de chantier** de nids maçonnés d'hyménoptères établis dans les structures métalliques ou dans les orifices et déplacés de chantier en chantier ; ailleurs c'est l'apport de sable contenant les nymphes d'insectes sabulicoles\* qui assure la colonisation.

Comme pour les végétaux, certaines espèces d'arthropodes (mollusques, crustacés, araignées, insectes...) restent en place pendant la phase d'exploitation (ou arrivent pendant, voir plus haut) sous forme d'oeufs, de larves ou d'adultes dans et sur les sols remaniés (Topp et al., 2001). Cette fraction de colonisateurs peut jouer un rôle important dans l'orientation des trajectoires des carrières. La carrière joue le rôle de point de départ pour les populations\*, contrairement à la plupart des cas où c'est le milieu environnant qui autorise la colonisation... (Frochot et al., 2000).

Selon Blondel (1976), les espèces les plus aptes à se disperser rapidement et activement sont les premières à coloniser un site. Si cette règle s'applique sous certaines conditions, elle ne semble pourtant pas pouvoir être généralisée. Les travaux de Dunger (1989) sur la colonisation par la faune du sol de 40 terrils\* miniers d'Allemagne montrent en effet que, lors du premier stade pionnier\* caractérisé par des conditions d'extrême sécheresse et d'absence de matière organique, seuls des animaux volants ou transportés par l'air (prédateurs et proies) sont présents (staphylins...). Les premières espèces qui réussissent à s'implanter de façon viable sont des collemboles et des espèces spécialisées de milieux secs (dunes...) telles que des dermaptères (perce-oreille, Figure 9 ). Le transport passif d'oeufs ou de juvéniles par des oiseaux, des mammifères ou l'homme est dans tous les cas privilégié.

**Figure 9** Exemple d'insecte pionnier



■ **Labidura riparia** est un grand perce-oreille qui vit habituellement sur les plages au bord de l'eau (mer et eau douce). Ses préférences pour les milieux secs en font un pionnier\* de la colonisation des terrils\* miniers.

Les propos de Blondel sont néanmoins confirmés par Picaud (1988) qui a étudié la colonisation d'anciens sites miniers du Limousin par les orthoptères. Les espèces les mieux adaptées au vol (ailes longues et muscles développés) et possédant de bonnes aptitudes au saut sont celles qui sont les plus aptes à coloniser un site (e.g. l'Oedipode turquoise -*Oedipoda caerulea*-...).

Par ailleurs, l'Homme et ses engins mécanisés ont été identifiés comme vecteurs potentiels lors de la colonisation des sites : fruits ou graines collés sous des semelles de chaussures ou apportés avec des matériaux de provenances diverses, escargots accrochés aux engins. De cette façon pourrait s'expliquer la présence en carrière de tel gastéropode ou plante, inconnu dans les environs de la carrière et aux distances de prospection limitées.

### 1.3.3.3 Le contexte environnemental de la carrière

L'environnement du site d'extraction (forêt, cultures...) influence fortement les milieux se développant en carrière, et notamment la phase de colonisation, par la présence de populations\* sources (Frochot et al., 2000 ; Wiegleb & Felinks, 2001). Les populations\* de plantes et d'animaux habitant les carrières sont très souvent en situation d'isolement géographique, surtout lorsque l'extraction a créé un site original par rapport à son environnement : carrières de roches massives éloignées de toute falaise naturelle (Frochot & Godreau, 1995). Il faut toutefois noter un cas particulier inhérent aux carrières de grande taille dont la phase d'extraction se déroule sur une longue période ; cette situation permet en effet à certaines parties de carrière, anciennement délaissées et déjà colonisées, de devenir des sources de colonisateurs potentiels à l'intérieur même du site (Wiegleb & Felinks, 2001).

Pour Boulet (1996), la végétation environnante est le facteur principal qui détermine la composition des groupements\* pionniers\* des carrières acides de Basse-Normandie. Il en résulte que d'assez nombreuses espèces végétales sont communes à l'ensemble des sites :

- ▶ **Les espèces ubiquistes** sont les plus banales et les plus abondantes puisqu'elles s'avèrent peu exigeantes quant aux conditions écologiques et disséminent d'innombrables semences. C'est le cas du Bouleau pubescent que l'on retrouve rapidement sur de nombreux carreaux\* de carrières acides dès les premiers stades de successions\*. Une fois en place, ces espèces disposeront d'un avantage supplémentaire en dispersant leurs semences directement dans la carrière.
- ▶ **Les espèces les plus spécialisées**, dont l'amplitude écologique est plus étroite et donc plus exigeante (la Canche précoce, *Aira praecox*, la Vulpie queue de rat, *Vulpia myuros*...), subissent la concurrence des précédentes. Il faut donc qu'elles arrivent suffisamment tôt et pour cela qu'elles appartiennent à la végétation environnante.
- ▶ Cependant la rigueur des conditions qui règnent sur certaines parties de carrières permet, avec le temps, à une fraction importante d'**espèces n'existant pas dans les faciès environnants** de s'implanter (Sauveterre, 1985).

Bradshaw (2000) souligne qu'il est crucial, mais trop souvent oublié, que pour qu'une espèce puisse coloniser un site, il est indispensable qu'elle existe encore à une distance pas trop importante. Dans certains paysages agricoles, ce n'est plus le cas et des espèces d'intérêt patrimonial pouvant se développer avec succès ont des semenciers trop éloignés pour avoir des chances de coloniser des sites propices. L'auteur illustre ce problème avec l'exemple d'une mine de charbon du Kent (Royaume-Uni) où un «magnifique» bois s'est développé mais dont les espèces qui le composent ne sont pas celles de la région (le Chêne pédonculé, *Quercus robur*, et le Chêne sessile, *Quercus petraea*) mais l'exotique Chêne chevelu (*Quercus cerris*), cultivé sur un terrain voisin

### 1.3.3.4 Les propriétés du substrat

Il n'est pas suffisant pour une espèce d'arriver sur un espace à coloniser, il faut encore qu'elle réussisse à s'établir (Ash et al. ; 1994, Chapin III, 1993).

L'arrivée de plantes potentiellement colonisatrices est souvent rapide. Ce processus doit même être antérieur à l'exploitation du site et par conséquent se dérouler pendant la phase d'extraction. Pourtant, même si une banque de graine peut se constituer, la plupart des graines meurent, ne trouvant pas les conditions nécessaires à leur germination puis à leur développement (texture du substrat\*, teneur en eau, taux de matière organique, topographie...) (Park, 1982). **Le facteur limitant l'implantation d'une espèce est le plus souvent l'absence d'un substrat\* favorable** (l'évolution des surfaces minérales aboutissant à l'accumulation de particules minérales fines est extrêmement lente) plutôt qu'un manque de semences (Bradshaw, 2000). Usher (1979) précise néanmoins que, l'altération des roches étant plus rapide pour les carrières calcaires, elles fournissent beaucoup plus rapidement des minéraux assimilables par les plantes que les carrières de roche acide comme le granite.

De plus, la mortalité des graines par action fongique, gel... et celle des plantules par dessiccation, prédation... et par dépôt de poussières (limitation de la photosynthèse), dans le cas des carrières en activité, atteint 50% au bout de 25 jours et peut atteindre 90% après 4 mois d'implantation (Park, 1982). Le même type d'observations est fait pour les animaux et plus particulièrement la faune du sol : durant le premier stade pionnier\*, beaucoup d'espèces tentent de s'implanter mais la plupart sont contrariées par les conditions microclimatiques drastiques (Dunger, 1989). C'est seulement lorsqu'une accumulation de litière est entamée que des vers de terre, des diptères, des arachnides, etc. apparaissent.

Par ailleurs, un certain nombre d'espèces d'amphibiens sont typiquement des pionnières\*, colonisatrices de mares oligotrophes\* peu ou pas végétalisées (Crapaud accoucheur, *Alytes obstetricans*, Crapaud calamite, *Bufo calamita*, Triton alpestre, *Triturus alpestris*) (Galan, 1997 ; Arnold & Burton, 1978).

Les espèces qui colonisent les carrières sont donc le plus souvent soit des **espèces déjà en place** sous forme de semences ou de fragments de végétaux, soit des espèces **capables de se disperser sur de longues distances**, soit des espèces **immédiatement présentes** à proximité du site d'extraction. Dans tous les cas, ce sont des espèces adaptées aux stades d'évolution des substrats\* en cours.

### 1.3.4 Les successions sur roches calcaires

Les successions sur roches massives s'accompagnent d'**évolutions pédologiques**.  
Elles varient avec la **nature des substrats**, les différents **faciès de la carrière**...

#### 1.3.4.1 Succession sur matériaux peu compacts (sables calcaires et craies)

Bournérias (in Donadieu & Rumelhart, 1983) a étudié les stades pionniers\* se mettant en place sur des sables calcaires, en terrain plat, dans le sud de la région parisienne (Figure 11). Ces stades pionniers\* mis en évidence sont caractéristiques des friches calcicoles\* sèches. La succession\* identifiée s'organise en deux phases. La première est une phase de recolonisation du substrat, où l'espace libre est occupé progressivement et les annuelles de plus en plus nombreuses. La seconde est une phase de sélection où la compétition entre espèces favorise les plus agressives, les annuelles commencent à régresser au profit des vivaces.

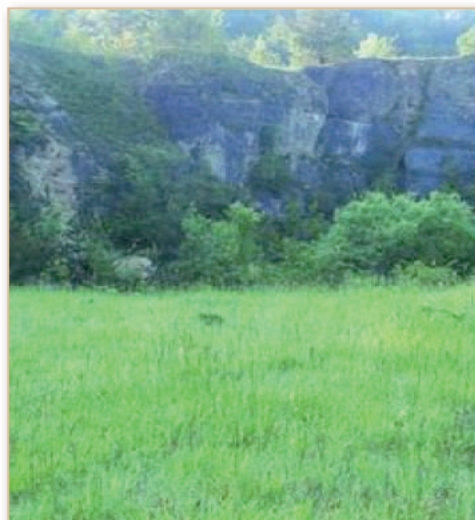


**Figure 10**

Quelques exemples de colonisation en carrière calcaire  
(photos ENCEM)



■ Végétation pionnière ouverte à *Sisymbre couché* sur calcaire marneux en place en Île-de-France.



■ Stade pelouse\* sèche sur calcaire massif d'une carrière lorraine (âge 20 ans). Au pied des fronts, apparition de fourrés sur un sol plus riche et plus épais lié à l'accumulation de rocaillles et de limons.



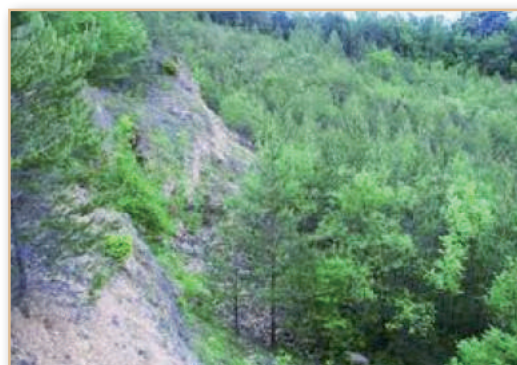
■ Stade pelouse\* à orchidées et apparition de fourrés sur remblais calcaires (âge inférieur à 20 ans). Environnement forestier avec pelouses\* calcicoles\* intra-forestières le long de certains chemins.



■ Garrigue herbacée issue pour partie d'ensemencements sur talus de stériles calcaires d'une carrière provençale (âge 10 ans).



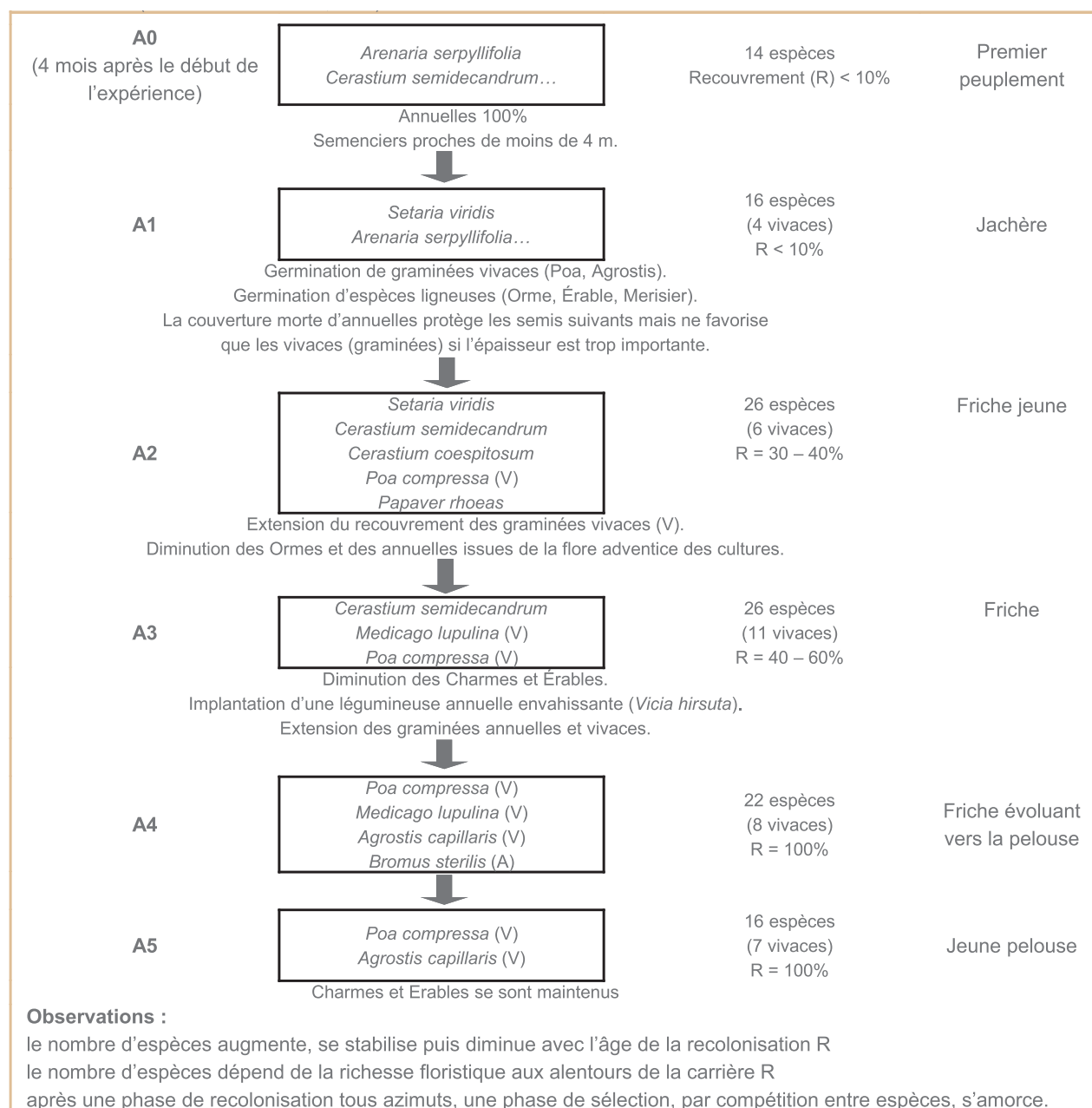
■ Carreau à friche calcicole\* riche en orchidées colonisé uniformément par des arbres pionniers\* (Bouleau et saule). Carrière lorraine située en contexte forestier, âgée de moins de 20 ans, sur substrat calcaire à bancs marneux.



■ Stade de fourré à Pin sylvestre remplaçant le stade pelouse\* sur verses calcaro-marneuses d'une carrière lorraine (âge environ 30 ans et environnement forestier).

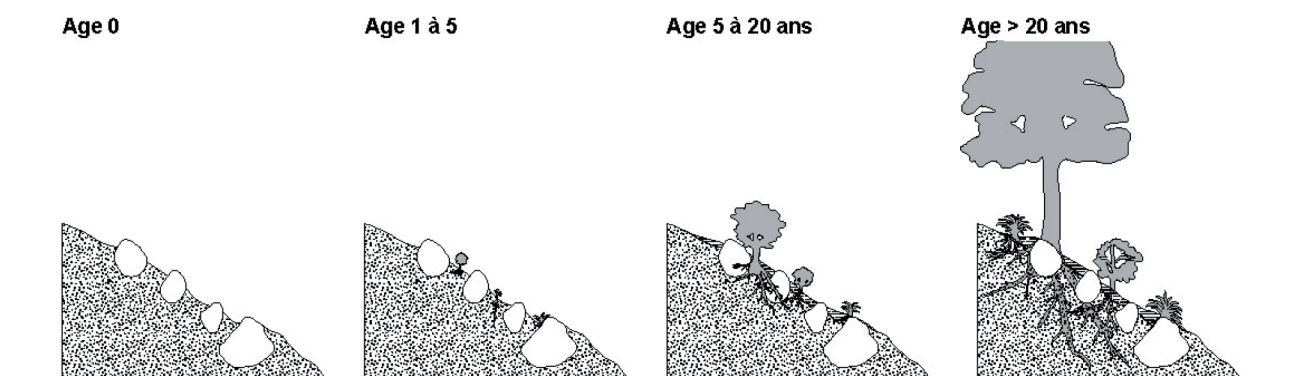


**Figure 11** Stades pionniers sur sables calcaires  
(Donadieu & Rumelhart, 1983)



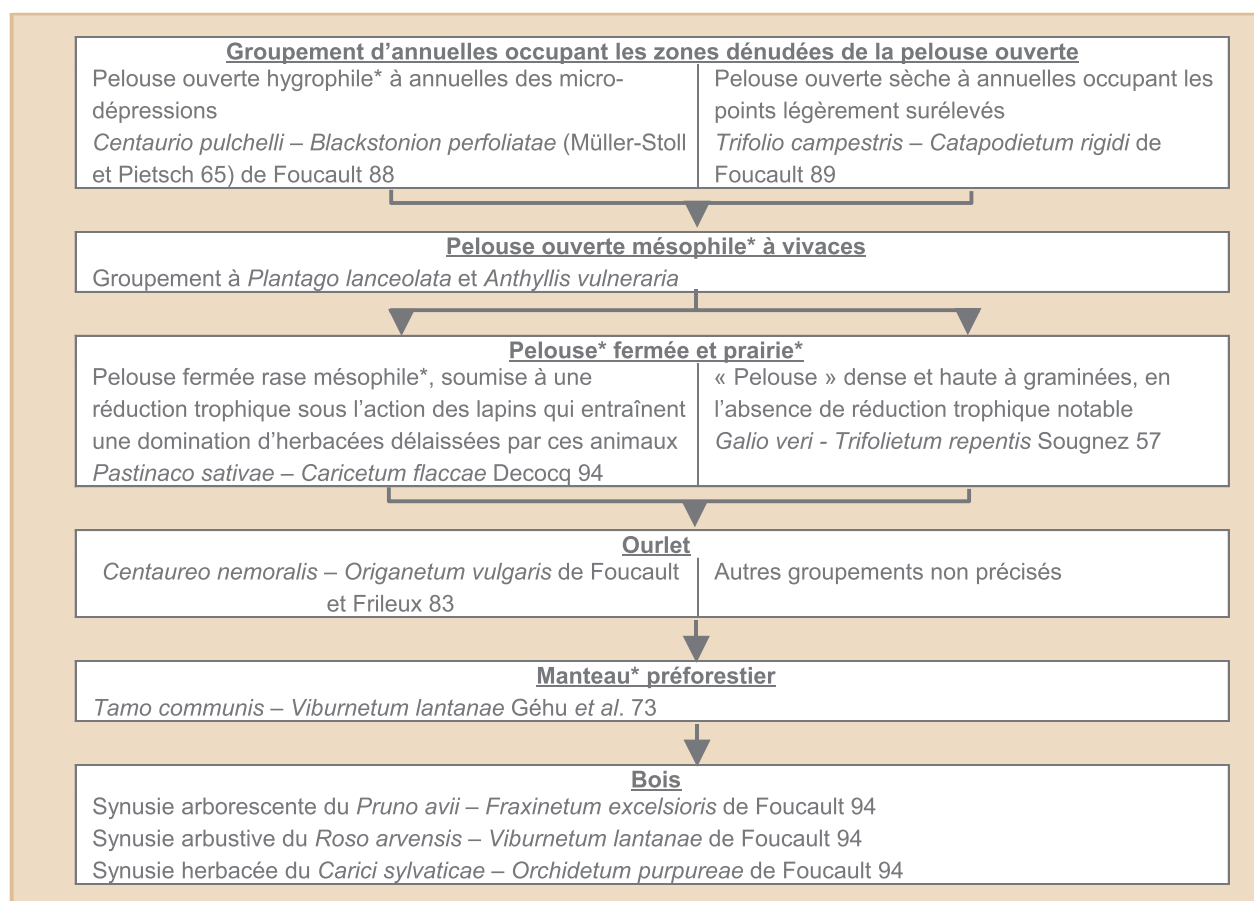
Cette évolution s'accompagne de la formation d'un sol par accumulation progressive de particules fines et d'organes végétaux en décomposition (Figure 12). Elle est plus lente que ne le laisse paraître la végétation, rejoignant les observations de Frain (1991) en Auvergne. Ainsi au stade préforestier, le sol n'est encore souvent qu'une rendzine brunifiée sur moins de 20 cm d'épaisseur.

**Figure 12** Formation d'un sol (Donadieu & Rumelhart, 1983)



Sur substrat crayeux des anciennes carrières de phosphate du nord de la France, les différents groupements identifiés par Decocq (1994) sur le fond de la carrière montrent une succession\* classique reprenant les étapes déjà décrites : pelouse\* à annuelles - pelouse\* à vivaces - ourlet - fourré - bois (Figure 13). Les groupements sont différents, mais Decocq note comme Bournérias la constance des plantes liées aux friches.

**Figure 13** Succession végétale observée en fond de carrière de craie du nord de la France  
Cas de la carrière de Faucozy, 02 (d'après les travaux de Decocq, 1994)



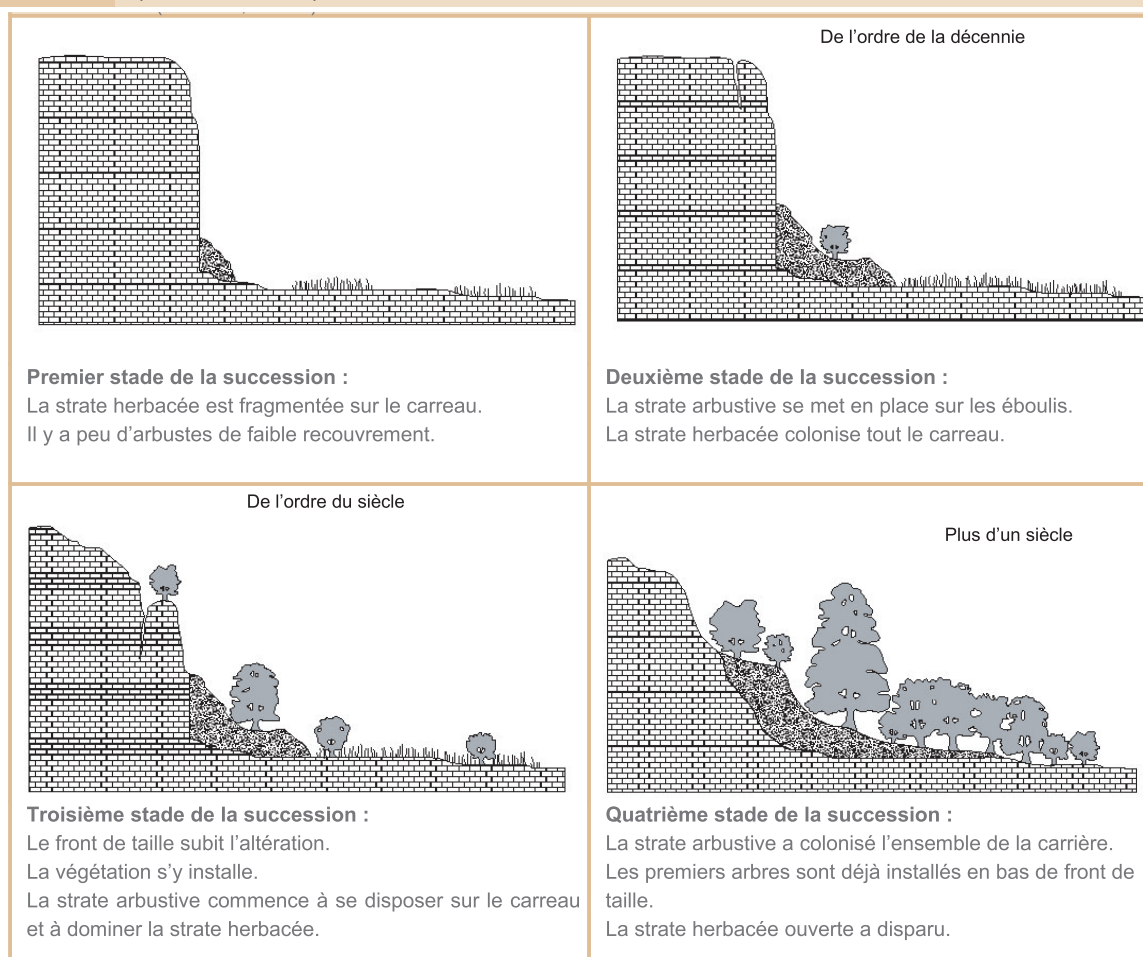
Sur substrat crayeux des anciennes carrières de phosphate du nord de la France, les différents groupements identifiés par Decocq (1994) sur le fond de la carrière montrent une succession\* classique reprenant les étapes déjà décrites : pelouse\* à annuelles - pelouse\* à vivaces - ourlet - fourré - bois (). Les groupements sont différents, mais Decocq note comme Bournérias la constance des plantes liées aux friches.

### 1.3.4.2 Succession sur calcaire compact

Dans les anciennes carrières de roches massives calcaires du nord-Dijonnais étudiées par Brunaud (1997a), les différents stades évolutifs observés ont été rassemblés sur un même schéma à objet pédagogique (Figure 14). La présentation met l'accent sur l'évolution du milieu, et notamment une forte altération du front de taille. La réalisation du phénomène sur un site donné nécessite en réalité plus d'un siècle. Dans ses grandes lignes, la succession\* reste conforme aux précédentes. Elle ressemble par ailleurs à celles des pelouses\* calcicoles\* des coteaux calcaires de la région concernée. Elle possède néanmoins des particularités influencées par la nature du substrat.

L'auteur relève que la durée de chaque stade de la succession\* végétale n'est pas équivalente et est propre à chaque carrière. Selon le type de calcaire (dans une région apparemment relativement homogène) la vitesse d'altération et d'érosion des fronts de taille et du carreau sera plus ou moins rapide.

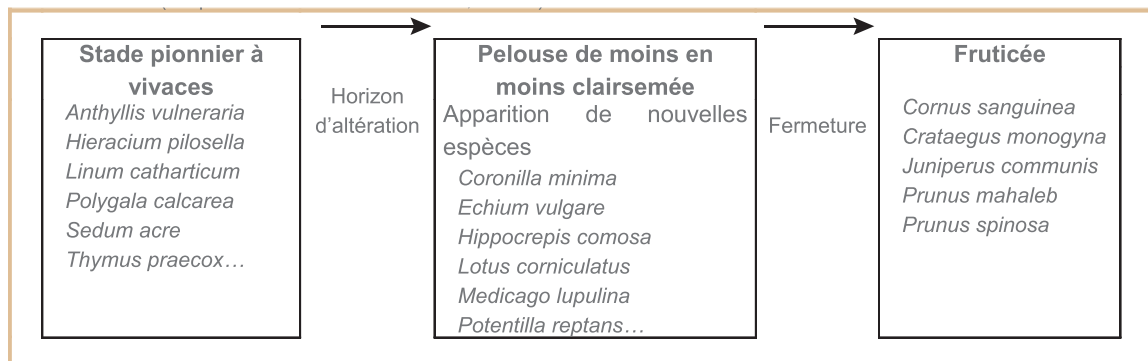
**Figure 14** Schémas des successions des anciennes carrières de roches massives de Bourgogne (Brunaud, 1997a)



Sur ce type de substrat, plus cohérent que les sables calcaires et les craies, les stades pionniers\* ne semblent pas caractérisés par des groupements d'annuelles. Brunaud (1997a) observe ainsi dans les premiers stades de la succession\* une colonisation par des **vivaces** inféodées aux surfaces rocheuses (Figure 15). La **fermeture du milieu est lente**, contrairement à ce qui se passe sur les pelouses\* « naturelles » des coteaux calcaires de la région étudiée. Ce ralentissement de la dynamique en carrière serait lié à un manque de sol suffisant pour l'installation des arbustes.

**Figure 15**

Succession végétale observée sur roche calcaire massive de Bourgogne  
(D'après les travaux de Brunaud, 1997a)

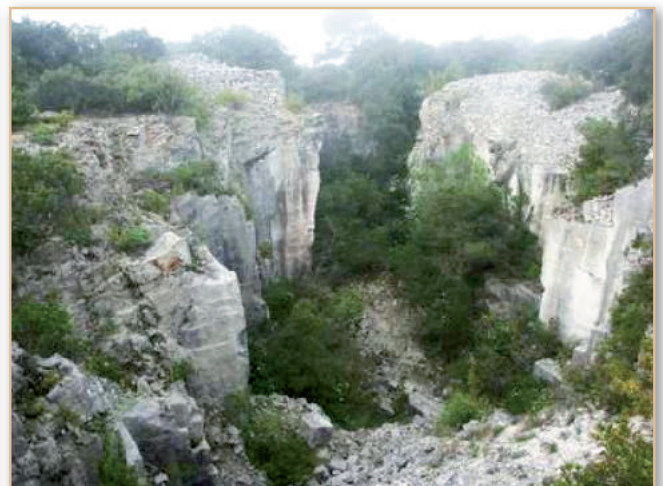


Cette contrainte écologique imposée par la nature du substratum peut être extrême sur des calcaires massifs très compacts comme ceux de l'Urgonien façonnant les garrigues de l'arrière-pays méditerranéen. Dans les anciennes carrières « romaines » datant de près de 2 000 ans établies dans ce substrat, aucune végétation ne parvient à s'installer sur le carreau non fracturé, ce qui n'est pas le cas dans celles possédant des éboulis et des amas pierreux, entièrement colonisées par la chênaie verte (Figure 16).

**Figure 16**

Illustration de l'influence de la fracturation du substrat  
(Photos ENCEM)

Deux carrières très anciennes dans les garrigues nîmoises situées dans le même niveau géologique à quelques centaines de mètres l'une de l'autre. Dans celle de gauche aucune végétation ne se développe sur un substrat calcaire compact dépourvu de fissures. Dans celle de droite, des verses de débris calcaires constituent un support à une garrigue de Chêne vert.



### 1.3.4.3 Succession sur éboulis et verses

Sur les éboulis se développant parfois au pied des fronts de taille, plusieurs variantes de successions\* végétales sont décrites par les auteurs précédents selon la nature des matériaux.

Sur les talus crayeux du nord de la France, Decocq (1994) observe l'absence de stade initial à annuelles. La rigueur des paramètres stationnels (pente forte, érosion, sécheresse...) est avancée pour expliquer le remplacement des pionnières par des vivaces avec un groupement à *Lactuca perennis* et *Hieracium maculatum*.



Sur les éboulis de bas de front des anciennes carrières de calcaires massifs de Bourgogne, le stade buissonnant s'installe en général immédiatement. Allion (1993) fait ce même constat sur différents sites de Beauce et de la Champagne berrichonne. En éboulis cryoclastiques, les successions\* décrites par Brunaud (1997a) se rattachent à un schéma plus classique déjà décrit passant par des stades pionniers\* à annuelles.

Comme en contexte naturel et sur les talus routiers, la propagation de la végétation sur les éboulis en carrière se fait depuis sa base par « colonisation remontante » (Brunaud, 1997a). Cette dynamique est la résultante :

- ▶ de l'entraînement des plantules, des graines et des terres fines en bas de pente par le ruissellement ;
- ▶ du blocage des semences et autres particules en pied d'éboulis par la végétation installée antérieurement. Les semences se fixent ainsi de plus en plus haut.

#### 1.3.4.4 Succession sur merlons et matériaux terreux

Ces milieux peu attractifs ne sont pas analysés dans la littérature. Réalisés avec des matériaux remaniés, ils se distinguent des précédents par des sols profonds, à enracinement facilité par la déstructuration des couches et le mélange avec des argiles et autres particules fines assurant une meilleure capacité de rétention en eau. Les conditions de croissance des végétaux y sont plus favorables que dans les autres compartiments de la carrière. La dynamique végétale est en générale plus rapide avec des stades pionniers\* à annuelles fugaces, rapidement remplacés par des friches à hautes herbes à tendance nitrophile\*, des ronciers ou des fourrés de saules.

Sur des verses en apparence caillouteuses de la côte dijonnaise, Chambaud (communication orale) fait ce même constat. Les groupements de plantes nitrophiles\* seraient favorisés par la présence de terres fines et argiles sous la couche superficielle de pierres.

#### 1.3.5 Les successions sur roches éruptives

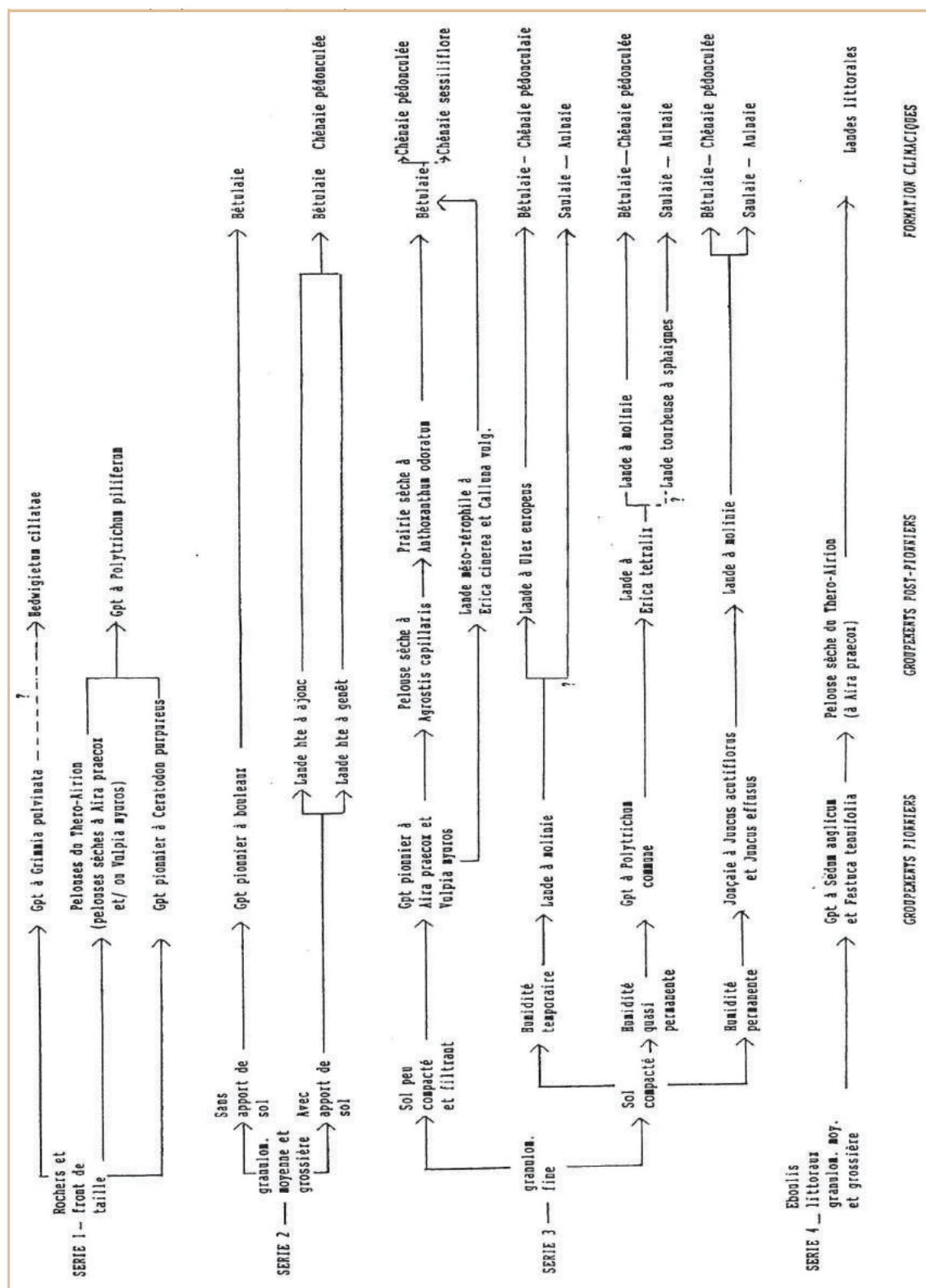
Boulet (1996) a reconstitué à l'aide d'une approche phytosociologique\* synchronique\*, de façon plus ou moins hypothétique, quatre principaux types de successions\* dans les carrières acides de Basse-Normandie. Ces **quatre séries sont directement déterminées par la texture du substrat\*** (Figure 17). À l'intérieur de ces séries interviennent d'**autres facteurs** décisifs : l'humidité, la compaction et la mobilité du substrat\*.

##### 1.3.5.1 Les rochers et fronts de taille

D'après Boulet (1996), les étapes de successions\* sur les rochers et fronts de taille **sont réduites**. Les seuls groupements\* végétaux caractéristiques sont des groupements\* bryophytiques, notamment à polytrics (même si des plantes annuelles\*, des arbres et des arbustes, ajoncs, saules, pins... s'y installent). Ils peuvent s'implanter comme pionniers\* ou bien succéder à des pelouses\* pionnières\* sèches à Canche précoce (*Aira praecox*) ou au groupement\* pionnier\* bryophytique à *Ceratodon purpureus*, et bloquer la succession\*. Il s'agit d'une dynamique originale puisque l'ordre des successions\* est inversé. Dans ce cas, seule une ouverture dans le tapis végétal fermé peut relancer la dynamique.

Figure 17

Évolutions progressives des différents groupements\* végétaux des carrières de roches massives de la Basse-Normandie armoricaine (d'après Boulet, 1996).



Il faut ajouter le rôle prépondérant que joueraient les cryptogames sur les substrats\* minéraux (Walton, 1993). Les lichens interagissent avec les substrats\* rocheux et les sols en altérant la roche et en produisant une minéralisation secondaire par attaque organique acide, dissolution des silicates... Les mousses peuvent pénétrer dans les fissures de roches et participer à leur altération. Leurs attaques chimiques, ainsi que celles des algues, champignons et bactéries, permettent l'accumulation de particules minérales. Ces organismes sont en définitive les premiers colonisateurs de tous substrats minéraux et sols.

### 1.3.5.2 Les éboulis

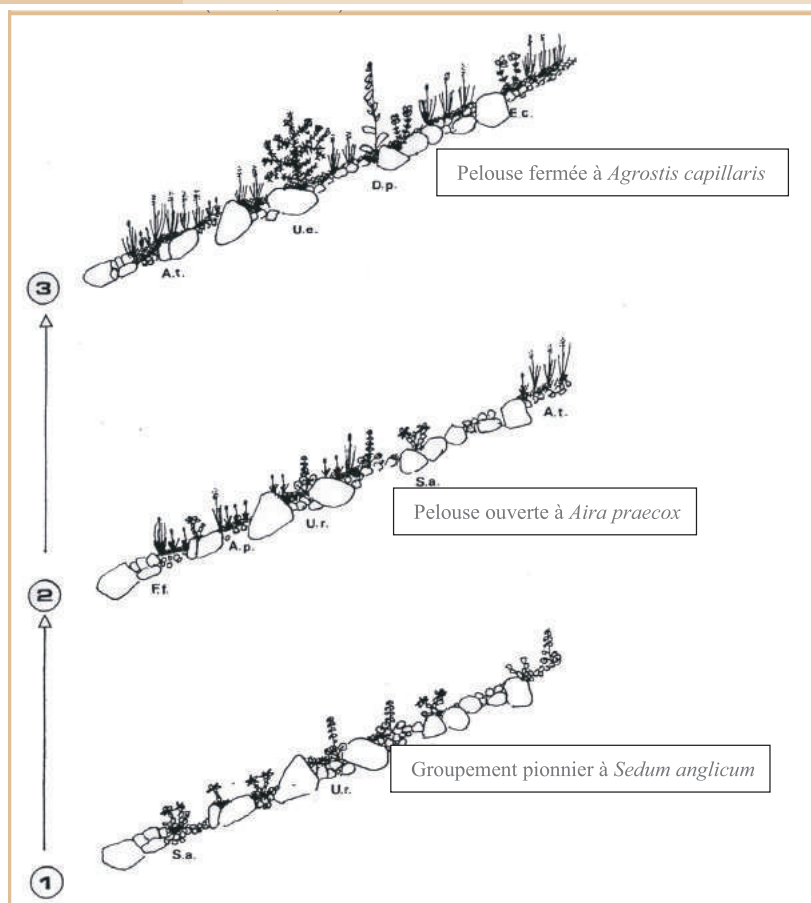
#### • Les substrats\* mobiles à granulométries\* moyenne et grossière

Boulet (1996), en Basse-Normandie, observe une dynamique originale : le végétal pionnier\* est ici un arbre. Les bryophytes\* et les herbacées\* arrivent en effet après l'installation du Bouleau pubescent qui stabilise et fixe l'éboulis. Comme Petit (1980) pour les terrils\* du nord de la France, Boulet suggère que la bétulaie\* préforestière puis la chênaie succèdent à la bétulaie\* pionnière\* au moins pour les éboulis en cours de stabilisation.

#### • Les éboulis stables avec apport de sol

Sur ces éboulis, des groupements\* de landes\* à Ajonc d'Europe peuvent s'installer rapidement ralentissant les processus d'érosion et enrichissant le sol. L'apparition d'espèces comme la Germandrée scorodaine (*Teucrium scorodonia*), la Ronce et le Bouleau pubescent annonce un stade préforestier. L'Ajonc va être fortement concurrencé par la strate arbustive et disparaître au profit de la bétulaie\*. L'amélioration du sol va permettre à plus long terme la formation d'un mull\* susceptible d'accueillir une chênaie pédonculée.

**Figure 18** Dynamique de la végétation sur éboulis littoral (Boulet, 1996)



#### • Les éboulis en situation littorale

Ce cas particulier a amené Boulet (1996) à proposer une série supplémentaire. Le groupement\* pionnier\* à Orpin anglais (*Sedum anglicum*) cède la place à un groupement\* fermé à Canche précoce puis à Agrostide vulgaire (Figure 18) pouvant évoluer vers une lande\* littorale.

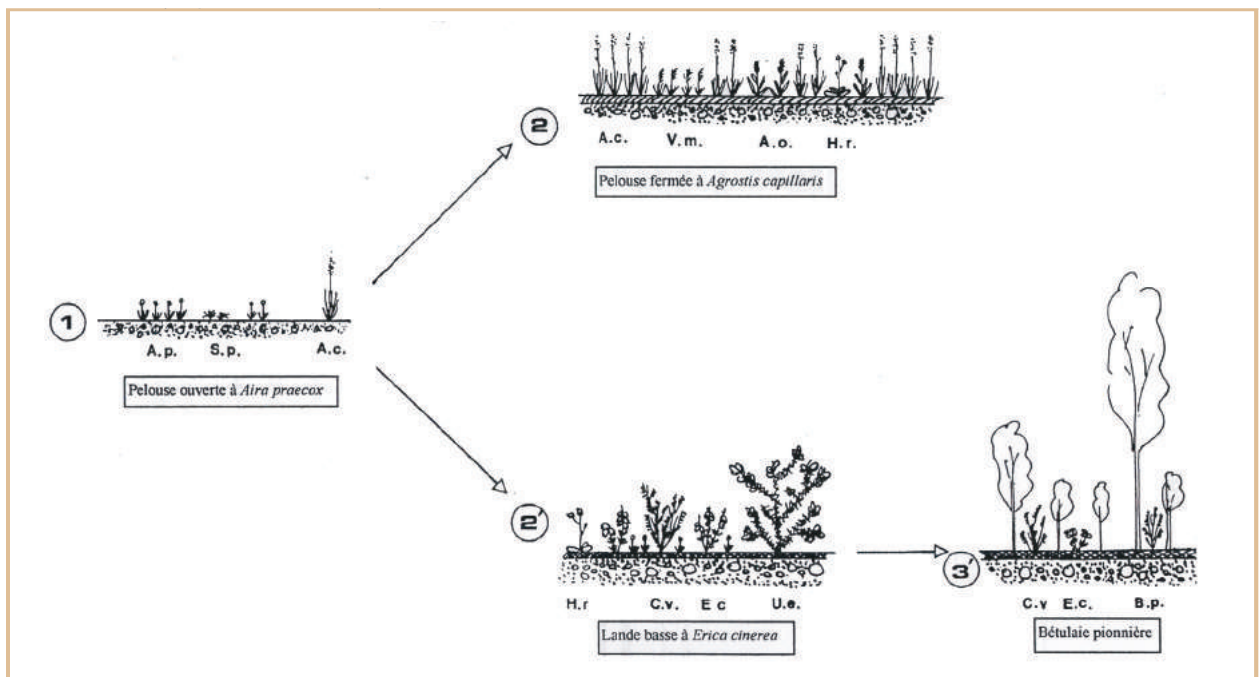
### 1.3.5.3 Les carreaux

#### • Les carreaux\* secs à sol peu compacté et filtrant

Sur ces carreaux, la pelouse\* pionnière\* à Canche précoce évolue vers une bétulaie\* selon deux voies différentes : la première consiste en un glissement progressif vers la prairie\* sèche à Agrostide vulgaire puis à Flouve odorante, la seconde passe par un groupement\* de lande\* à Ajonc liée à un processus de podzolisation\* qui entraîne une acidification du substrat\* (Figure 19). Boulet (1996) suggère comme précédemment une évolution des bétulaies\* en chênaies.

**Figure 19**

Dynamique de la végétation sur substrat\* aride (carreaux\* secs à sol peu compacté et filtrant) (d'après Boulet, 1996)



#### • Sols compactés et à humidité temporaire

Sur ceux-ci le stade pionnier\* consiste en une lande\* à Molinie. Si le substrat\* est asphyxiant, la Molinie persiste alors qu'un bon drainage permet le développement d'une lande\* haute à Ajonc qui ensuite évolue en bétulaie\* et chênaie.

#### • Les dépressions peu profondes où l'humidité est quasi permanente

Elles sont colonisées par le groupement\* à Polytrich commun.

La lande\* à Bruyère à quatre angles peut le remplacer et, selon l'état de saturation en eau du substrat\*, Boulet (1996) envisage deux séries évolutives divergentes :

- (1) une série mésophile\* liée à un meilleur drainage où le Bouleau pubescent et le Saule roux orientent l'évolution vers la bétulaie\* pionnière\* des carreaux\* ;
- (2) une série hygrophile\* avec apparition de sphaignes auxquelles succèdent une saulaie puis éventuellement une aulnaie\*.



### • Situation d'humidité permanente

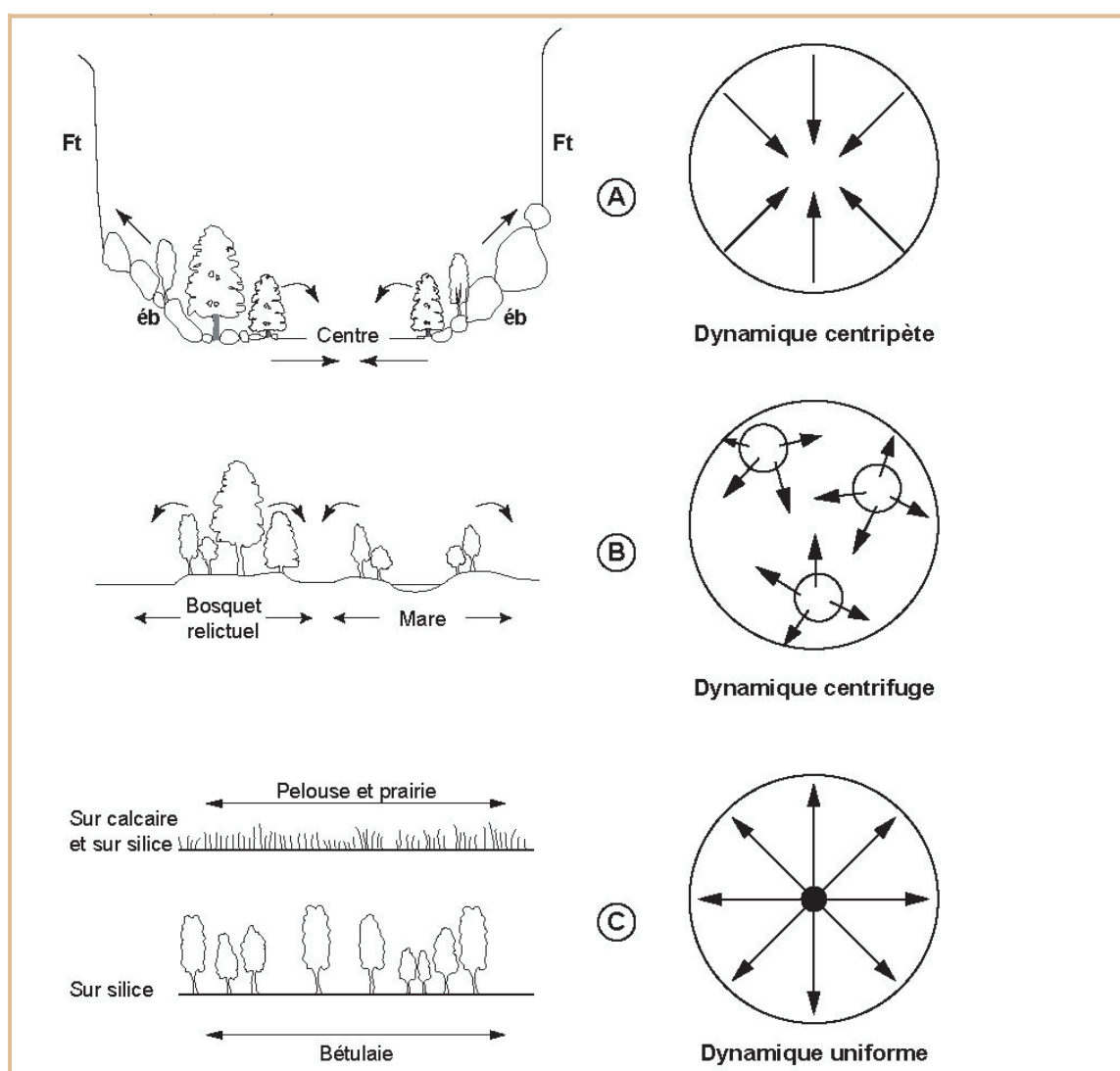
Sur ces sols gorgés d'eau, des jonçaises\* pionnières\*, pouvant évoluer en moliniaies, s'implantent tout d'abord. Le plus souvent ces groupements\* à joncs laisseront la place à une saulaie puis à une aulnaie\*.

### 1.3.6 La dynamique spatiale de la succession végétale

La succession\* végétale n'est pas un mécanisme linéaire et progressif, elle varie dans l'espace selon l'état de la végétation et l'environnement de la carrière. Cette dimension **spatiale** de la reconquête végétale a été étudiée par Prach & Pysek (2001) en Europe centrale, par Boulet (1996) sur des carrières siliceuses et par Frochot (2000) sur des carrières calcaires de l'est de la France.

**Figure 20**

Modèles de dynamique spatiale de la reconquête végétale des carrières de roches massives (Boulet, 1996)



- ▶ Après arrêt de l'activité de la carrière, ce qui correspond en général à l'arrêt des perturbations du milieu, **la strate herbacée\*** colonise très rapidement et uniformément la quasi-totalité de la carrière (Figure 20). La végétation lichénique, muscinale et herbacée\* (ce sont des pionnières dont la dissémination s'effectue surtout grâce au vent) apparaît dès l'arrêt des perturbations\* (Boulet, 1996 ; Prach & Pysek, 2001).
- ▶ La **végétation arbustive** apparaît plus tardivement (de l'ordre de 10 ans après l'arrêt de l'exploitation), de manière beaucoup plus progressive. Elle se fait de proche en proche, soit de manière centripète (Figure 20A), à partir de la périphérie de la carrière (souvent les éboulis), soit de manière centrifuge (Figure 20B) à partir de bosquets relictuels ou de foyers de colonisation tels que les points d'eau. Ces derniers favorisent une reprise rapide par la végétation arbustive hygrophile\* et mésohygrophile\* (Boulet, 1996). Frochot *et al.* (2000) corroborent ce constat et ajoutent aux éboulis et mares l'importance des merlons\* comme foyer de démarrage d'une colonisation par accrues\*.
- ▶ Le carreau\* peut être envahi (Petit, 1980, parle d'explosion) par des semis de Bouleaux sur l'ensemble de la plate-forme. La colonisation n'est ni centrifuge ni centripète, elle se fait par vague uniforme (Boulet, 1996 ; Prach & Pysek, 1994).

Cette dynamique spatiale dépend bien évidemment de la taille et de la forme de la carrière. Un site de taille réduite ou de forme étroite sera plus facilement exposé à une dynamique uniforme. Plus facile et plus directe sera également la mise en place de successions\* aboutissant à une végétation proche de celle de communautés se développant régionalement (Prach & Pysek, 2001).

L'environnement joue aussi un rôle significatif. Sur toutes les carrières âgées de moins de 100 ans étudiées par Brunaud (1997a) en Bourgogne, seules celles situées en contexte forestier sont entièrement occupées par une strate arborée, les autres conservant des milieux ouverts.

### 1.3.7 Les successions animales en carrières de roches calcaires et éruptives

Principalement étudié à travers la végétation (Lepart & Escarre, 1983), le concept de succession\* est développé également pour des approches faunistiques. La faune, est davantage **liée à la structure de la végétation** (pelouse\* ouverte, fermée, fourrés, strate arbustive, strate arborescente) qu'à la composition floristique. Ainsi, la nature du substrat ne semble pas jouer un rôle déterminant dans les modalités de colonisation du site par la faune.

Les principales études réalisées portent sur d'anciennes mines : Picaud & Petit (1998), Bonnet *et al.* (1997) et Brown (1984) pour les orthoptères, Galan (1997) pour les batraciens...

#### 1.3.7.1 Succession des invertébrés

Les données recueillies traitent uniquement des insectes. Compte tenu de leur biologie, les insectes sont pour la plupart liés de près ou de loin à la végétation. Ce rapport étroit entre ces animaux et les plantes est souligné par les entomologistes contactés ainsi que dans la littérature (Picaud & Petit, 1998 ; Bonnet *et al.*, 1997 ; Brown, 1984).

La végétation apparaît comme un élément central de la succession\* écologique pour les insectes, par trois de ses composantes essentiellement :

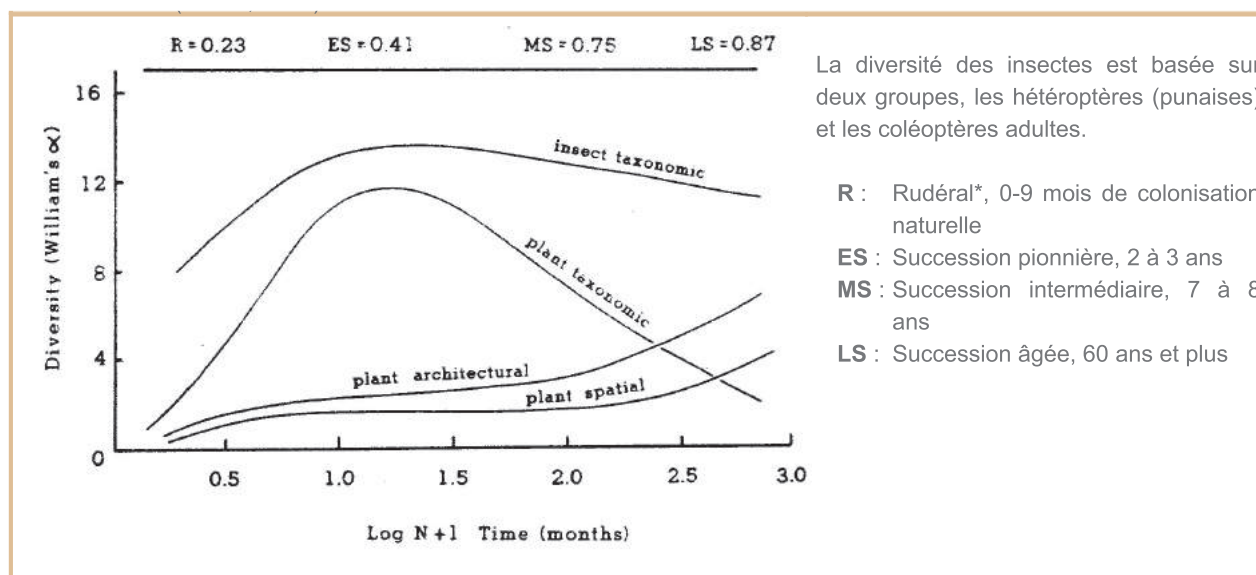
- La diversité végétale : suite à l'étude de la recolonisation des haldes minières d'uranium du Limousin par les orthoptères<sup>3</sup>, Picaud & Petit (1998) montrent que la diversité en orthoptères accompagne l'évolution de la diversité végétale. **Cette diversité entomologique est maximale pour une diversité végétale maximale.** En général elle intervient aux stades de pelouses\*, mais elle peut se manifester à des stades plus avancés.

- La structure et l'architecture de la végétation : Brown (1984) indique le rôle important de ce paramètre (Figure 21). Dans la succession\* végétale, après un maximum de diversité correspondant le plus souvent au stade pelouse\*, **la diversité décline avec la fermeture du milieu.** Pour les insectes une baisse de la diversité s'amorce également, mais elle est nettement plus atténuée, car si la diversité végétale chute, son organisation et sa structure deviennent plus complexes, offrant de nouvelles conditions de vie à **un nouveau cortège spécifique d'insectes.**

- La composition floristique : analysant les relations orthoptères – végétation, Bonnet *et al.* (1997) précisent que **la composition floristique peut également influencer la composition des orthoptères.** Dans une végétation riche en « herbes » (graminées, joncacées, cypéracées), les criquets graminivores seront prépondérants, alors que, dans des formations herbacées constituées de dicotylédones, ils seront remplacés par des criquets dits forbivores.

Dans la dynamique de colonisation des haldes d'uranium, Picaud & Petit (1998) mettent en évidence le rôle des voies de colonisation et de l'environnement du site dans les modalités de reconquête d'un espace après travaux. Les talus et bords de chemins herbeux sont par exemple des axes de micro-migration empruntés par ces animaux. La distance d'un site par rapport à ces axes agit sur la vitesse de colonisation. Un secteur proche de la voie d'accès est rapidement investi et se stabilise plus vite qu'un secteur plus éloigné.

**Figure 21**      Modèle de la diversité insectes / végétation  
(Brown, 1984)



<sup>3</sup> Orthoptères : groupe d'insectes regroupant notamment les criquets et les sauterelles.

### 1.3.7.2 Succession des batraciens et reptiles

Peu de travaux abordent les modalités de recolonisation des carrières et autres sites artificiels par les batraciens et les reptiles. Les recherches effectuées par Galan (1997) dans des mines du nord-est de l'Espagne en donnant un aperçu (Tableau 7). Comme pour les insectes, l'établissement de la faune des reptiles et batraciens dépend du développement des communautés végétales. La diversité spécifique augmente avec l'âge du milieu. Les espèces pionnières comme le Crapaud calamite et le Crapaud accoucheur arrivent rapidement, dans les trois années suivant l'arrêt des travaux, et se cantonnent aux surfaces les plus ouvertes. Avec le développement de la végétation suivent ensuite de nombreuses espèces liées à des habitats herbeux et aux fourrés. L'alternance de milieux fermés (bois et fourrés), de pelouses et de sols nus permet d'asseoir durablement cette diversité.

**Tableau 7** Évolution de la population de batraciens et reptiles dans une mine de lignite du nord-est de l'Espagne (Galan, 1997)

Contrôle 1 et Contrôle 2 sont des surfaces témoins situées à l'extérieur de la mine. Au sein de la mine, la richesse en batraciens et reptiles sur les surfaces suivies augmente qualitativement et quantitativement avec l'âge suivant l'ensemencement du site.

Batraciens : les espèces pionnières, le Crapaud accoucheur (+ 2) suivi du Crapaud calamite (+ 3), colonisent rapidement les surfaces peu végétalisées, la Grenouille de Pérez arrivant précocement (+ 2) occupe les fossés de drainage, *Discoglossus galganoi* (+ 3) fréquente les sites herbeux.

Reptiles : une seule espèce, *Podarcis bocagei*, est un colonisateur précoce. Les autres espèces sont apparues plus tardivement, notamment au niveau des broussailles.

| Année du suivi suivant un ensemencement | 0 | + 1 | + 2 | + 3 | + 4 | + 5 | + 6 | Contrôle 1 | Contrôle 2 |
|-----------------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|------------|
| <b>AMPHIBIENS</b>                       |   |     |     |     |     |     |     |            |            |
| Nombre d'espèces                        | 0 | 0   | 2   | 3   | 4   | 5   | 5   | 8          | 10         |
| Nombre d'individus                      | 0 | 0   | 10  | 22  | 37  | 50  | 57  | 52         | 84         |
| <b>REPTILES</b>                         |   |     |     |     |     |     |     |            |            |
| Nombre d'espèces                        | 0 | 1   | 1   | 2   | 3   | 5   | 6   | 8          | 7          |
| Nombre d'individus                      | 0 | 3   | 9   | 22  | 28  | 23  | 18  | 31         | 28         |

### 1.3.7.3 Succession des oiseaux

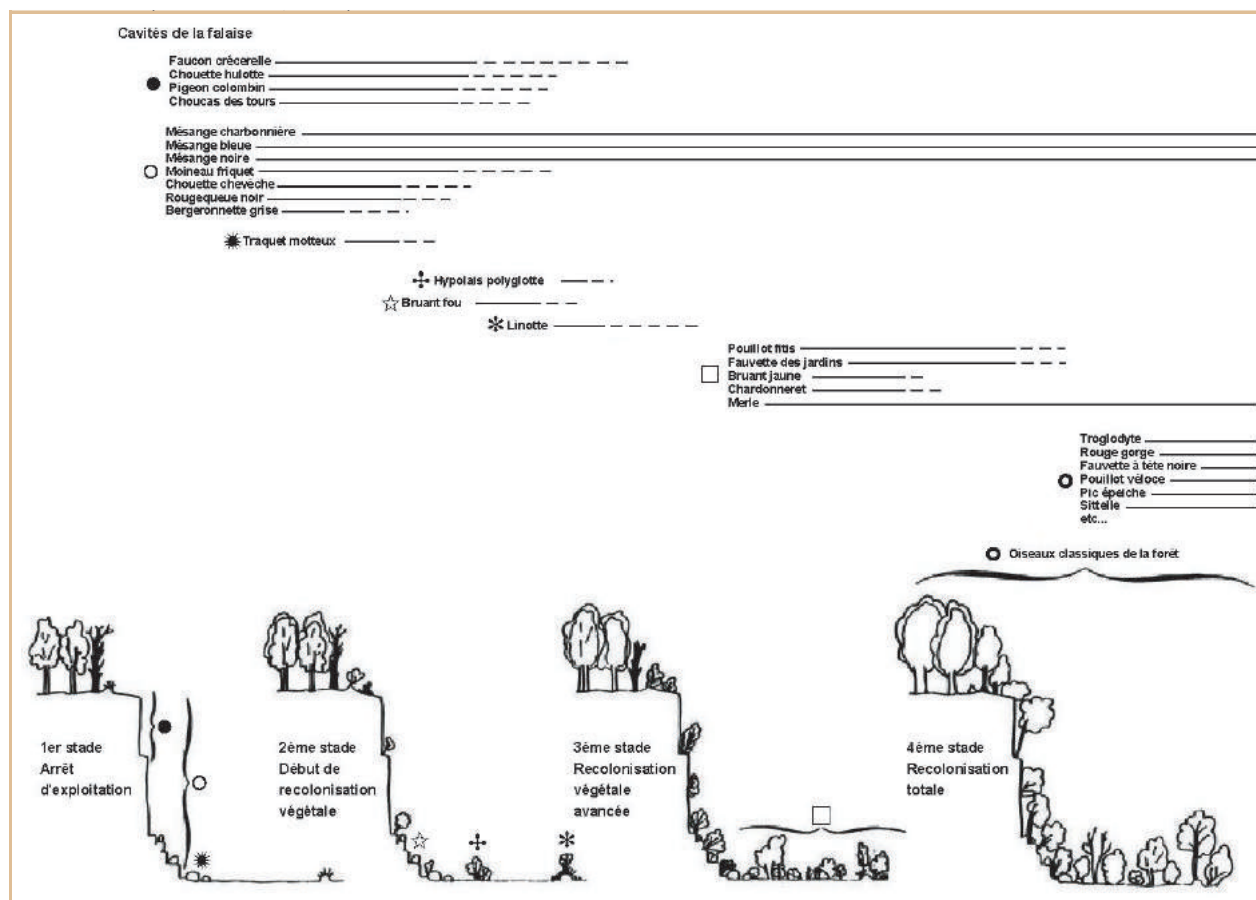
Suite à leurs travaux sur les carrières calcaires francomtoises, Robert et al. (1991) présentent sous forme d'un schéma l'évolution de l'avifaune au cours de la vie de la carrière après exploitation (Figure 22). Celui-ci suppose que la taille de la carrière n'est pas un facteur limitant.

Chaque compartiment de la carrière se caractérise par un cortège aviaire spécifique. Les espèces inféodées aux falaises et aux autres milieux ouverts se maintiennent tant que la végétation ligneuse reste discrète. Avec la fermeture progressive du site, elles disparaissent rapidement pour laisser la place à des espèces de lisière et des bois.



Figure 22

Évolution théorique de l'avifaune d'une carrière de roches massives de l'est de la France (Robert et al., 1991)



Cette évolution du peuplement se traduit par **un gain en diversité avifaunistique mais par une baisse de l'originalité, les espèces les plus rares étant liées aux habitats ouverts**. C'est la succession\* végétale qui influence les changements constatés dans le cortège d'oiseaux.

### 1.3.8 Les vitesses d'évolution

L'évolution des peuplements est un **processus lent, bien que variable** selon les carrières (notamment lié à l'altération de la roche). Les **groupements pionniers** peuvent ainsi perdurer pendant plusieurs années.

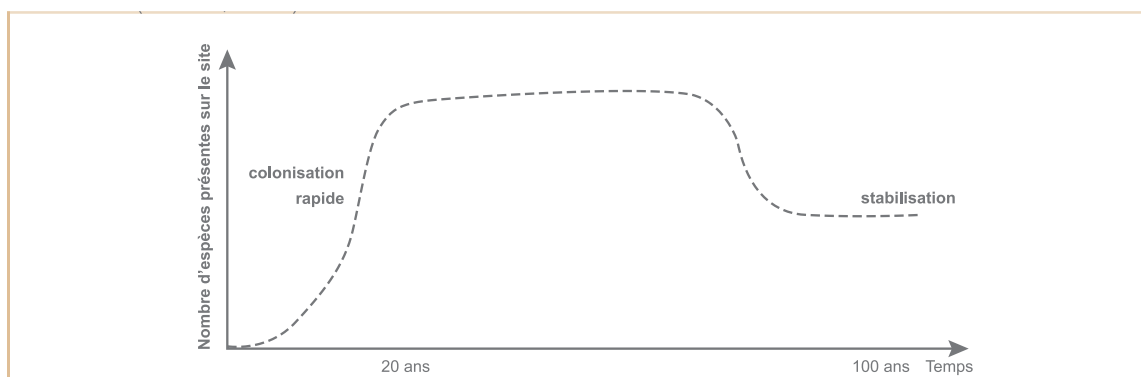
L'installation de la faune (orthoptères, faune vertébrée) est directement dépendante du développement de la végétation mais dépend également d'autres paramètres (humidité...).

Sur une centaine de carrières calcaires étudiées en Bourgogne, Brunaud (1997a) remarque que les recouvrements des strates herbacées et arborées sont inversement proportionnels : la strate de végétation rase est beaucoup plus représentée dans les carrières « jeunes » (dont la fin d'exploitation remonte à moins de 10 ans) ; elle a disparu des carrières âgées (cent ans), surtout lorsque celles-ci se trouvent en contexte forestier. La strate arbustive accompagne le passage de la strate herbacée à arborée. L'apparition des ligneux marque la fermeture du milieu. La durée de chaque stade est propre à chaque carrière. L'altération de la roche notamment est plus ou moins rapide, favorisant plus ou moins la création du sol.

Parallèlement, le nombre d'espèces évolue de façon significative avec l'âge de la carrière (Figure 23). Il croît puis se stabilise un temps avant de diminuer, après un délai souvent très long (environ 100 ans). Ce phénomène est identique à celui mis en évidence sur les sablières pour les oiseaux (Kovacs *et al.*, 2001), sur une autre échelle de temps.

**Figure 23**

Rythme de colonisation d'une carrière abandonnée  
(Brunaud, 1997a)



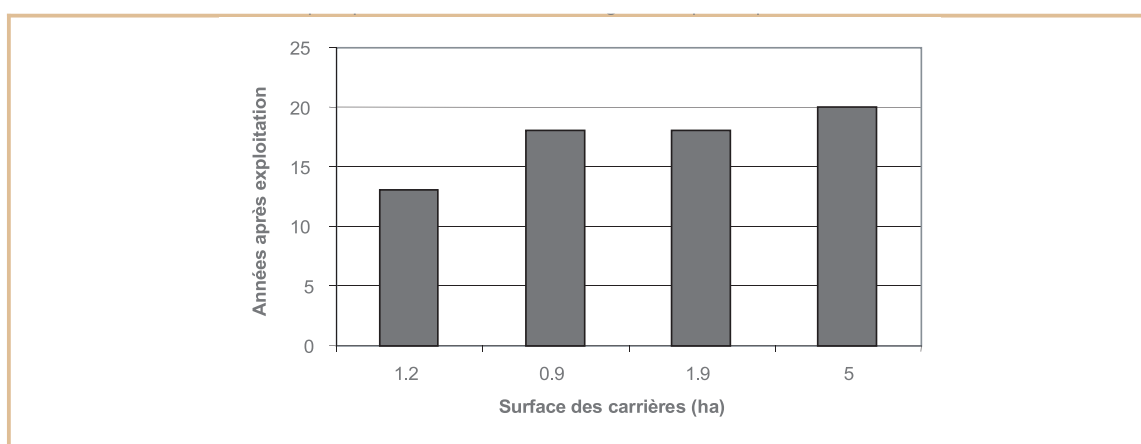
La vitesse d'évolution d'un groupement\* végétal ou d'une communauté animale reste cependant difficile à étudier car c'est un paramètre qui met en jeu des processus souvent lents (plusieurs décennies) ou au contraire très rapides (perturbations\*), difficiles à détecter ou à mesurer.

### 1.3.8.1 Les vitesses d'évolution des successions végétales

S'agissant de l'évolution progressive de la végétation, l'approche cartographique de Boulet (1996) nous indique que, toutes strates confondues (herbacée\*, arbustive et arborescente), les carrières acides les plus petites tendent à se végétaliser plus vite que les plus grandes (Figure 24), ce que corroborent Frochot et al. (2000) pour des carrières calcaires. La végétalisation semble rapide au cours des premières années, pour ralentir ensuite avec le vieillissement des carrières. Cela s'expliquerait par une colonisation rapide des substrats\* potentiellement plus accueillants alors que les substrats\* les plus perturbés résistent à une emprise par les végétaux supérieurs (Boulet, 1996) et par des différences microclimatiques du site (Frochot et al., 2000).

**Figure 24**

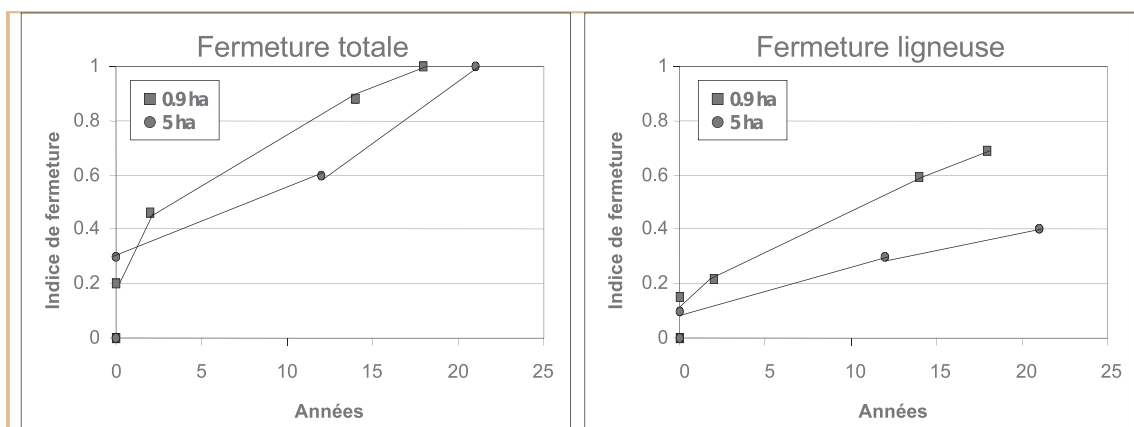
Vitesse relative de végétalisation totale (strates herbacée\*, arbustive et arborescente) de quatre carrières acides de Basse-Normandie en fonction de leur âge après exploitation (d'après Boulet, 1996)  
Les carrières de plus petite taille tendent à se végétaliser plus rapidement.



De plus, la colonisation des substrats\* les plus perturbés est beaucoup plus rapidement réalisée par la strate herbacée\* (dès que l'action de l'homme cesse), représentée le plus souvent par des groupements\* pionniers\* (Figure 25).

**Figure 25**

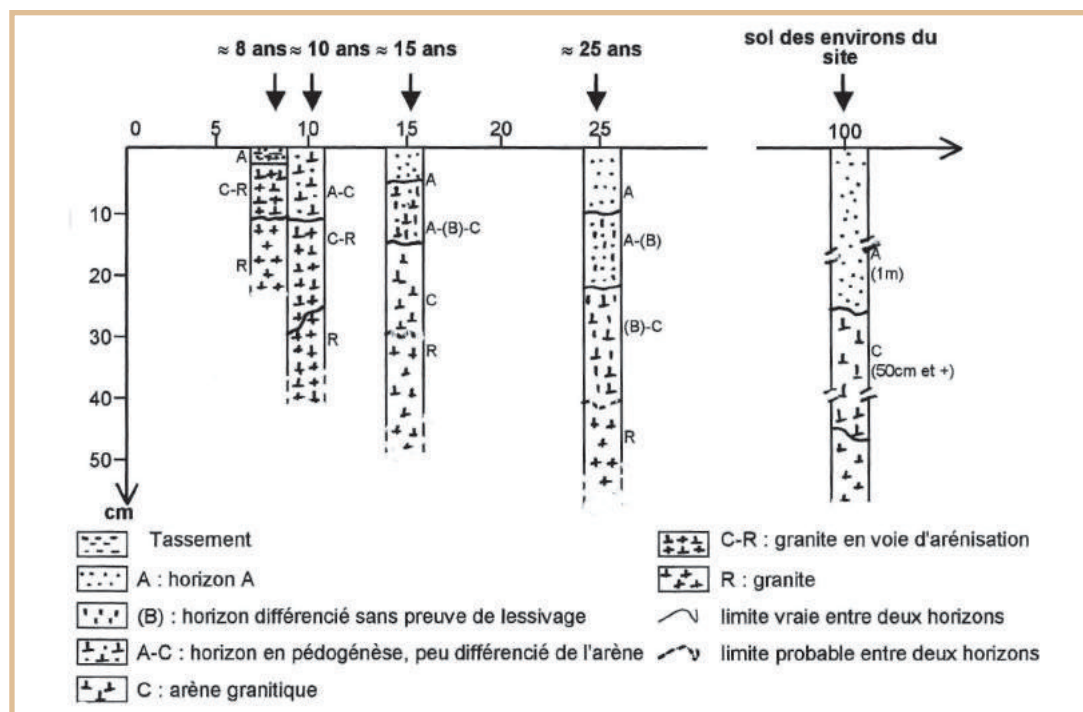
Évolution de la fermeture totale (à gauche) et de la strate ligneuse\* seule (à droite), de deux carrières acides de Basse-Normandie (d'après Boulet, 1996)  
Un indice de valeur 1 indique une carrière dont l'étendue est végétalisée à 100%.



Cette dynamique végétale est très rapide étant donné la pauvreté du substrat\*. En effet l'évolution des sols est lente, et le substrat\* minéral présente une différenciation morphologique peu évoluée (Figure 26). Frain (1991) remarque également que dans les carrières du Limousin et d'Auvergne (granite, gneiss, pouzzolane...) «la végétation est nettement en avance sur le sol». Les sols sont moins évolués et profonds parmi les groupements\* préforestiers et forestiers de carrières que dans leurs homologues régionaux (Boulet, 1996).

**Figure 26**

Formation des sols sur les carreaux\* de carrières de granites du Limousin (d'après Frain, 1991)



Pourtant, Prach & Pysek (2001) montrent, à partir d'études effectuées sur des sites dégradés d'Europe centrale, que le développement de la végétation ligneuse\* est facilité lorsque les conditions environnementales sont modérées, et fortement retardé dans les milieux présentant des conditions plus extrêmes (sécheresse, eau permanente, déficit en nutriments, acidité).

### 1.3.8.2 Les vitesses d'évolution des successions animales

Concernant la faune du sol, Dunger (1989) nous donne quelques éléments des successions\* se déroulant durant la réhabilitation de sites miniers germaniques. Le montre que l'activité potentielle de la faune du sol, au moins pour la macrofaune et les microarthropodes, augmente continuellement.

- **Le premier stade** correspond au stade pionnier\* et peut durer de 2 à 30 ans selon les contraintes du milieu. Les communautés de microarthropodes sont représentées essentiellement par des collemboles (*Entomobrya lanuginosa* en surface et *Proisotoma minuta* plus en profondeur).
- Durant **le second stade**, la strate herbacée\* entraîne une accumulation de litière. Elle permet le développement des premiers vers de terre et d'une densité importante de larves de diptères et de microarthropodes (acariens, collemboles...), ce qui entraîne un développement intensif de prédateurs (coléoptères et arachnides). Dans les meilleures conditions, ce stade se termine au bout de la cinquième à la neuvième année, mais souvent il se prolonge beaucoup plus longtemps.
- **Le troisième stade** débute avec le développement d'une strate arbustive et une augmentation de la litière. Les communautés de lombrics et de collemboles se transforment, ce qui se traduit par une décomposition et une humification intenses de la matière organique du sol. La durée de ce stade est plus variable que la précédente. Elle est estimée à 5 à 10 ans, et plus selon les conditions de milieux.
- **Le quatrième stade** correspond à un stade préforestier de durée très variable, caractérisé par la fermeture de la canopée. Sous l'action des lombrics, un transfert de l'humus vers les horizons plus profonds du sol se produit. À ce stade l'importance relative de l'activité des vers de terre par rapport aux microarthropodes est très élevée.

**Tableau 8** Résumé quantitatif de la succession\* de la faune du sol dans des sites miniers germaniques (d'après Dunger, 1989).

BM = biomasse par m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>) ; cet indice ne permettant pas de comparaison entre groupes biologiques, son équivalent en termes de valeur énergétique (ME) est proposé.

La mesure de ME est basée sur le taux de respiration d'un individu pour chaque taxon\*.

|                                              |    | Stade I | Stade II | Stade III | Stade IV | Stade V |
|----------------------------------------------|----|---------|----------|-----------|----------|---------|
| <b>Lombrics</b>                              | BM | -       | 0.1      | 6.7       | 40.6     | 93.7    |
|                                              | ME | -       | 2.7      | 126.7     | 487.1    | 1124.4  |
| <b>Autre macrofaune saprophage*</b>          | BM | 0.1     | 1.4      | 1.1       | 0.4      | 0.8     |
|                                              | ME | 0.2     | 26.4     | 20.5      | 7.8      | 15.6    |
| <b>Microarthropodes</b>                      | BM | 0.1     | 0.7      | 0.5       | 0.2      | 0.6     |
|                                              | ME | 1.2     | 7.6      | 5.1       | 2.1      | 6.0     |
| <b>Macrofaune saprophage* totale</b>         | ME | 0.2     | 29.1     | 147.2     | 484.9    | 1140.0  |
| <b>Microarthropodes et macrofaune totaux</b> | ME | 1.4     | 36.7     | 152.3     | 487.0    | 1146.0  |

- Enfin, **le cinquième stade** permet à de nombreuses nouvelles espèces de s'installer (acariens parasites, myriapodes, mollusques, gastéropodes, coléoptères, etc.). Frouz *et al.* (2001) observent également, au cours de la succession\*, une augmentation de l'abondance et du nombre d'espèces de la faune du sol d'anciennes mines de charbon allemandes (acides) et tchèques (alcalines). Cependant, en relation directe avec l'acidité du substrat\*, la diversité de la faune des stades pionniers\* des mines germaniques est plus faible que celles de République Tchèque.



Pour Frochot *et al.* (2000) les successions\* se déroulent lentement<sup>4</sup> aussi bien pour les communautés végétales que pour les peuplements animaux dans la carrière de roches massives calcaire de la Chalendruie : oiseaux (surtout des passereaux qui dépendent directement de l'évolution de la structure végétale), reptiles (qui ont peut-être des difficultés de colonisation), batraciens et insectes orthoptères. Pour ces derniers (17 espèces dominées par l'Oedipode turquoise (Figure 27), *Oedipoda caerulescens*), le peuplement n'a pas sensiblement changé entre la troisième et la septième année suivant la fin d'extraction.

**Figure 27**

L'Oedipode turquoise (*Oedipoda caerulescens*)  
Ancienne carrière de la Moutte, Paimpont (35).  
(Photo ENCEM)



De son côté, Picaud (1998) observe, sur d'anciennes mines revégétalisées du Limousin, la même prédominance de l'Oedipode turquoise, mais seulement durant les premières années. Globalement, il constate des modifications plus profondes des peuplements de criquets (Figure 28). Ces changements sensibles sont à rattacher à une évolution rapide de la végétation (soutenue artificiellement par apport de terre végétale et par semis par projection hydraulique) (Bonnet *et al.*, 1997) :

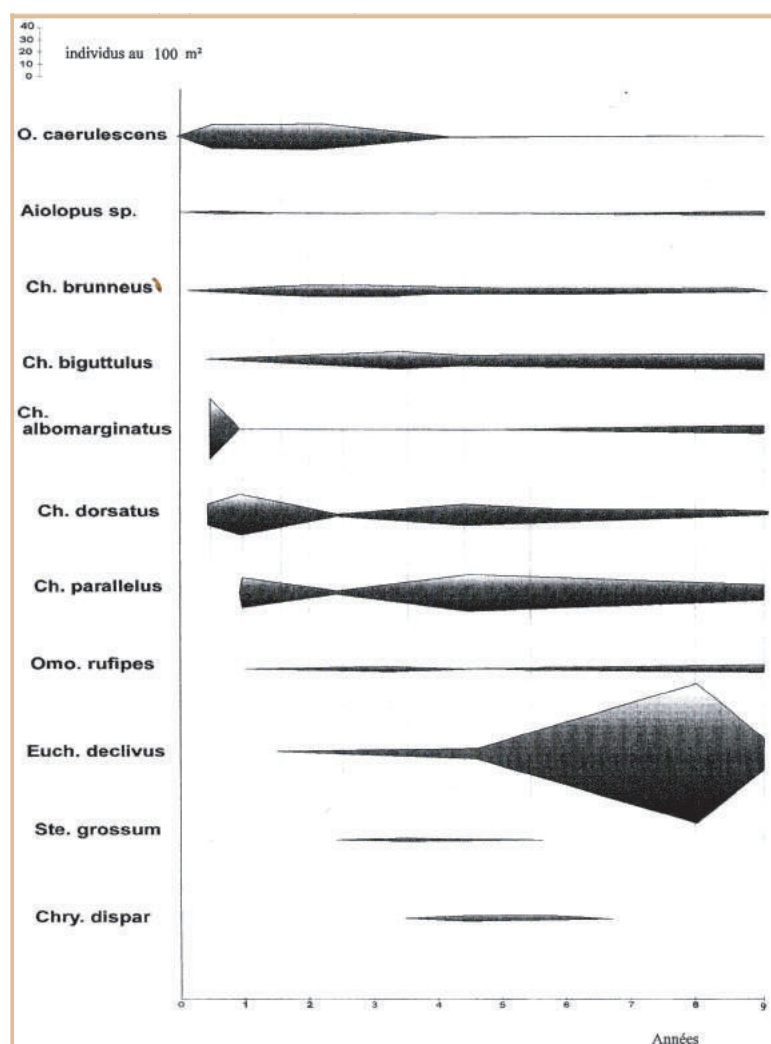
- en **milieu sec** où le recouvrement végétal n'est pas de 100%, la colonisation est rapide :  
*Oedipoda caerulescens* → *Aiolopus thalassinus*, *Aiolopus strepens* → *Chorthippus brunneus*  
*Chorthippus biguttulus* → *Euchorthippus declivus* ;
- en **milieu humide**, l'installation des espèces est plus lente :  
*Stetophyma grossum* → *Chorthippus montanus* → *Chrysochraon dispar* ;
- en **milieu mésophile\***, le classement est plus difficile, il pourrait être :  
*Chorthippus albomarginatus*, *Chorthippus dorsatus* → *Chorthippus parallelus*, *Omocestus rufipes*.

<sup>4</sup> Cette appréciation de la vitesse des trajectoires est très relative et nécessiterait des comparaisons plus objectives à l'aide de trajectoires de référence.

Comme pour les orthoptères, l'installation de la faune vertébrée est directement dépendante du développement de la végétation (Majer, 1989). Certaines espèces sont de meilleures colonisatrices que d'autres, comme le montre l'étude de Galan (1997) pour les reptiles et amphibiens. Cet auteur a examiné la colonisation d'anciens sites miniers espagnols ayant été revégétalisés (semis par projection hydraulique) à des dates connues, lui permettant d'identifier notamment le Crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*), la Grenouille de Perez (*Rana perezii*) et le Crapaud calamite (*Bufo calamita*) comme des espèces typiquement pionnières\*.

**Figure 28**

Étude diachronique\* et synchronique\* de l'évolution des peuplements de criquets de sept anciens sites miniers revégétalisés du Limousin (d'après Picaud, 1998)



Après ces pionnières\*, le processus de colonisation est rapide aussi bien pour les amphibiens que les reptiles (Tableau 9). Les premiers individus observés durant les trois premières années sont tous des juvéniles et les premiers indices de reproduction ne sont observés qu'au bout de cinq années (Crapaud calamite). Enfin, l'auteur conclut qu'un minimum de dix années est nécessaire pour que les communautés d'amphibiens et de reptiles atteignent les caractéristiques antérieures à l'ouverture des mines.

Tableau 9

Nombre d'individus de la batrachofaune et de l'herpétofaune potentielles d'anciens sites miniers espagnols en fonction de leur âge après végétalisation (d'après Galan, 1997)

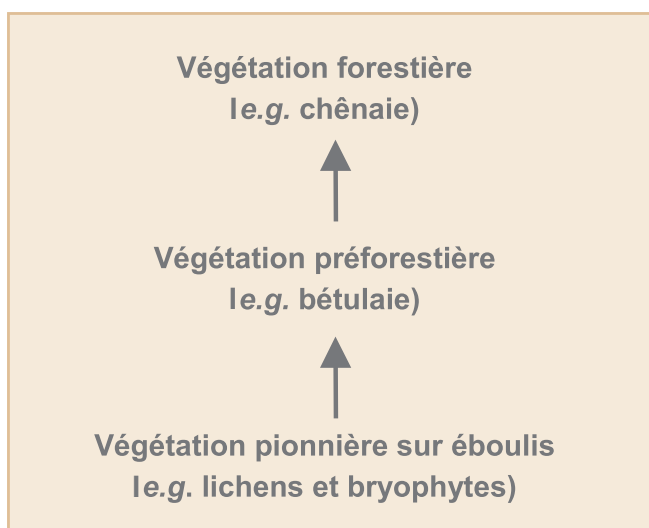
| Âge après végétalisation     | 0 | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  |
|------------------------------|---|---|---|----|----|----|----|
| <b>Amphibiens</b>            |   |   |   |    |    |    |    |
| <i>Salamandra salamandra</i> | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Triturus boscai</i>       | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Triturus helveticus</i>   | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Triturus marmoratus</i>   | - | - | - | -  | -  | 1  | 1  |
| <i>Discoglossus galganoi</i> | - | - | - | 2  | 6  | 4  | 5  |
| <i>Alytes obstetricans</i>   | - | - | 7 | 12 | 11 | 18 | 24 |
| <i>Bufo bufo</i>             | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Bufo calamita</i>         | - | - | - | -  | 5  | 7  | 10 |
| <i>Rana perezi</i>           | - | - | 9 | 8  | 15 | 20 | 17 |
| <i>Rana iberica</i>          | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Rana temporaria</i>       | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <b>Reptiles</b>              |   |   |   |    |    |    |    |
| <i>Anguis fragilis</i>       | - | - | - | -  | -  | -  | 2  |
| <i>Lacerta lepida</i>        | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Lacerta schreiberi</i>    | - | - | - | -  | 1  | 1  | 1  |
| <i>Podarcis bocagei</i>      | - | 3 | 9 | 21 | 26 | 16 | 12 |
| <i>Chalcides striatus</i>    | - | - | - | 2  | 6  | 4  | 5  |
| <i>Coronella austriaca</i>   | - | - | 7 | 12 | 11 | 18 | 24 |
| <i>Natrix natrix</i>         | - | - | - | 1  | -  | 2  | 1  |
| <i>Natrix maura</i>          | - | - | - | -  | -  | -  | -  |
| <i>Vipera seoanei</i>        | - | - | - | -  | 1  | 3  | 1  |

### 1.3.9 Autres dynamiques écologiques

Les schémas classiques des trajectoires décrites plus haut ne se vérifient pas systématiquement en carrières de roches massives. Celles-ci sont en effet propices à un certain nombre de cas particuliers, parfois même méconnus (Frain, 1991). Les précédents modèles dynamiques souvent admis doivent donc être modulés dans le sens d'un raccourcissement sur les roches plus ou moins altérées ou meubles (Figure 29), comme les terrils\* (Petit, 1980), sur des matériaux volcaniques (Frain, 1991), sur les affleurements rocheux (Boulet, 1996 ; Frain, 1991).

Figure 29

Exemple de succession « raccourcie »



Quelques exemples de ces particularités peuvent être proposés :

- La **faune joue un rôle non négligeable en freinant la dynamique**. Par le broutage, les lapins peuvent prolonger et maintenir l'état de pelouse\* (Decocq, 1994 ; Dutoit, 1996). Brown (1984) démontre également l'action des criquets sur le ralentissement de la succession\* végétale.
- Des graminées très compétitives et agressives telle que la Calamagrostide commune (*Calamagrostis epigejos*) peuvent bloquer une succession\* durant de longues périodes en formant une végétation dense et compacte (Prach & Pysek, 2001 ; Wiegand & Moloney, 2004).
- Le Brachypode penné, une graminée sociable, peut également empêcher l'apparition de ligneux.
- L'**envahissement par des plantes naturalisées** comme le Robinier faux-acacia, la Balsamine de l'Himalaya, le Buddleia ou la Renouée du Japon occupe le terrain et gêne d'autres implantations...
- Des éboulis mobiles, régulièrement alimentés par des fronts de taille instables, n'acceptent guère de végétation. Souvent, seuls les Bouleaux parviennent à s'insérer parmi les gros blocs (fruits ailés dispersés par le vent), au pied d'éboulis, et à freiner leur progression. La végétation arbustive est ici pionnière\* avant toute autre forme. Le Bouleau peut également coloniser un substrat\* oligotrophe\*, simultanément à une population\* de bryophytes\*, sans qu'il y ait de stade herbacé\* intermédiaire.

Dans le Midi, le Brachypode de Phénicie empêche le démarrage de ligneux. En Grande-Bretagne, la Mercuriale pérenne ne permet pas l'installation du Frêne. Dans le Bas-Languedoc, les garrigues brûlées se couvrent de Chêne kermès et celui-ci immobilise le milieu pendant plus de vingt ans (Lepart & Escarre, 1983). Une phase de sénescence de ces populations\* peut permettre un redémarrage de la succession\*.

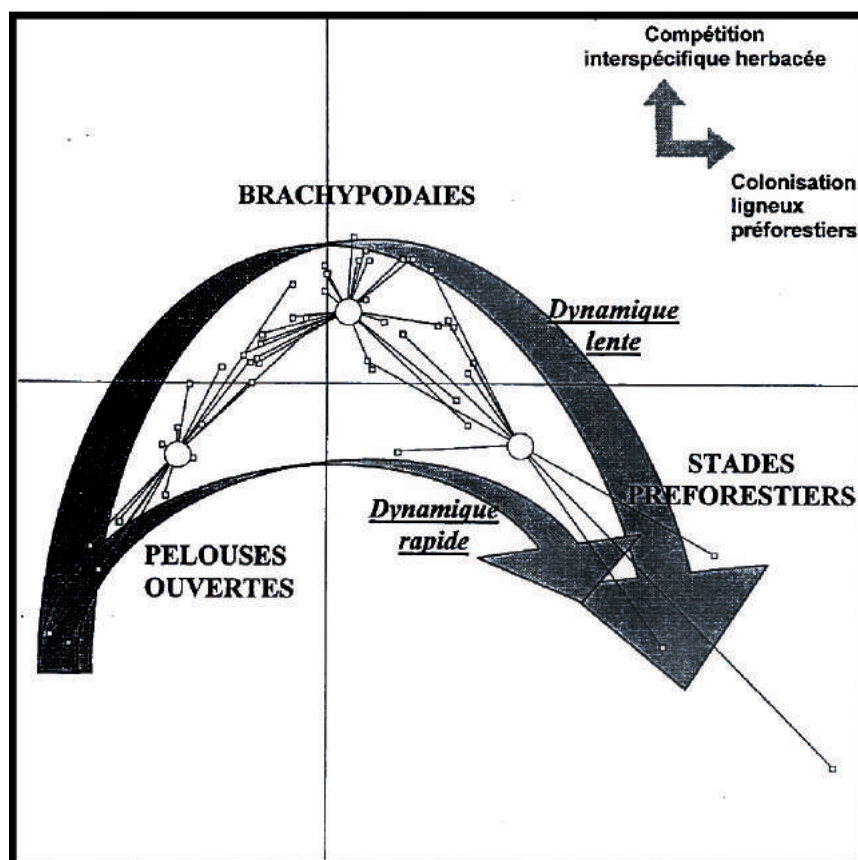
Alard (2000) a observé, sur des écosystèmes calcicoles\* du nord-ouest de la France, une forme de « résistance » à l'évolution classique. Des pelouses\* à Brachypode penné persistent en effet plusieurs années (Figure 30). Cette graminée haute introduit une forte compétition pour la lumière, qui freine le développement de toute plantule ligneuse. Néanmoins, après une période de blocage apparent de plusieurs années, l'écosystème retrouve une trajectoire « normale » avec l'amorce des étapes de fruticées, voire de boisement.



**Figure 30**

Interprétation du référentiel floristique dans un modèle statistique de la dynamique successionnelle de la végétation (Alard, 2000)

Les deux trajectoires représentent les courbes enveloppant la totalité des trajectoires possibles (ajustées à l'oeil)



Des étapes de la succession\* théorique décrite précédemment sont parfois inexistantes : par exemple, passage direct de la végétation pionnière à une bétulaie\* pionnière sur carrière (Figure 10). Sur éboulis de pied de front de taille, les arbustes s'installent sans stade herbacé préalable ; ils progressent vers le centre de la carrière et ne ferment les pelouses qu'après plusieurs dizaines d'années.

Aucun principe ou explication systématique n'est proposé par les auteurs. En les rapportant, ceux-ci justifient par contre la nécessité d'un suivi, d'une surveillance des sites, voire d'interventions anthropiques\* pour éviter ces blocages de la dynamique écologique si ceux-ci paraissent contraires à l'objectif écologique fixé.

La présence d'eau, sous forme de mares plus ou moins temporaires et fossés, dans ces sites calcaires est incontestablement un facteur améliorant, catalyseur de la reprise de la nature. Elle permet en effet le développement d'espèces plus banales que les seules pionnières de milieux arides et secs. Sites d'eau permanente, mares temporaires, zones humides diversifient considérablement le type de milieux d'accueil offerts par la carrière. Ces points d'eau sont autant de sources de dissémination de la végétation vers les sols nus de manière centrifuge (Boulet, 1996).

### 1.3.10 Les limitations

Les potentialités écologiques des carrières s'expriment parfois difficilement, limitées en cela par les phénomènes suivants :

- **la fermeture rapide du milieu** : elle est favorisée par des plantations sous prétexte de verdissement pour raison paysagère ou des apports de plantes invasives (Vanpeene-Bruhier, 2003). La fertilisation par anthropisation du site ou percolation depuis les cultures alentours contribue également à accélérer la dynamique végétale et au développement des végétaux ;
- **la banalisation du milieu** : remblaiement, scarification systématique du carreau, régalage de terre végétale, fixation des éboulis, reprise des pentes... tendent à homogénéiser le site. Ces actions favorisent les plantes compétitives, sociales et envahissantes aux dépens des plantes peu communes généralement mieux adaptées aux milieux pauvres et plus sélectifs ;
- la pollution, le dépôt d'immondices, les remblais, le stockage de matériels agricoles ou de travaux publics sont des sources de **dégradation des milieux, d'introduction de plantes invasives et rudérales\*** ;
- **le tassement du sol** lié à certains usages comme un long stockage, le passage répété d'engins...

### 1.3.11 Le rôle des perturbations

Selon Frochot et al. (2000) les perturbations, évènements aléatoires pouvant modifier le milieu (gel long, inondation, fréquentation occasionnelle intense type moto-cross, effondrement de terrains, éboulement...), apparaissent comme des processus très favorables à l'intérêt écologique des carrières, en particulier pour **leur fonction rajeunissante des successions\*** et de stimulation de la productivité des écosystèmes\*. Leur influence dépend de leur nature, de leur intensité et de leur régime (périodicité...).

La richesse et l'originalité des communautés culminent relativement peu de temps après l'extraction des matériaux, puis s'abaissent et se stabilisent au fur et à mesure que les effets de cette perturbation\* initiale s'estompent. Dans les carrières en eau temporaire, l'assec périodique entretient un régime de perturbation\* intense, qui maintient régulièrement le site dans un certain état de jeunesse. En revanche, si le régime d'instabilité des fronts de taille est trop fréquent, il peut induire l'exclusion de certains lichens et mousses, même si les herbacées\* rudérales\* communes se maintiennent (Ursic *et al.*, 1997).

Durant la phase d'exploitation de la carrière, le rajeunissement des fronts de taille, les dépôts et mouvements de remblais... limitent les possibilités de développement de la végétation. Si la périodicité de ces interventions n'est pas trop rapprochée, elle peut permettre le maintien du site dans une phase pionnière\* avec implantation des espèces associées. Malheureusement, le manque d'investigations connues, portant sur des carrières en activité, ne nous permet pas d'argumenter ce point particulier.

Plus concrètement, outre la surfréquentation humaine, il ressort des travaux de Frain (1991) et Boulet (1996) deux aspects perturbants majeurs (Figure 31) :

- **Le mouvement des éboulis** qui joue un rôle de filtre à l'implantation des espèces sur éboulis mobile. Comme nous l'avons vu à de nombreuses reprises, c'est dans la plupart des situations quasi exclusivement le Bouleau qui réussit à supporter cette perturbation\*. L'implantation des autres espèces est remise en cause à chaque mouvement important du pierrier.
- Comme évoqué précédemment, l'affouillement du substrat\* et **l'abrouissement par les lapins** peuvent influencer de façon notable la dynamique de la végétation. Par exemple, le groupement\* à polytric observé sur les rochers et les fronts de taille peut parfois entraîner une situation d'impasse pour l'installation et le développement d'autres espèces (Frain, 1991). Dans ce cas, une ouverture par les lapins dans ce tapis végétal fermé peut relancer la dynamique et permettre une réinstallation de pelouses\*. Par ailleurs, la comparaison de la végétation de carrières calcaires britanniques soumises ou soustraites à l'activité des lapins a montré une action très bénéfique (au moins à court terme) de ceux-ci sur le nombre et l'abondance des plantes herbacées\* (Cullen *et al.*, 1998).

**Figure 31** Évolution et régression, un équilibre fragile du milieu (Boulet, 1996)



## SYNTHÈSE

En fin d'exploitation, la carrière, pourtant souvent aride et minérale, est **colonisée par des espèces animales et végétales pionnières**. Par leur présence, elles améliorent la capacité d'accueil du site pour les espèces à venir (développement d'un sol superficiel peu épais, fragmentation de la roche, enrichissement du sol...). Ainsi **se succèdent des stades écologiques, depuis le substrat nu jusqu'à différentes formes de boisements**. Le phénomène s'étale sur des périodes de l'ordre d'un siècle et subit parfois des **blocages liés à l'existence de facteurs limitants** (pauvreté du substrat en éléments minéraux, développement de plantes sociables...).

**Les mécanismes de cette succession\* écologique reposent avant tout sur la végétation.** D'elle dépendent en particulier la richesse, la diversité et l'originalité des peuplements faunistiques qui lui sont liés. Les facteurs marquants de la succession\* végétale soulignés par les auteurs sont **les caractéristiques du substrat, le caractère aléatoire de la colonisation des premiers stades et l'environnement de la carrière** pourvoyeur de semenciers. Les relations dynamiques au cours des différents stades de la succession\* végétale sont rarement traitées et les facteurs susceptibles d'interagir sur les trajectoires végétales (environnement de la carrière, exposition, pente, granulométrie du substrat, fracturation de la roche...) sont peu analysés.

**La diversité et l'originalité des peuplements faunistiques accompagnent en règle générale l'évolution du couvert végétal.** Elles croissent le plus souvent jusqu'au stade de pelouse\*, mais au lieu de décliner avec l'apparition des fourrés et bois, elles baissent légèrement ou se maintiennent du fait de la diversité de l'architecture végétale. Ainsi, **la réponse de la faune se cale davantage à la structuration de la végétation qu'à sa composition.**

Du point de vue des potentialités écologiques, les carrières de roches massives présentent les caractéristiques suivantes :

- La **diversité des milieux** rencontrés dans les carrières et la **diversité des contextes environnementaux** sont potentiellement les facteurs déterminants de la diversité biologique des carrières ;
- Cette diversité biologique s'interprète autant sur le plan de l'intérêt des espèces observées que sur celui de **l'originalité des processus de colonisation et des trajectoires rencontrés dans les carrières ;**
- **Les milieux nus et les biocénoses\* pionnières\*, parce qu'ils sont rares sur le reste du territoire, sont les éléments spécifiques majeurs des carrières de roches massives.**



***Partie 2 : la flore et la faune  
des carrières***

## PARTIE 2 : LA FLORE ET LA FAUNE DES CARRIÈRES

L'intérêt écologique des carrières n'est pas encore connu ou admis par tous les aménageurs et gestionnaires du territoire. Il peut pourtant atteindre des valeurs remarquables : les carrières sont souvent décrites comme des refuges d'espèces rares. Ce rôle prend de l'ampleur dans un contexte général d'appauvrissement du patrimoine naturel.

Ce chapitre tente de faire le point sur la richesse biologique des carrières en mettant notamment en exergue les principaux éléments d'intérêt patrimonial qui y ont été recensés. Il permet de donner la mesure des enjeux et du rôle que peuvent avoir ces carrières vis-à-vis du milieu naturel et de ses composantes biologiques.

Une liste exhaustive des espèces et des habitats relevés dans les sites de carrières de roches massives est cependant impossible à établir, compte tenu de leur grand nombre sur le territoire français et de la carence en observations scientifiques disponibles. Une compilation des informations fournies par la bibliographie, l'interrogation de naturalistes et l'exploitation des fichiers ZNIEFF des DIREN ont permis de dresser le constat présenté ci-après. La majorité des données recueillies sont issues de carrières calcaires, apparemment plus riches que les carrières éruptives et surtout mieux prospectées par les naturalistes.

### 2.1 LES HABITATS DES CARRIÈRES

Comme le rappellent Kovacs *et al.* (2001), le terme d'« habitat » est plus large que celui de biotope\*. Il définit les conditions de vie faites aux organismes tant au plan physique qu'au plan de la structure de la végétation. Ainsi, excepté les milieux entièrement minéraux, c'est en termes de végétation que les habitats sont le plus finement décrits et évoqués ci-après.

Depuis la roche nue jusqu'aux boisements, toutes les formations végétales sont envisageables en carrières, sans oublier les milieux aquatiques et humides (même si ces derniers sont rarement cités dans la littérature relative aux carrières calcaires). Cependant, établir un bilan de la diversité des formations végétales rencontrées en carrière reste difficile en raison de l'**absence de travaux de synthèse sur ce sujet**.

#### 2.1.1 Les formations végétales

Les cortèges\* floristiques sont affectés par la nature de la roche mère et répondent directement aux propriétés acides des roches, puis des sols et de l'eau qui en découlent (Boulet, 1996). Dans sa thèse, cet auteur distingue très nettement les groupements\* floristiques de nature acidiphile\* (pelouses\* sur silice, landes\*...), se développant dans les carrières de schiste, de grès ou de granite, de ceux nettement plus calcicoles\* (fourrés\*, prairies\*, pelouses\* calcicoles\*) se développant dans des carrières de nature calcaire. Certains groupements\* restent pourtant indifférents à l'acidité ou à l'alcalinité, ce sont des groupements\* rudéraux\* et arborés pionniers\*.

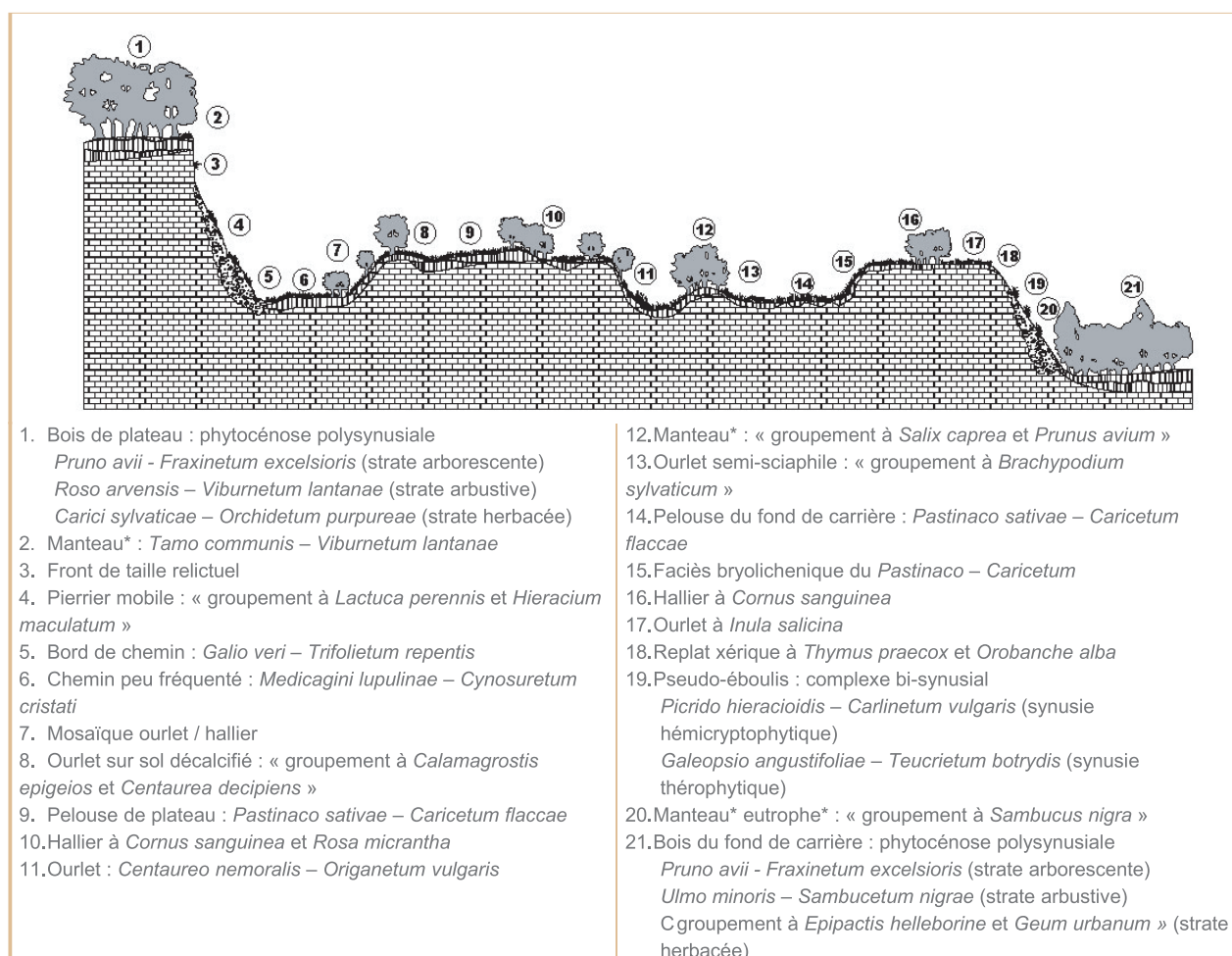


### 2.1.1.1 Les formations végétales calcaires

Les seules approches qui ont trait à ces formations s'appuient sur des études locales ou régionales (Decocq, 1994 ; Brunaud, 1997a). Ces études laissent entrevoir des potentialités et une grande richesse en habitats.

Sur quatre anciennes carrières de craie phosphatée du nord de la France dont la fin d'exploitation remonte à plus de soixante ans, Decocq (1994) a recensé un nombre important de groupements végétaux\* par rapport à la surface totale étudiée (au moins 25 associations végétales et groupements se rattachant à une douzaine d'alliances phytosociologiques\*). L'essentiel des groupements identifiés se rapporte soit à des formations végétales pionnières de type éboulis, soit à des pelouses\*. Cette richesse des carrières de craie est liée à la diversité topographique comme l'illustre le transect de la carrière de Faucouzy (Figure 32), induisant des conditions de milieux variées sur des distances réduites. L'action de l'homme, le pâturage par des animaux domestiques mais aussi sauvages (lapins) ont eu un rôle important dans le maintien des stades herbacés et donc dans la diversité constatée des formations végétales.

**Figure 32** Colonisation naturelle de la carrière de Faucouzy (02)  
(Decocq, 1994)



D'autres travaux réalisés sur des substrats calcaires très différents (calcaires récifaux, oolithique, bioclastiques, dolomitiques...), tels ceux réalisés par Brunaud (1997a) sur les anciennes carrières de Bourgogne ou par ENCEM (2001b) sur des sites ponctuels, aboutissent à un constat similaire.

Les habitats mésophiles\* à xérophiles sont majoritairement représentés avec des falaises, des chaos rocheux grossiers, des pelouses\* et des friches de toutes natures et en diverses situations topographiques, des fourrés, des manteaux\* forestiers ainsi que des boisements. Ces derniers sont relevés dans les carrières les plus anciennes, en général sur des remblais de carrières de pierre de taille (ENCEM, 2001a ; Millarakis & Parent, 1995).

Parmi les habitats floristiques décrits dans les quelques travaux traitant des formations végétales rencontrées en carrières calcaires, **certain retiennent l'attention en raison de leur caractère remarquable**. Des groupements\* végétaux d'un grand intérêt écologique sont ainsi décrits en carrières calcaires par Decocq (1994) :

• **Éboulis crayeux de basses altitudes du *Leontodontion hyoseroidis*** Duvigneaud, Durin & Mullenders 70

Ce groupement d'origine périglaciaire est d'intérêt phytogéographique majeur. Caractéristique du nord de la France, il est présent à l'état naturel en vallée de la Meuse, de la Marne, de la Seine, de l'Oise et en Bourgogne. Il se singularise par sa flore hautement spécialisée avec notamment quatre plantes endémiques de haut intérêt patrimonial : *Iberis violetii*, *Iberis durandii*, *Viola cryana* (plante considérée aujourd'hui comme disparue), *Viola hispidula*.

En carrières calcaires, ce groupement est cité à deux reprises au moins sur des éboulis dits « secondaires » (dérivés d'interventions humaines), d'une part sur d'anciens terrils de découverte marnocalcaire dans les carrières de pierre de taille d'Euville en Lorraine (ZNIEFF n° 0002-0083) où il est fragmentaire, d'autre part dans les anciennes carrières de craie du nord de la France à Eclusier (80) et Faucouzy (02) (Decocq, 1994).

Sur le plan patrimonial, Decocq (1994) souligne le double intérêt de tels éboulis secondaires. Ils offrent des **milieux potentiels de substitution pouvant servir de refuge à la flore endémique des éboulis primaires, habitat souvent menacé dans ses milieux d'origine par leur fermeture**. Les particularités stationnelles qui y règnent (forte pente et xéricité, mobilité conservée par érosion et une pente forte, texture grossière du substrat, isolement génétique de la station) pourraient également être génératrices d'endémisme, à l'image des éboulis primaires.

• **Pelouses\* calcicoles\* sèches du *Mesobromion erecti*** Br.-Bl. & Moor 38

Généralement issues d'anciens pacages, ces pelouses constituent un habitat d'intérêt communautaire inscrit à l'annexe 1 de la directive Habitats et sont prioritaires si elles sont riches en orchidées.

Nombre de pelouses décrites en carrières calcaires sous des vocables aussi divers que pelouse\* sèche, pelouse\* calcicole\*, pelouse\* à orchidées, pelouse\* mésoxérophile\*, sans plus de précision dans les fiches ZNIEFF, peuvent être assimilées à un tel habitat (Figure 33). Des observations de terrain montrent en effet qu'elles peuvent s'en rapprocher par leur cortège floristique, leur richesse en orchidées et leur physionomie. Mais dans la plupart des cas, le fond floristique est dominé par un lot de plantes de friches favorisées par les sols perturbés. Sur certains sites, d'authentiques pelouses\* calcicoles\* du *Mesobromion* sont cependant notées (Decocq, 1994). Dans les anciennes carrières de craie phosphatée de la vallée de la Somme à Hardivillers (60) et Eclusier (80), Decocq décrit deux associations au moins du *Mesobromion erecti* :

- pelouse de l'*Avenulo pratensis* – *Festucetum lemanii* (Boullet 80) Boullet & Géhu 84 ;
- pelouse du *Rumici acetosae* – *Seslerietum albicantis* (Stott 1975) Boullet 86.

Cette dernière, particulièrement intéressante, représente un habitat endémique de la vallée de la Somme, aux affinités sub-montagnardes. Selon l'auteur, son développement aurait été facilité par la proximité d'un milieu source.

**Figure 33**

Exemple d'une pelouse sèche à Brome érigé en carrière  
(Photo ENCEM)

Pelouse\* à Brome érigé âgée de moins de vingt ans dans une carrière de calcaire jurassique du nord de la Lorraine. Sur la droite, la présence d'un grillage en rebord de front laisse penser que ce site a été parcouru par des moutons.



### 2.1.1.2 Les formations végétales éruptives

Les études de Boulet (1996, 1999) et Chépeau (1981) constituent, à notre connaissance, les seuls travaux d'ampleur réalisés sur un ensemble de carrières du Massif armoricain.

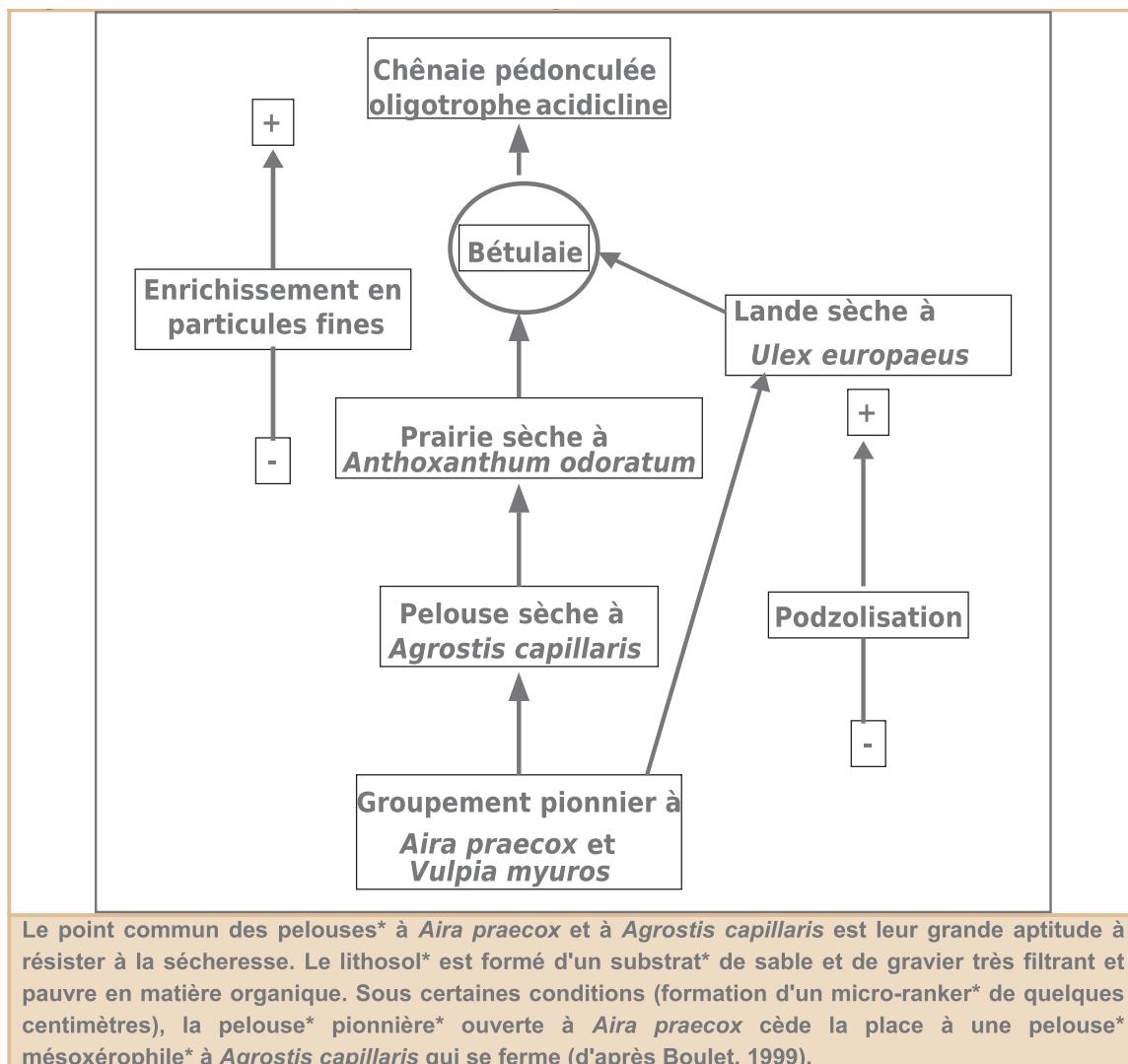
Boulet (1996) a notamment étudié quarante carrières de roches massives acides sèches (grès, schiste, granite) de Basse-Normandie armoricaine, pour lesquelles il a pu identifier un nombre important de groupements\* végétaux (14) par rapport à la surface totale prospectée. Cela est lié à la **diversité topographique des carrières et à l'hétérogénéité des substrats\*** qui induit à quelques mètres près des conditions écologiques très différentes (Boulet, 1999 ; Chépeau, 1981). Des groupements\* xérophiles\* et des groupements\* hygrophiles\* peuvent se côtoyer sur un même site de quelques hectares.

Des études plus ponctuelles, telles que celles d'ENCEM (1997) et de Dupont (1992) sur des carrières qui se distinguent des précédentes par la présence d'eau, confirment cette **diversité des habitats sur un espace restreint** (chênaie-hêtraie, dépressions tourbeuses, chaos rocheux humides, suintements, prairies\* humides).

On retiendra plus particulièrement des travaux de Boulet (1999) : les anciennes aires de stockage des graviers et des sables des carreaux\* de carrières permettent l'installation successive de pelouses\* acidiphiles\* remarquables telles que les associations à Canche précoce (*Aira praecox*) et à l'Agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) (Figure 34).

On notera qu'aucun groupement\* décrit par l'ensemble de ces auteurs n'est assimilable à un habitat d'intérêt communautaire. En effet, leur description ne semble pas correspondre à l'un de ceux repris par l'annexe I de la Directive «Habitats», comme par exemple : «Formations\* herbacées\* mésoxéroclines sur silice à *Nardus stricta* et riches en espèces» ou «Végétations chasmophytiques des pentes rocheuses ; les sous-types silicoles». La recherche d'une éventuelle correspondance entre les habitats répertoriés dans les carrières et ceux de l'annexe I de la Directive «Habitats» reste à faire de manière plus précise.

**Figure 34** Évolutions possibles de la végétation sur carreaux\*



## 2.2 LA FLORE DES CARRIÈRES

### 2.2.1 Les végétaux non vasculaires et les organismes fongiques

Les végétaux non vasculaires sont les végétaux dits inférieurs. Ils regroupent les algues et les mousses. Avec les organismes fongiques tels que les champignons et les lichens, ils jouent un rôle fondamental dans les fonctionnements des écosystèmes. Par exemple, en colonisant les rochers, les lichens pionniers\* préparent le substrat aux végétaux qui leur succéderont ; avec les algues et mousses, ils contribuent à relarguer des éléments minéraux dans leur environnement et sont broutés par des consommateurs primaires comme les escargots pionniers\* ; les champignons participent à la décomposition de la matière organique des litières et assurent grâce aux associations mycorhiziennes un meilleur développement des végétaux supérieurs.

La relative discrétion de ces végétaux et champignons, leur méconnaissance et le nombre réduit de spécialistes les étudiant expliquent sans aucun doute la rareté de leurs citations dans les études. Celles-ci sont trop peu nombreuses et trop partielles pour en tirer des enseignements.

### 2.2.1.1 Calcaire

Sur les sites de craie phosphatée du nord de la France, Decocq (1994) se limite à l'énoncé des principales bryophytes (mousses et hépatiques), sans en analyser les peuplements.

Les travaux les plus approfondis sont ceux de Lecointe (1979, 1993). L'auteur a étudié la flore muscinale et leurs groupements dans les carrières jurassiques d'Orival en Basse-Normandie. Il y a recensé 102 espèces de mousses et d'hépatiques sur une surface de moins de 10 ha, dont 22% d'éléments méditerranéens. Parmi ces espèces, trois étaient nouvelles pour la région à l'époque de l'étude et une dizaine d'autres étaient rares à très rares. Il a également décrit un groupement remarquable inféodé aux replats calcaires ombragés, frais à suintants, similaire à ceux rencontrés dans le sud de la France et en Espagne.

Il met en évidence le caractère exceptionnel de ce site, exprimant l'éventail des biotopes\* disponibles. La diversité des micro-habitats se révèle ainsi comme un facteur déterminant pour des végétaux de petite taille comme les mousses qui peuvent se développer de manière sélective.

### 2.2.1.2 Éruptif

Ces carrières abritent aussi bien des bryophytes\* (type *Racomitrium lanuginosum*, *Racomitrium heterostichum*, *Polytrichum juniperinum*, *Racomitrium canescens* ou *Polytrichum piliferum*...) que des lichens saxicoles\* (type *Xanthoria parietina*, *Rhizocarpon* sp., foliacés type *Evernia prunastri*, *Parmelia caperata*, *Anaptychia ciliaris*...) ou encore terricoles (*Cladonia fimbriata*, *C. subulata*, *C. pyxidata*...). Frain (1991) observe également des colonies de lichens (type cladonies : *Cladonia subulata*, *C. fimbriata*, *C. major*...) plus ou moins imbriquées avec des tapis de mousses (polytrics), dans des carrières du Limousin.

Au sein des groupements qu'ils constituent, apparaissent parfois des taxons peu communs, tel *Ditrichum lineare*, mousse observée pour la première fois en Normandie dans la carrière de grès de la Grande Noée (50).

## 2.2.2 Les végétaux vasculaires

Les végétaux vasculaires regroupent les plantes dites supérieures : les fougères et les plantes à fleurs (conifères et angiospermes). Au contraire des précédents, ces végétaux sont bien connus des naturalistes et sont de fait au centre de la plupart des références consultées.

### 2.2.2.1 Calcaire

Les carrières calcaires accueillent **une diversité floristique remarquable**. Les milieux ont des **potentiels d'accueil très variables pour les espèces à forte valeur patrimoniale** : de remarquable, voire exceptionnel (pierriers), à très faible (falaises).

Si ENCEM (2001), s'appuyant notamment sur les travaux de Boulet (1996), déplore la relative pauvreté floristique des carrières siliceuses du Massif armoricain (cf. chapitre suivant), il semble qu'il en aille autrement pour leurs homologues calcaires. L'analyse des documents disponibles met en lumière une richesse floristique significative, notamment du point de vue des espèces à forte valeur patrimoniales.

En Bourgogne, l'étude des carrières calcaires sèches abandonnées (Brunaud, 1997a) a permis de dresser une liste de 390 plantes environ. Dans les carrières de craie phosphatée, près de 250 espèces végétales sont recensées (Decocq, 1994). En l'absence de synthèse, ces quelques bilans sur la **diversité floristique** restent peu significatifs. Ils sont hétérogènes, reposant sur des méthodologies d'inventaire différentes, des approches et des objectifs variés.

Sur **le plan patrimonial**, les carrières calcaires révèlent un potentiel floristique élevé. L'environnement sélectif de certains habitats (éboulis, rocaïles...) apparaît comme primordial pour plusieurs de ces espèces. L'intérêt de ces plantes repose principalement sur un critère de rareté, lié à une faible fréquence d'ensemble, à une limite d'aire chorologique ou à un nouveau poste avancé d'une aire de répartition. Les plantes décrites ci-après sont présentées par type de milieux dans la carrière.



## ► Les plantes des falaises

En conditions naturelles, les habitats de falaises calcaires sont des hauts lieux de la botanique, réputés pour leurs espèces remarquables, rares ou menacées. En carrières calcaires, bien que l'habitat rupestre\* soit bien représenté, ce potentiel floristique ne semble pas s'exprimer. Peu de citations y signalent la présence d'une flore rupestre\*. Celle-ci est souvent constituée de plantes ubiquistes et banales des pelouses\* et habitats secs et rocaillieux, et dont l'implantation est favorisée par la proximité d'un milieu source sur la partie supérieure des fronts (Mignotte, communication orale).

Hormis le cas de quelques fougères rares sur d'anciennes carrières de Champagne-Ardenne (Millarakis & Parent, 1995), la flore saxicole\* semble donc faire défaut. Ce fait est surtout marquant dans des régions de falaises à fort potentiel comme les Alpes, les Grands Causses, la côte de Bourgogne, la basse vallée de la Seine, la région méditerranéenne. Cette absence ne trouve pas de réponse dans la bibliographie.

Des explications peuvent être avancées comme l'origine et l'ancienneté de la flore des falaises (reliques glaciaires pour un grand nombre), la spécificité des plantes qui s'y développent (développement lent, processus de dissémination...), la stabilité du substrat. Nombre de carrières sont par ailleurs des systèmes clos réduisant certainement l'aptitude à l'installation de ce genre de plante (Dejean, communication orale).

## ► Les plantes des rocailles, des pierriers et des éboulis

Les milieux concernés sont fortement minéraux, en général pentus et escarpés. Ils sont hérités des fronts, des chanfreins<sup>5</sup>, des talus taillés dans la masse ou issus de remblaiements et d'autres surfaces minérales. Ils sont parfois sujets à des phénomènes de rajeunissement lorsque la roche est friable (craies, marnes...), par le jeu de l'érosion différentielle entre des bancs compacts et des bancs plus friables ou dans le cas des terrils de découverte pentus. Ils peuvent se comporter dans ce cas tels des éboulis. Les pistes et autres surfaces techniques apparentées sont aussi parfois concernées.

Ces différentes zones de la carrière sont des milieux xérophiles et thermophiles\*, refuges d'une flore pionnière méditerranéenne ou méditerranéo-montagnarde comme le montrent les études des carrières de Bourgogne par Brunaud (1997a) et Frochot et al. (2000). Elles ont mis en évidence le fort potentiel d'accueil pour des espèces végétales pionnières des milieux secs, et ceci en l'absence de tout aménagement.

Les quelques exemples qui suivent donnent un aperçu du caractère remarquable, voire exceptionnel de ces biotopes\*.

- **Genêt hérisson** (*Cytisanthus horridus*) : plante ibérique des montagnes calcaires, très rare en France, protégée à l'échelle nationale. Elle est présente sur les rocailles des carrières de Couzon-au-Mont-d'Or et d'Albigny dans le Lyonnais, site inscrit en ZNIEFF (ZNIEFF n° 6909-2201) et unique station de la plante en Rhône-Alpes.
- **Ptychotis à feuilles variées** (*Ptychotis saxifraga*) : plante des rocailles méridionales, très rare dans le nord de la France où elle atteint la limite septentrionale de son aire de répartition. Elle possède en Lorraine son unique station sur des terrils de découverte calcaire d'une carrière de pierre de taille en activité à Euville. Elle est également citée en Champagne-Ardenne sur des talus d'une ancienne carrière à Aubepierre-sur-Aube. Ces deux sites de carrières sont classés en ZNIEFF (respectivement ZNIEFF n° 0002-0083 et ZNIEFF n° 0000-0479).
- **Oseille à feuilles rondes** (*Rumex scutatus*) : plante caractéristique des éboulis calcaires, commune dans le Sud et les zones de montagne, mais rare dans le nord de la France : elle est notée dans quelques carrières de Bourgogne, de Champagne-Ardenne, de Franche-Comté, du Nord-Pas-de-Calais.
- **Hélianthème à feuilles de marum** (*Helianthemum marifolium*) : plante ibérique très rare en France, localisée aux Bouches-du-Rhône, protégée à l'échelle nationale. Elle est observée dans une ancienne carrière de la région de Marseille (Vella, communication orale).
- **Sabline de Provence** (*Gouffeia arenarioides*) : plante endémique des rocailles et éboulis provençaux entre Marseille et Toulon, protégée à l'échelle nationale et inscrite à l'annexe n° 2 de la directive Habitats. Elle a été observée dans une ancienne carrière de la région d'Aix-en-Provence (Vella, communication orale).

<sup>5</sup> Chanfrein : surface oblique obtenue par l'abattage de l'arête des rebords de fronts et de gradins.

- **Sisymbre couché** (*Sisymbrium supinum*) : petite annuelle pionnière des grèves et sols frais calcicole, rare et protégée en France, visée par l'annexe n° 2 de la directive Habitats (Figure 35). Plusieurs carrières en activité ou abandonnées, de craie, de marnes et de calcaires marneux du nord de la France sont des sites refuges de grand intérêt : carrière de Guerville, station unique en Île-de-France, située en limite ouest de son aire de répartition (ENCEM, DIREN Île-de-France, communications orales), ancienne carrière de craie phosphatée de Faucouzy en Picardie (Decocq, 1994), carrière dans le Boulonnais (ENCEM, communication orale), deux carrières de craie de la région de Reims (ENCEM, communication orale).

**Figure 35**

**Sisymbre couché** (*Sisymbrium supinum*)  
(photos ENCEM)

Espèce protégée en France et inscrite à l'annexe 2 de la directive Habitats. Deux exemples de biotopes\* en carrière, en haut à droite front d'une carrière de craie dans le nord de la France, en bas à gauche carreau frais exposé nord sur calcaire marneux et abord de piste en Île-de-France.



- **Sabline des chaumes** (*Arenaria controversa*) : annuelle pionnière des sols caillouteux et des éboulis, endémique de l'ouest de la France et protégée à l'échelle nationale. Elle est présente parfois en abondance dans plusieurs carrières calcaires du Centre-Ouest de la France (note communiquée par le Conservatoire botanique national du Bassin parisien ; ENCEM, communication orale).
- **Iberis à feuilles de lin** (*Iberis linifolia*) : plante provenço-ligure inféodée aux éboulis et rocailles calcaires et protégée en région PACA. Elle est favorisée par la mise à nu de la roche dans une carrière provençale (Rimey, communication orale).

#### ► Les plantes des pelouses calcaires

Les surfaces planes des carreaux et des gradins, les éboulis anciens ou les talus modérément pentus sont peu à peu colonisés par des groupements herbacés de type pelouse\* ou garrigue. Par rapport aux plantes des rocailles et des éboulis évoquées précédemment, les plantes remarquables recensées ici possèdent pour la plupart un intérêt patrimonial moindre. Elles sont assez rares à rares selon la région considérée, une partie d'entre elles possède un statut de protection régionale, plus rarement nationale :

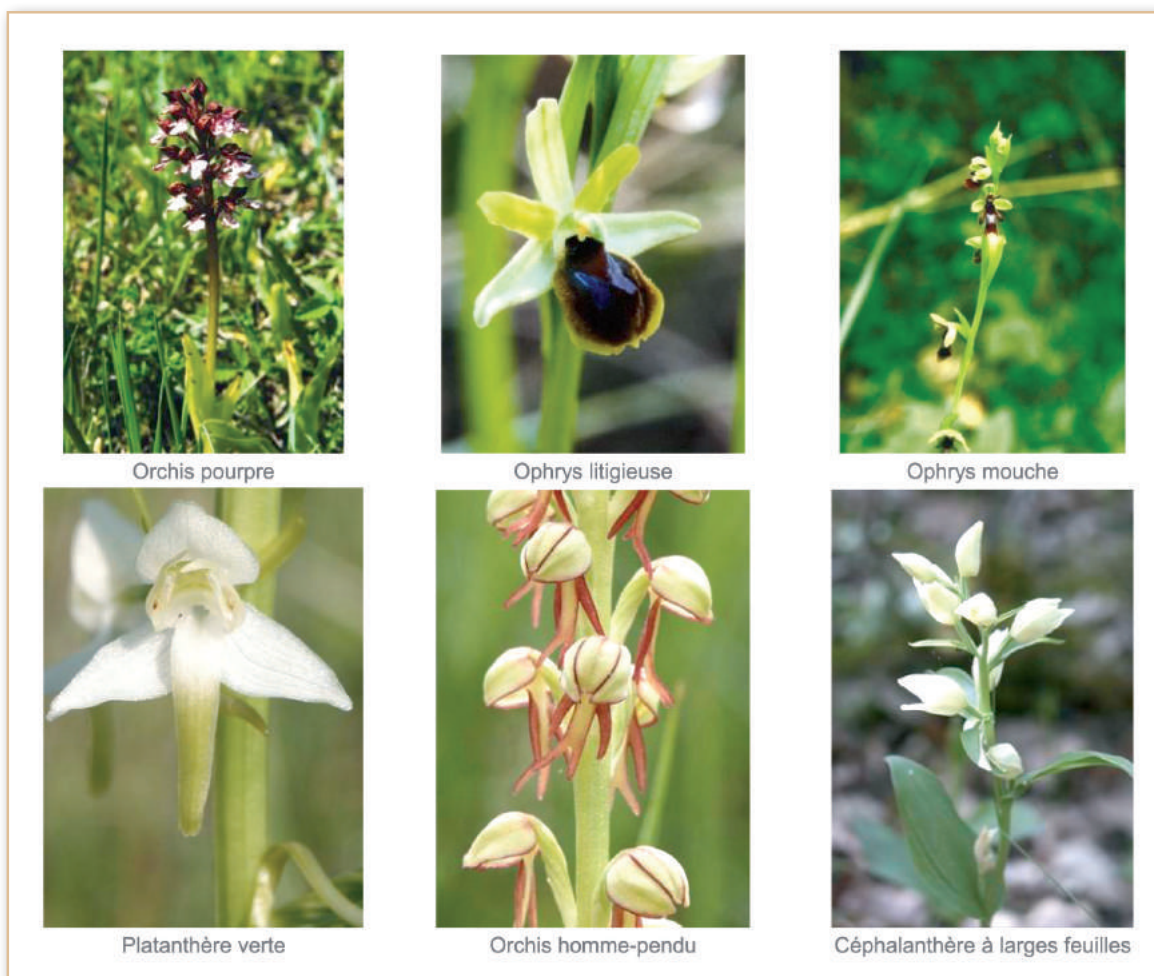
- **Inule à feuilles de saule** (*Inula salicina*) et **Seslérie bleue** (*Sesleria caerulea*), plantes rares dans le Nord, notées dans l'ancienne carrière de phosphate de Faucouzy en Picardie (Decocq, 1994).

- **Gentiane ciliée** (*Gentianella ciliata*) : dans une ancienne carrière à Bainville-sur-Madon et sur les surfaces planes d'un terroir de découverte calcaire des carrières d'Euville en Lorraine (ENCEM, communication orale).
- **Lin français** (*Linum leonii*) : plante rare en France recolonisant des pelouses\* de la carrière de la Chalandrue en Bourgogne (Cuénot, communication orale). Dans cette région, d'autres espèces rares des pelouses\* sèches sont citées par Brunaud (1997a) dans diverses anciennes carrières comme la **Carline acaule** (*Carlina acaulis*), le **Chardon à pédoncule nu** (*Carduus defloratus*), la **Coronille couronnée** (*Coronilla coronata*).
- **Phalangère faux-lis** (*Anthericum liliago*) : sur les versants bien exposés de l'ancienne carrière d'Aubepierre-sur-Aube en Champagne-Ardenne (ZNIEFF n° 0000-0479).
- **Raiponce délicate** (*Phyteuma tenerum*) : donnée dans l'ancienne carrière d'Orival en Normandie (Lecointe, 1993).
- **Odontite de Jaubert** (*Odontites jaubertiana*) : plante endémique du Centre-Ouest de la France, protégée à l'échelle nationale, trouvant des habitats de substitution dans diverses carrières de la région de Poitiers (ENCEM, communication orale ; Maubert, à paraître).
- **Lepture cylindrique** (*Lepturus cylindricus*) : plante méridionale citée dans une carrière de Charente à Aigre.
- **Orchidées diverses** : plus que la présence de telle ou telle espèce d'orchidée, c'est leur abondance en un lieu qui est souvent considérée comme intéressante (Figure 36). Plusieurs carrières du nord de la France sont ainsi citées pour leur richesse en orchidées en Champagne-Ardenne (Millarakis & Parent, 1995), en Lorraine (ZNIEFF ; ENCEM, 2001b et communication orale), en Nord-Pas-de-Calais (Conservatoire des sites du Nord et du Pas-de-Calais, 2003 ; Decocq, 1994), en Basse-Normandie (Lecointe, 1993 ; Rioult *et al.*, 2002), dans le centre de la France (Maubert, à paraître)...
- **Hélianthème à feuilles de saule** (*Helianthemum salicifolium*) : plante méditerranéenne, citée de longue date dans une ancienne carrière du Loir-et-Cher (Maubert, à paraître).



**Figure 36**

Quelques orchidées relevées en carrières calcaires  
(photos ENCEM)



### ► Les messicoles

Plusieurs messicoles et adventices des cultures sur sols calcaires sont en forte régression sur le territoire national avec le développement de l'agriculture intensive. À la faveur des sols peu épais et de milieux où la concurrence végétale est modérée, certaines carrières calcaires peuvent se comporter comme des zones refuges de premier ordre pour des espèces comme l'**Herniaire glabre** (*Herniaria glabra*), la **Germandrée botryde** (*Teucrium botrys*), la **Calépine irrégulière** (*Calepina irregularis*), la **Vesce de Hongrie** (*Vicia pannonica*), la **Fumeterre de Vaillant** (*Fumaria vaillanti*).... L'importance de ce rôle est soulignée par Decocq (1994) et Thievent (1993a).

### ► Les plantes des fourrés et des bois

Les milieux fermés tels que les bois et les fourrés colonisant les parties les plus anciennes des carrières sont rarement cités comme milieux d'intérêt floristique, au contraire des milieux ouverts évoqués dans les passages précédents. Les espèces patrimoniales relevées sont peu nombreuses :

- **Alisier à larges feuilles** (*Sorbus latifolia*) : arbre endémique du centre de la France, rare et protégé à l'échelle nationale, donné dans l'ancienne carrière d'Orival, en Basse-Normandie, site protégé par arrêté de protection de biotope (Lecointe, 1993 ; Rioult *et al.*, 2002).
- Fougères diverses : les anciennes carrières boisées de la forêt de Morley en Meuse sont à l'origine d'une grande diversité en fougères. Quinze espèces y sont recensées dont certaines très rares dans la région comme la **Capillaire verte** (*Asplenium viride*) et l'**Ophioglosse commune** (*Ophioglossum vulgatum*) alors que le reste du massif boisé abrite au plus trois espèces banales (Millarakis & Parent, 1995).

- **Pyroles** diverses : les pyroles sont des plantes d'ombre peu communes à rares en plaine. Deux espèces sont observées dans des boisements sur quelques anciennes carrières en Bourgogne et Lorraine (ENCEN, communication orale et 2001a ; Floraine, 2003).

### ► Les plantes de milieux humides

Les milieux humides sont occasionnels en carrière calcaire et toujours peu étendus. Selon la configuration géologique, des couches marneuses imperméables (plancher d'un aquifère), peuvent favoriser la formation de milieux aquatiques dont la constance est susceptible de former des mares permanentes et des marais de type alcalin. C'est ainsi que quelques plantes remarquables sont relevées, enrichissant notablement le potentiel floristique des carrières calcaires :

- **Gentiane des marais** (*Gentianella uliginosa*) : plante rare et protégée en France, inféodée aux pelouses\*calcaire humides, citée dans l'ancienne carrière d'Orival en Normandie (Lecointe, 1993 ; Rioult *et al.*, 2002).
- **Epipactis des marais** (*Epipactis palustris*) : orchidée des marais alcalins, présente dans une ancienne carrière du Nord-Pas-de-Calais (Conservatoire des sites du Nord et du Pas-de-Calais, 2003), en Ardenne (Peresson & Grangé, 2000), dans la région d'Angoulême (ENCEN, communication orale).
- **Fougère des marais** (*Thelypteris palustris*) : notée dans une ancienne carrière de chaux en Ardenne (Peresson & Grangé, 2000).

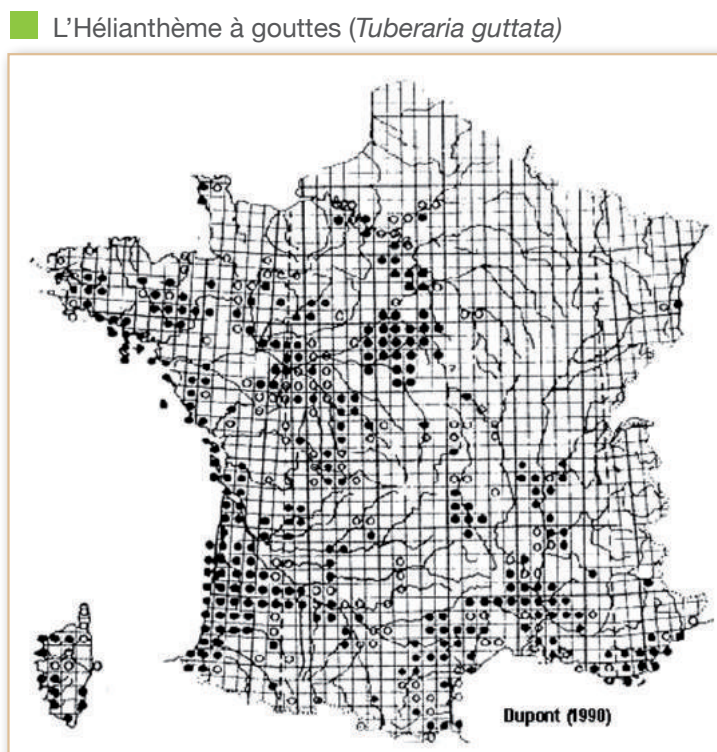
#### 2.2.2.2 Éruptif

Boulet (1996) n'a rencontré qu'un lot floristique assez pauvre sur l'ensemble des carrières armoricaines qu'il a étudié. Pour cet auteur, cette pauvreté peut s'expliquer, soit par le caractère très particulier et la fréquente dégradation des milieux étudiés, soit parce que les carrières font l'objet de nombreux dépôts en tous genres, soit parce qu'elles sont trop souvent visitées.

**Figure 37** L'Hélianthème à gouttes, *Tuberaria guttata*  
(Photo ENCEM)



D. Voeltzel





C'est aussi un environnement très sélectif, qui ne retient que les espèces adaptées à de telles conditions, difficiles dans l'ensemble. Chépeau (1981) ajoute que les anciennes carrières de Loire-Atlantique sur sol siliceux présentent généralement une flore assez banale en raison de l'abondance de ces terrains dans la région. Néanmoins, Boulet (1996, 1999) souligne que pour la Basse-Normandie, parmi tous les groupements\* végétaux qu'il a étudiés, les pelouses\* acidiphiles\*, héliophiles\* et xérophiles\* présentent des taxons\* peu communs dans la région :

- **L'Hélianthème à goutte** (*Tuberaria guttata*), (Figure 37), est une espèce protégée en Basse-Normandie. Selon Provost (1993), elle est devenue très rare et ne se rencontre plus que sur les falaises littorales de l'ouest du Cotentin.
- **Le Millepertuis à feuilles linéaires**, (*Hypericum linarifolium*) peut parfois coloniser des fronts de taille ou des éboulis à fort ensoleillement.

Diverses mentions d'espèces remarquables ont été notées dans les carrières du Massif armoricain :

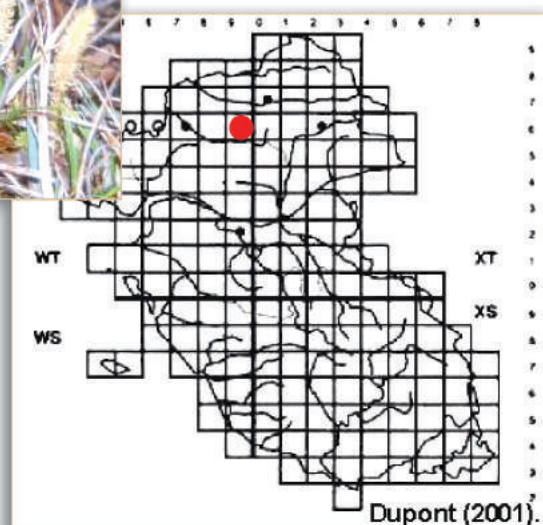
- **L'Andryale sinueuse** (*Andryala integrifolia*) est une espèce méridionale en nette expansion vers le Nord-Ouest dont la présence est notée par Chépeau (1981) dans les carrières sèches de Loire-Atlantique.
- Le **Jonc nain** (*Juncus pygmaeus*), l'**Illecèbre verticillé** (*Illecebrum verticillatum*), la **Sabline des montagnes** (*Arenaria montana*), l'**Hélianthème à gouttes** (*Tuberaria guttata*) et le **Millepertuis à feuilles linéaires** (*Hypericum linarifolium*) figurent sur la liste des espèces menacées en Pays de la Loire. Leur présence est notée par A. Lachaud & J.Y. Bernard (com. pers.) lors d'inventaires effectués en 2001 dans l'ancienne carrière de Sandun (44).
- Le **Lycopode des tourbières\*** (*Lycopodiella inundata*), Figure 38, est mentionné par Dupont (2001) dans une carrière de Loire-Atlantique, ce site représentant actuellement la seule station\* connue de cette espèce protégée dans le département.

**Figure 38** Distribution de *Lycopodiella inundata*  
(Photo ENCEM)



G Paillat

Distribution du Lycopode des tourbières *Lycopodiella inundata* en Loire-Atlantique et Vendée. Le rond rouge représente la station actuelle (postérieure à 1980) et ceux de plus petite taille représentent les stations connues avant 1950.



- Le **silène de Bastard** (*Silene maritima* var. *bastardii*). En Vendée, Dupont (1992) note sa présence sur le bas de la falaise de «la petite carrière» du site de Cheffois. Cette espèce de grand intérêt s'est maintenue sur le reste de l'ancienne crête et a entamé un processus de recolonisation sitôt l'arrêt de l'exploitation du site.

- L'ancienne carrière de Villepail en Mayenne constitue l'une des carrières les plus intéressantes du Massif armoricain. Son carreau\* a évolué vers une tourbière\* comprenant quatre plantes protégées : deux au niveau national (le **Rossolis à feuilles rondes**, *Drosera rotundifolia*, le **Lycopode des tourbières\***, *Lycopodiella inundata*) et deux au niveau régional (le **Narthécie des marais**, *Narthecium ossifragum*, la **Grassette du Portugal**, *Pinguicula lusitanica*) et de nombreuses espèces typiques de tourbières\*. L'ensemble de ces observations a justifié l'inscription du site en arrêté de biotope et la délimitation d'une ZNIEFF.
- Le carreau humide de la carrière du Puits d'Enfer, sur la commune d'Exireuil (79), est colonisé par le **Spiranthe d'été** (*Spiranthes aestivalis*), petite orchidée protégée au niveau national et en forte voie de raréfaction (ENCEN, communication orale). On y observe également deux espèces figurant sur la liste rouge de la flore menacée en Poitou-Charentes : le **Saule rampant** (*Salix repens*) et l'**Epipactis des marais** (*Epipactis palustris*).

## 2.3 LA FAUNE DES CARRIÈRES

La singularité de la topographie, de la nature des substrats\*, du microclimat et des conditions de quiétude qui se rencontrent souvent dans les sites de carrières permet leur colonisation par une faune parfois remarquable. Les carrières peuvent alors, sous certaines conditions, constituer des sites essentiels pour le maintien de certaines espèces. Sauf mention particulière dans le texte, la faune des carrières calcaires et éruptives ne semble pas différer fondamentalement.

### 2.3.1 Les invertébrés

Plus ou moins bien connus et très nombreux, les invertébrés sont encore assez peu étudiés par les naturalistes et les scientifiques, surtout en milieu artificiel. Les données se rapportant à ces animaux sont de fait peu nombreuses et ne traitent que certains groupes en fonction des spécialistes disponibles : mollusques (escargots, limaces...), hyménoptères (guêpes, abeilles...), coléoptères (scarabées, coccinelles...), orthoptères (criquets, sauterelles, grillons...), lépidoptères (papillons).

En l'état actuel des connaissances, il n'est donc pas possible de dresser un tour d'horizon assez complet des peuplements d'invertébrés se rencontrant en carrières. Les données qui suivent s'appuient sur de rares travaux tels ceux de Robert (1984 in Sauveterre, 1985) en Franche-Comté et Thion (1984 in Sauveterre, 1985) dans la région marseillaise, repris par Sauveterre (1985) dans sa synthèse sur l'évaluation des potentialités écologiques des carrières après exploitation. Celui-ci souligne la grande richesse en invertébrés des carrières abandonnées (Tableau 10).

| Tableau 10 Nombres d'invertébrés mentionnés dans les carrières calcaires (Sauveterre, 1985) |              |                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| RÉGION                                                                                      | JURA         | MÉDITERRANÉE                       |
| Mollusques                                                                                  | 12 espèces   | 14 espèces                         |
| Arachnides                                                                                  | -            | 27 espèces                         |
| Myriapodes                                                                                  | -            | 38 espèces                         |
| Insectes                                                                                    | Hyménoptères | 55 espèces aculéates               |
|                                                                                             | Coléoptères  | 70 espèces                         |
|                                                                                             | Lépidoptères | 28 espèces (nocturnes non étudiés) |
|                                                                                             | Collembolés  | 2 espèces                          |
|                                                                                             | Orthoptères  | 23 espèces                         |
|                                                                                             | Hétéroptères | 11 espèces                         |
|                                                                                             | Hémiptères   | 6 espèces                          |
|                                                                                             | Divers       | 19 espèces                         |

### ► Les gastéropodes

Consommateurs primaires, ils apparaissent dès la colonisation des surfaces minérales par les lichens et les algues. Ils sont d'autant plus nombreux que la carrière est âgée et que les parois rocheuses disposent d'anfractuosités et de niches écologiques variées.

Dans les carrières du Jura, des espèces thermophiles\* rares ou méconnues investissent ces milieux favorables comme *Trochoidea geyeri* et *Monocha cantiana* (Robert, 1984 in Sauveterre, 1985). Dans certaines régions au taux d'endémisme élevé comme les Pyrénées ou les Alpes ligures, les carrières peuvent présenter un enjeu majeur pour des espèces inféodées aux falaises et aux rocailles (Bertrand, communication orale), mais aucune étude ne semble avoir été réalisée à ce jour.

## ► Les insectes

Les insectes occupent **la plupart des niches écologiques** d'une carrière, depuis les stades pionniers\* des dalles calcaires jusqu'aux stades buissonnants et forestiers plus évolués. Leur **diversité est étroitement liée à celle des végétaux**, dont ils dépendent pour une majorité d'entre eux, aussi bien à l'état larvaire qu'au stade adulte (insectes phytophages, floricoles). Ainsi, la variété des micro-habitats est une des clés de la richesse entomologique (Burle, communication orale ; UEF & AIDEC, 1998 ; Brown, 1982 et 1984...).

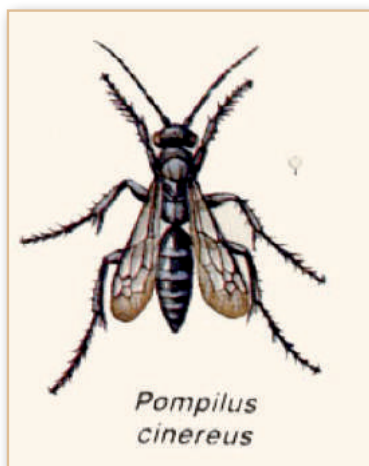
Quelques espèces intéressantes sont citées en carrières calcaires comme *Agrostis obesa*, un papillon signalé pour la première fois en Franche-Comté par Robert suite à l'étude menée sur les carrières de l'Est en 1984 (Robert, 1984 in Sauveterre, 1985).

Le suivi entomologique sur plusieurs années des carrières calcaires de Franche-Comté (Robert et al., 1991) a permis d'enrichir la connaissance pour certains groupes d'insectes en carrières :

- Pour les **orthoptères** (criquets), les auteurs de l'étude concluent au rôle de réservoir des carrières pour plusieurs espèces remarquables. La diversité spécifique est directement liée à la variété des faciès de végétation, mais l'apport de sol par régalinge de terre fait chuter la diversité et disparaître les espèces les plus intéressantes. Il faut également relever la présence de certaines espèces thermophiles\* d'Orthoptères qui peuvent trouver en carrière des conditions favorables à leur développement.
- Les **lépidoptères** (papillons) ont une grande capacité de déplacement et peuvent occuper des milieux variés, chaque espèce occupant un faciès bien défini. En trois ans d'observation (Robert et al., 1991), plus de cent espèces ont été identifiées, dont quelques-unes jamais observées dans la région. L'Écaille noire et blanche n'est ainsi connue qu'en quatre sites en Franche-Comté, tous correspondant à des carrières abandonnées depuis la fin du XIXe siècle.
- Pour les **hyménoptères** maçons ou nichant dans les anfractuosités (guêpes par exemple), les fronts de taille des carrières sont des habitats de reproduction privilégiés. Les possibilités d'y installer leur nid sont plus importantes que dans le milieu environnant. Mais, selon les espèces concernées, l'environnement pourrait jouer un rôle sur l'aptitude à la reproduction (Frapa, communication orale).

Parmi les espèces recensées, une guêpe sociale, spécifique des moraines alpines, a été notée dans les années 1980 dans une carrière du Jura où elle n'avait pas été observée depuis cinquante ans. Selon les auteurs de l'étude (Robert et al., 1991), les carrières peuvent ainsi assurer le relais, voire le remplacement de sites naturels disparus. L'Homme y joue parfois un rôle de vecteur pour des espèces nidifiant au niveau des engins de chantier.

Le travail de Schneider & Wahis (1998) contribuant à la connaissance des guêpes (Vespiformes et Pompilides) des carrières du grès de Luxembourg peut aussi être cité. Ces auteurs ont notamment identifié plusieurs espèces strictement associées aux carrières de grès (*Pompilus cinereus* (Figure 39), *Agenioideus usurarius*, *Allyson spinosus*...).

**Figure 39***Pompilus cinereus*

*Pompilus cinereus* est un Hyménoptère solitaire qui nourrit ses larves avec des araignées (surtout des lycoses ou araignées-loup) et les enterre provisoirement pendant la confection du terrier définitif. Cette espèce n'a été recensée au Luxembourg que dans des carrières de grès. Elle est menacée et inscrite à ce titre sur la liste rouge des aculéates de Rhénanie-Palatinat.

La présence d'eau élargit la gamme des potentialités avec la reproduction potentielle de nombreuses libellules et autres insectes aux moeurs aquatiques (Peresson & Grangé, 2000). Les connaissances concernant le patrimoine et les potentialités des carrières vis-à-vis des insectes et d'une manière plus générale vis-à-vis des invertébrés restent fragmentaires et partielles. Toute la lumière reste à faire dans ce domaine.

### 2.3.2 Les vertébrés

#### 2.3.2.1 Les batraciens

La présence d'eau, d'espace minéraux, de refuges diurnes et hivernaux d'une part, l'absence de poissons et de traitement agricole d'autre part, peut permettre la présence en carrière d'espèces aux exigences écologiques variées et notamment d'espèces dites **pionnières**.

L'intérêt batrachologique d'un site est lié au cycle de vie de ces animaux : les amphibiens, dispersés pour la majorité d'entre eux dans les sous-bois, les prairies\*, les haies, se mettent en quête d'un milieu aquatique, une mare, un fossé, un étang pour accomplir leur reproduction.

Ainsi l'intérêt d'un site repose sur sa capacité d'accueil en période de reproduction, de la qualité des milieux environnants utilisés par les espèces hors de leur cycle de reproduction et de la connectivité de ces milieux entre eux. Plusieurs espèces peuvent ainsi converger vers le même lieu de ponte dans la mesure où il répond aux exigences écologiques de chacune d'entre elles.

En condition sèche, les carrières quelles qu'elles soient ne présentent pas d'attrait significatif pour ces animaux. Cependant, lorsque le site comprend un espace en eau permanente, peu profond et à pentes douces (mare, étang) ou même temporaire, les potentialités peuvent rapidement devenir élevées. Au vu des nombreuses citations dans les fiches ZNIEFF et des quelques données de terrain acquises par des études ponctuelles de carrières, environ la moitié des espèces françaises (34 espèces présentes naturellement en France) sont susceptibles de se reproduire en carrières.

Les espèces de batraciens notées en carrières reflètent des écologies variées (Figure 40) :

- **Espèces pionnières préférant les mares sur substrat minéral : Crapaud calamite, Crapaud accoucheur et Pélodyte ponctué.**

De par la nature même du milieu recherché, ce sont des espèces peu communes. Elles sont pourtant les plus régulièrement citées en carrières, présentes aussi bien en contexte méditerranéen que dans les carrières du nord, de l'ouest et de l'est de la France (diverses fiches ZNIEFF ; Duret & Chiffaut, 2000 ; ENCENM, communication orale et 2001b ; Lemoine, 1999 et 2002). Si l'attrait des mares en carrière s'avère évident pour ces animaux en période de reproduction, aucune information n'est en revanche disponible sur le domaine vital hors période de reproduction. Les amas rocheux et pierriers des carrières sont régulièrement cités comme refuge.



Pour le Crapaud calamite la présence de sols meubles où se terrer dans la journée et durant la période hivernale, ainsi que des surfaces peu ou pas végétalisées pour chasser sont des facteurs optimums à son installation.

À noter l'absence de mention d'une quatrième espèce pionnière, le Sonneur à ventre jaune. Son biotope\* de reproduction est en général constitué de mares et d'ornières forestières, ensoleillées ou modérément ombragées. Ce petit crapaud forestier est assez fréquent dans les sous-bois frais du nord-est de la France (Champagne humide, Vosges...), ce qui pourrait expliquer sa rareté dans les carrières, liées en général à un environnement plus sec.

**Figure 40** Quelques batraciens cités en carrières et leur biotope  
(photos ENCEM)



Mare développée dans un point bas du carreau d'une carrière « romaine » (âge 2 000 ans) dans les garrigues nîmoises, un environnement dépourvu de tout milieu aquatique.



Mares à Pélodyte ponctuée formées sur le carreau à la faveur d'une ligne diffuse de sources liée à l'affleurement d'une couche marneuse dans une carrière de Moselle.



Le Crapaud accoucheur (ici un mâle), amphibien pionnier\* colonisant une mare d'une carrière bourguignonne.



Triton crêté (femelle), espèce de la directive Habitats, dans une carrière de pierre de taille de la Nièvre



Couple de Triton alpestre (femelle en haut, mâle en bas), dans une carrière de Champagne-Ardenne.

#### • Espèces des pièces d'eau assez étendues et profondes : Triton crêté

Les citations du Triton crêté en carrière sont peu nombreuses (Nivernais et Mayenne, ENCEM, communication orale ; Peresson & Grangé, 2000). Un environnement forestier et prairial favorise la présence de cette espèce visée par l'annexe n° 2 de la directive Habitats.

#### • Espèces éclectiques, peu exigeantes quant au milieu aquatique et aux moeurs peu aquatiques : Crapaud commun, Triton palmé, Triton alpestre, Triton commun, Grenouille agile, Grenouille rousse

À l'exception du Triton ponctué, ce lot important regroupe des espèces parmi les plus communes. Un environnement forestier, combiné avec des micro-habitats variés et des caches, leur est très favorable hors période de reproduction.

### • **Espèces des milieux aquatiques permanents (mares, étangs...) et aux moeurs très aquatiques : complexe des grenouilles vertes**

Ce groupe est peu cité. Il concerne des espèces de distinction très délicate avec des hybrides. Ces espèces affectionnent les berges ensoleillées et le plus souvent végétalisées.

Au bilan, les carrières présentent un réel intérêt pour les batraciens à partir du moment où un milieu aquatique se met en place. Cet intérêt est lié à :

- l'accueil d'**espèces patrimoniales** : parmi les espèces citées on retiendra le Triton crêté, espèce peu commune visée par l'annexe 2 de la directive Habitats, observée dans quelques cas en carrières calcaires comme en Lorraine et dans le Nivernais ;
- l'accueil d'**espèces pionnières** : Alyte, Pélodyte ponctué et Crapaud calamite sont les batraciens les plus régulièrement cités en carrières. Les carrières semblent constituer pour ces espèces pionnières peu communes des milieux de reproduction appréciés en raison de leur environnement souvent minéral ;
- la **diversité spécifique** : au-delà de la rareté, le nombre élevé d'espèces (cinq espèces et plus !) au regard de la région concernée constitue un enjeu souvent important pour la préservation de métapopulations\* de batraciens.

Selon les travaux notamment de Lemoine (2002), les principaux facteurs favorisant ce patrimoine en carrière sont :

- des dépressions permettant la rétention d'eau au moins temporairement sous forme de mares et à l'abri de la prédation des poissons ;
- des habitats exempts de tout traitement agricole et diversifiés, allant des espaces minéraux aux pelouses\* et aux friches : réservoir d'une entomofaune diversifiée que chassent les batraciens ;
- des espaces minéraux, peu ou pas végétalisés, attractifs pour les espèces pionnières les moins communes ;
- des pierriers, des cavités diverses et des sols meubles offrant des refuges diurnes et hivernaux.

### **2.3.2.2 Les reptiles**

Exception faite des tortues aquatiques (Cistude d'Europe, Emyde lépreuse et Tortue de Floride - introduite), de la Couleuvre à collier et de la Couleuvre vipérine, les reptiles affectionnent le plus souvent les milieux secs et bien exposés.

Les conditions plus thermophiles\* en carrières par rapport à leur environnement immédiat, alliées à des habitats rocheux et des caches variées, sont favorables à plusieurs reptiles de France. Les conditions thermiques propices des éboulis et des terrils\* en font par exemple des milieux favorables à leur installation.

Cependant, les conditions trophiques ne permettent pas toujours le maintien d'adultes d'espèces telles que la Couleuvre à collier (*Natrix natrix*) mais les éboulis et les buissons peuvent fournir des zones propices à l'incubation des oeufs (ENCERM, 1997).

Malgré tout, la grande discrétion des reptiles rend difficile leur observation. Les citations dans la littérature sont peu fréquentes (Figure 41). Quelques fiches ZNIEFF mentionnent bien des potentialités, mais renvoient le plus souvent à la nécessité de réaliser des inventaires... Aucune mention n'est faite sur le rôle des carrières dans l'accomplissement du cycle biologique de ces animaux. Les observations sont trop épisodiques pour permettre d'en tirer des conclusions (Sauveterre, 1985). Dans les anciennes mines du nord-ouest de l'Espagne, Galan (1997) observe toutefois que la recolonisation par les reptiles est plus lente que dans le cas des batraciens. Les espèces pionnières se limitent principalement au groupe des lézards des murailles. Les autres espèces arrivent plus tard avec le développement de la végétation.

Parmi toutes les espèces citées en carrières, le Lézard ocellé est la principale espèce patrimoniale. C'est le plus grand lézard de France avec ses 80 cm. Méridional, il fréquente occasionnellement les carrières calcaires de Provence et du Languedoc (Vella, communication orale ; Sauveterre, 1985 ; ENCEM, communication orale).

## Figure 41

Reptiles cités en carrières calcaires

(Photos ENCEM et <http://www.univ-lehavre.fr/cybernat/> pour la Coronelle lisse)

### Principales espèces de reptiles citées dans les carrières calcaires de France

Lézard des murailles (*Podarcis muralis*), Lézard vert (*Lacerta viridis*), Lézard ocellé (*Lacerta lepida*), Seps strié (*Chalcides chalcides*), Coronelle lisse (*Coronella austriaca*), Couleuvre de Montpellier (*Malpolon monspessulanus*), Couleuvre verte-et-jaune (*Coluber viridiflavus*), Couleuvre d'Esculape (*Elaphe longissima*)



**Lézard des murailles** : espèce très commune des rochers, pierriers et murets. Elle colonise volontiers les milieux anthropiques\* et peut donc s'observer très tôt en carrière sur les territoires délaissés.



**Lézard vert** : espèce commune et méridionale, préférant les stades herbeux, de broussailles et de fourrés. Elle requiert des formations végétales plus évoluées et apparaît donc plus tardivement en carrière.



**Coronelle lisse** : serpent discret et peu commun des stations sèches, pelouses, lisières et broussailles. Cité dans les fiches ZNIEFF d'anciennes carrières de Lorraine, Champagne-Ardenne, Poitou-Charentes

### 2.3.2.3 Les oiseaux

Les carrières offrent un potentiel certain pour l'avifaune, entre autre pour des espèces à fortes valeur patrimoniale liées aux falaises ou aux milieux ouverts. **Ce potentiel s'exprime d'autant plus que les biotopes colonisés sont absents en périphérie.**

C'est le groupe vertébré le mieux représenté en carrière. Au contraire des groupes faunistiques précédents, les oiseaux couvrent pour leurs besoins quotidiens un territoire généralement plus vaste que celui de la carrière. Ceci est particulièrement vrai pour les rapaces et autres espèces de grande taille comme le Grand corbeau. Les carrières peuvent ainsi jouer deux rôles :

- le premier et de loin le plus important est **l'accueil d'oiseaux pour la reproduction**. À cette période sensible, les oiseaux nicheurs recherchent une certaine quiétude, la sécurité et une ressource alimentaire facilement disponible pour le nourrissage des jeunes. Ils sont révélateurs non seulement de la qualité de leur biotope\* de reproduction, mais également du territoire alentour pour leur quête de nourriture ;
- le second est **l'utilisation occasionnelle de la carrière lors de haltes migratoires**, comme aire de nourrissage ou comme reposoir.

Pour mémoire un troisième rôle anecdotique peut être évoqué, l'hivernage. Une fiche ZNIEFF de la région Rhône-Alpes évoque la fréquentation d'une carrière en période hivernale par le Tichodrome échelette, espèce montagnarde inféodée aux falaises.

## • Les oiseaux nicheurs

Les données disponibles dans les fiches ZNIEFF sont assez nombreuses, mais portent uniquement sur des espèces patrimoniales. Les synthèses sont en revanche peu abondantes. Frochot (1993) dresse sur quelques carrières calcaires de Bourgogne une liste d'une douzaine d'oiseaux fréquemment observés sur ces sites, dont les moins communs se retrouvent au niveau des falaises et des éboulis. De nombreuses autres espèces ubiquistes et plus communes complètent le cortège. Robert (Robert *et al.*, 1991) fait un constat identique en Franche-Comté.

Concernant la richesse ornithologique des carrières, plusieurs facteurs interviennent : la taille du site, en offrant potentiellement une plus grande diversité d'habitats et de niches écologiques ; l'âge de la carrière avec des peuplements végétaux plus évolués ; l'environnement de la carrière selon qu'il est agricole, prairial, forestier... Le rôle et les interactions de chacun de ces facteurs en carrière ne sont cependant pas abordés dans la littérature consultée.

### a - Les biotopes\* à dominante minérale

Les falaises, les talus rocaillieux et les éboulis attirent le cortège d'oiseaux le plus original. Celui-ci peut se scinder en trois ensembles :

#### ► **Espèces rupestres\***

Elles recherchent les vires rocheuses, les anfractuosités ou les cavités situées dans les fronts de la carrière. Parmi les espèces les plus remarquables utilisant ces biotopes\*, le Hibou grand-duc (Figure 42) et le Grand corbeau sont les plus régulièrement citées. On notera au passage que le Hibou grand-duc n'est pas exclusif des falaises. Dans les régions offrant peu d'habitats rupestres\*, il est capable de nicher sur des talus escarpés, parfois au sol et même dans des arbres (Génot & Frochot, communication orale).

Concernant le **Grand corbeau**, l'effectif de la population\* bretonne nichant sur les falaises littorales a fortement chuté depuis les années soixante-dix. En revanche celui de la population\* nichant en carrières est resté stable et constituait en 1997 une part significative (38%) de l'ensemble des effectifs. D'un autre côté, Debout (2001) note l'abandon de carrières par le Grand corbeau suite à une trop forte pression de dérangement. Il semble donc que les carrières peuvent constituer des sites complémentaires ou de substitution pour la nidification de l'espèce, lorsque certaines formes de dérangement sont limitées. Les grands corbeaux s'adaptent à l'activité humaine quand elle est régulière, plus ou moins stéréotypée et indifférente à leur présence. En revanche, tout événement qui sort de ce schéma entraîne une réaction (Quélennec, 1998).

Le **Faucon pèlerin**, plus rare et médiatique, est moins cité en carrières (Figure 42). Il y est observé dans le Lot (Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2002), en Picardie (ENCEN, communication orale), en Rhône-Alpes (LPO Haute-Loire, communication orale), en Alsace (ENCEN, communication orale), dans le Massif armoricain (Debout, 2001), en Basse-Normandie (ENCEN, communication orale) et en Limousin (SEPOL, communication orale). Les conditions d'installation en carrière de l'espèce ont été étudiées par Moore *et al.* (1997) en Irlande. Trois facteurs semblent jouer un rôle déterminant selon ces auteurs :

- la taille des fronts : les fronts plus élevés offrent des conditions d'accueil optimales ;
- l'éloignement du site occupé le plus proche : l'espèce évite les carrières trop proches d'un territoire d'un autre Pèlerin ;
- la présence du Grand corbeau : l'interaction de cette espèce est positive sur le Pèlerin. Ces deux espèces colonisent les mêmes types de carrières. Le Pèlerin peut utiliser les anciens nids du Grand corbeau ainsi que ceux qu'il occupe. Ceci est important dans un contexte où les vires rocheuses sont rares dans les fronts récents de carrières.

Aucune analyse n'est par contre développée sur l'influence de l'exposition des fronts.

La Chouette chevêche et le Pigeon colombin, deux oiseaux cavernicoles en régression, sont des hôtes plus discrets. D'autres espèces plus communes sont également fréquentes en carrière comme le Faucon crécerelle, le Rouge-queue noir, le Choucas des tours (Colette, 2003 ; Duret & Chiffaut, 2000...).



**Figure 42** Quelques oiseaux cités en carrières calcaires



<http://perso.wanadoo.fr/oiseauxdefrance>

Faucon pèlerin : oiseau rupestre\* nicheur quasi exclusif des grandes falaises naturelles, il peut s'accommoder d'une carrière sèche, à condition d'y trouver un front de taille vertical d'une hauteur suffisante, présentant une vire ou cavité convenable (Frochot, 1993).



<http://www.festival-oiseau.asso.fr/html/fr>

Merle de roche : oiseau méditerranéo-montagnard peu commun, inféodé aux rocailles et falaises et observé dans quelques carrières méditerranéennes



<http://www.gramat-parc-animalier.com/>

Hibou grand-duc : rapace nocturne assez rare, régulièrement cité dans les carrières calcaires, en particulier dans les régions de plaine.

Dans les régions au paysage agricole rendu peu attractif pour l'avifaune ou à l'environnement pauvrement doté en habitats rupestres\*, les fronts de carrières améliorent sensiblement la capacité d'accueil pour cette avifaune spécialisée (Moore *et al.*, 1997). En contexte méditerranéen et montagnard par contre, l'attrait de ces biotopes\* est moins marqué. La fréquence des habitats rupestres\* naturels et un environnement de qualité en sont la principale cause. Des observations ponctuelles dans le pourtour méditerranéen attestent néanmoins de la présence en carrière de quelques espèces méditerranéennes peu communes telles que le Merle bleu et le Merle de roche (Ladet & Bauvet, 2002) (Figure 42). Concernant l'Hirondelle de rochers, une espèce méditerranéo-montagnarde qui se révèle assez éclectique (nidification dans des bâtiments, des entrées de tunnels...), les cas relatant sa reproduction en carrière restent rares (ENCENM, communication orale).

Les données recueillies au niveau de la France sur la fréquentation des carrières par l'avifaune rupestre\* montrent qu'une majorité des sites est inactive. Cependant Moore *et al.* (1997) précisent pour le Faucon pèlerin que l'absence d'activité de la carrière n'est pas déterminante. L'espèce n'est pas affectée par l'activité intensive et le bruit. La cohabitation entre oiseaux rupestres\* et activité de la carrière apparaît ainsi possible, pour peu que les espèces concernées disposent de fronts à l'écart de la zone d'extraction et qu'il n'y ait pas de dérangements intempestifs dans l'environnement du nid. Quelques carrières en activité en France en donnent un exemple qui accueillent simultanément ou séparément le Hibou grand-duc, le Grand corbeau et le Faucon pèlerin (Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2002 ; ENCENM, communication orale).

L'âge et la taille de la carrière ne semblent pas avoir d'influence notable sur le peuplement aviaire, tant que les milieux rupestres\* sont dégagés et éloignés de toute végétation arborescente.

### ► Espèces des falaises de sables

Il est classique d'observer la reproduction du Guêpier d'Europe et de l'Hirondelle de rivage dans les fronts de gravières. En carrière calcaire, les cas de reproduction de ces deux espèces peu communes sont peu fréquents. Lorsque les caractéristiques géologiques le permettent, les carrières possèdent des potentialités intéressantes à valoriser. C'est ainsi que le Guêpier d'Europe se reproduit dans les fronts de la découverte sableuse coiffant le gisement calcaire dans quelques carrières de la région de Fontainebleau (Siblet, communication orale). Ces stations remarquables sont situées en limite nord de l'aire de répartition de l'espèce. L'utilisation des falaises taillées dans les stocks de matériaux fins par l'Hirondelle de rivage est moins fréquente (ENCENM, communication orale). Les expériences acquises en gravières montrent que l'activité de la carrière ne constitue pas une gêne pour ces espèces dès lors que l'exploitation respecte l'intégrité de la falaise durant toute la période de reproduction.



## ► Espèces des rocailles et des milieux peu végétalisés

Il s'agit surtout d'espèces nichant au sol, parmi la rocaille et la végétation. Les oiseaux les plus remarquables sont le Traquet motteux et la Huppe fasciée. Ils exploitent les cavités et anfractuosités des éboulis et rocailles. L'Alouette lulu, espèce méridionale notée en Champagne-Ardenne (ENCEN, communication orale), apprécie les grands talus peu végétalisés et bien exposés.

Comme le montre le schéma établi par Robert *et al.* (1991), l'avifaune des milieux minéraux tels que les falaises vues précédemment et les rocailles est bien souvent pénalisée par le développement de la végétation ligneuse (Figure 22). Celui-ci annonce la fermeture inévitable du couvert végétal et la substitution des espèces citées plus avant par des espèces généralement plus ubiquistes décrites ci-après.

### **b - Les faciès herbacés**

Ils conviennent à quelques oiseaux très communs des pelouses\*. Ce sont des espèces nichant au sol, parmi la végétation herbacée, comme le Bruant jaune, le Bruant proyer, l'Alouette des champs, le Tarier pâtre.

L'intérêt patrimonial de ces habitats herbeux est moindre que pour les précédentes. Trois espèces peu communes visées par la directive Oiseaux, l'Alouette lulu, le Pipit rousseline et l'œdicnème criard, sont toutefois signalées dans l'ouest de la France et en Champagne-Ardenne (fiches ZNIEFF ; ENCEN, communication orale). Ce sont des oiseaux steppiques, privilégiant les milieux herbacés secs et dégagés. Bien qu'il ne soit pas évoqué, le principal facteur limitant leur installation durable est d'une part la taille généralement réduite des pelouses\*, d'autre part le développement des ligneux.

### **c - Les faciès buissonnants et forestiers**

Ils apparaissent en carrière et se distinguent des précédents par une grande richesse ornithologique, mais une moindre originalité des peuplements aviaires.

L'installation de stades végétaux évolués (fourrés et bois), liés à l'âge croissant de la carrière, s'accompagne d'une augmentation de la richesse en taxons. Les travaux de Thinon dans le Midi (Thinon, 1984 in Sauveterre, 1985) confirment ce fait.

L'organisation spatiale de la végétation en strates et le développement de lisières favorisent de nombreuses espèces ubiquistes et communes en France. Ce sont des oiseaux arboricoles liés aux fourrés et aux bosquets (diverses mésanges, Rossignol philomène, Pinson des arbres, Rouge-gorge familier, Troglodyte mignon, Merle noir, Pouillot véloce, Pigeon ramier, Geai des chênes, Pie bavarde...). Dans les parties boisées des carrières, généralement les plus anciennes, des espèces à caractère forestier vont même faire leur apparition (Sittelle torchepot, Pic épeiche...).

Mais si ce groupe d'oiseaux présente une diversité spécifique élevée, aucune des espèces remarquables qui le caractérisent en général (Pic noir, Pic cendré, Pic mar, Gobe-mouche à collier, Autour des palombes...) n'est citée dans les boisements des vieilles carrières, contrairement aux groupes d'oiseaux précédents liés aux habitats les plus ouverts.

### **• Les oiseaux de passage**

En toute saison, les carrières offrent un lieu d'accueil temporaire, régulier ou non, pour d'innombrables oiseaux. Plusieurs fonctions peuvent être assurées, mais aucune d'entre elles n'est abordée et analysée dans la bibliographie :

- terrain de chasse pour rapace : quelques fiches ZNIEFF évoquent cette utilisation potentielle. Il est probable en effet que, compte tenu de la naturalité de sites anciens, certaines carrières jouent un rôle de réservoir de ressource alimentaire (micromammifères comme les campagnols, musaraignes et mulots) pour des rapaces. L'environnement de la carrière, selon qu'il est cultivé, prairial ou forestier, est à prendre en compte ;
- dortoir et reposoir pour des espèces de l'environnement de la carrière ;
- accueil temporaire pour des espèces migratrices, en particulier pour des sites localisés sur des axes migratoires.

### 2.3.2.4 Les mammifères

Les potentialités des carrières vis-à-vis de ces animaux doivent être séparées selon deux catégories de mammifères, d'un côté les chauves-souris, de l'autre toutes les autres espèces (non volantes) en raison d'exigences écologiques et de mœurs très différentes.

#### 2.3.2.4.1 Les chauves-souris

Les chauves-souris sont des espèces sensibles, menacées et rares en France pour une majorité d'entre elles. Toutes sont protégées sur le territoire national et la moitié est concernée par la directive Habitats. Vis-à-vis de ces animaux, les carrières souterraines de pierre de taille offrent des milieux de la plus grande importance. Les nombreux classements en ZNIEFF (Bourgogne, Lorraine, Champagne-Ardenne, Poitou-Charentes...), les mesures de protection dont certaines font l'objet (arrêté préfectoral de protection de biotope) et les projets de sites Natura 2000 (un peu plus d'une vingtaine concernant les chauves-souris) attestent de l'enjeu majeur que revêtent nombre d'anciennes carrières, en particulier dans des régions pauvres en cavités naturelles.

Cet enjeu réside dans l'accueil des chauves-souris, d'une part en période de reproduction, d'autre part en période d'hivernage. Ainsi, c'est tout au long de l'année qu'un site à chauves-souris peut présenter un intérêt patrimonial. Sur les 31 espèces observées en France, 17 au moins sont citées en hibernation ou en reproduction dans des anciennes carrières souterraines calcaires selon les diverses fiches ZNIEFF et Natura 2000 relatives aux carrières souterraines (Figure 43). Il s'agit dans tous les cas de sites désaffectés.

En période d'hivernage, ces animaux ont des exigences spécifiques : température (quelques degrés au-dessus de zéro) et hygrométrie à peu près constante des cavités, absence de lumière et quiétude absolue. Ces conditions sont incompatibles avec des sites en activité.

**Figure 43**

Chauves-souris citées dans les carrières souterraines calcaires

Photos d'après le site <http://aptcs.ciril.fr/pghtml/especes/presesp.htm>

#### Espèces de chauves-souris citées dans les carrières calcaires de France :

|                                                       |                                                              |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Barbastelle ( <i>Barbastella barbastellus</i> )       | Grand murin ( <i>Myotis myotis</i> )                         |
| Grand rhinolophe ( <i>Rhinolophus ferrumequinum</i> ) | Murin de Brandt ( <i>Myotis brandti</i> )                    |
| Rhinolophe euryale ( <i>Rhinolophus euryale</i> )     | Murin de Bechstein ( <i>Myotis bechsteini</i> )              |
| Petit rhinolophe ( <i>Rhinolophus hipposideros</i> )  | Murin à moustaches ( <i>Myotis mystacinus</i> )              |
| Oreillard gris ( <i>Plecotus austriacus</i> )         | Murin à oreilles échancrées ( <i>Myotis emarginatus</i> )    |
| Oreillard commun ( <i>Plecotus auritus</i> )          | Murin de Natterer ( <i>Myotis nattereri</i> )                |
| Sérotine commune ( <i>Eptesicus serotinus</i> )       | Murin de Daubenton ( <i>Myotis daubentonii</i> )             |
| Murin des marais ( <i>Myotis dasycneme</i> )          | Minioptère de Schreibers ( <i>Miniopterus schreibersii</i> ) |
| Murin de Capaccini ( <i>Myotis capaccinii</i> )       |                                                              |



Grand rhinolophe



Murin à oreilles échancrées



Murin de Bechstein



Oreillard commun

En période de reproduction, les exigences sont variables d'une espèce à l'autre, mais également au sein même d'une espèce ou d'une population\* d'espèces fréquentant le même lieu. En effet, pour une espèce de chauve-souris ou une population\* donnée, le gîte de reproduction peut aussi bien être une cavité naturelle ou une ancienne carrière totalement dépourvue de dérangement qu'une cavité sous un pont, un tunnel ou autre infrastructure sujette aux influences de leur environnement (vibration, bruit, odeur, luminosité faible...). Tout semble reposer sur l'accoutumance de l'espèce ou de la population\* au dérangement et à la nature de ce dérangement (régularité dans le temps, fréquence, récurrence, amplitude...).

Ainsi, la présence en période de reproduction de chauves-souris en un lieu donné est moins révélatrice de la qualité du gîte retenu que celle de son environnement et de sa ressource alimentaire (Stocklé, communication orale).

Aucune carrière du Massif armoricain n'est connue comme site d'hibernation (hormis les exploitations de calcaire, les ardoisières exploitées en galeries souterraines et les carrières ayant fait ultérieurement l'objet d'aménagements miniers indépendants de l'industrie extractive). La présence en été d'individus dans des fissures des fronts de taille et les galeries qui subsistent parfois et l'utilisation des carrières de roches éruptives comme territoire de chasse ne fait cependant aucun doute, mais l'importance de ces sites pour les chauvessouris et éventuellement pour leur sauvegarde reste à évaluer.

#### 2.3.2.4.2 Les autres mammifères

À l'image des reptiles, ce sont des animaux discrets, nécessitant des investigations poussées pour leur recensement. Ils sont ainsi rarement étudiés et peu de citations en carrières calcaires sont relevées dans la bibliographie.

Même si les auteurs les évoquent rarement, il est classique de noter en ces lieux des terriers de blaireau et de renard, des reliefs de repas d'écureuil, des traces de hérisson, chevreuil, sanglier fouine, hermine et divers petits rongeurs (Morhain, 1992 ; Peresson & Grangé, 2000 ; Frochot, communication orale...). Cet îlot de verdure et de quiétude que représente l'ancienne carrière, au milieu de vastes plaines céréalières notamment, est repéré par les chasseurs comme réserve de lièvres et lapins, espèces d'intérêt cynégétique.

### 2.3.6 Analyse générale

Un assez grand nombre d'espèces colonise les carrières. Les **espèces observées** sur ces lieux sont **originales**, par rapport à celles inventoriées dans la région naturelle, car elles sont souvent plus **méridionales** (reptiles, papillons méditerranéens, plantes odorantes de milieux secs). Ceci traduit les conditions microclimatiques particulières qui règnent dans de tels sites. Des espèces rares deviennent d'ailleurs souvent emblématiques de ces sites. Ainsi les anciennes carrières sont-elles souvent repérées par les naturalistes : Faucon pèlerin, Hibou grand duc, Grand corbeau y trouvent perchoirs et nioirs ; des chauves-souris profitent des anfractuosités des roches ; des batraciens exploitent les petites mares non colonisées par les poissons ; les papillons et les orchidées s'y comptent en nombre. **Cette richesse spécifique** confère un intérêt écologique et pédagogique certain à ces milieux. Ce qui fait dire à Robert (Robert *et al.*, 1991), concluant ainsi ses années d'observations sur les carrières calcaires de Franche-Comté : les carrières « *constituent un réseau de relais de la plus haute importance pour un grand nombre d'espèces rares et en limite, voire en dehors de leur aire de répartition. Dans les régions très urbanisées ou agricoles, ces milieux d'origine artificielle constituent autant d'îlots qui rompent avec la mer d'uniformité biologique qui les entoure* ». Toutes les exploitations de granulats doivent à ce titre faire l'objet d'une analyse écologique. De telles observations, rapportées en nombre dans la bibliographie et évoquées par tous les naturalistes contactés, confirment l'existence d'un potentiel écologique des carrières. Celui-ci est différent d'un site à l'autre selon les caractéristiques de la carrière. L'aperçu du patrimoine floristique et faunistique recensé en carrières calcaires et résumé dans le tableau qui suit (Tableau 11) montre l'enjeu important que revêtent ces sites dans la préservation, le maintien, voire le développement de la biodiversité.

**Tableau 11** Synthèse des potentialités biologiques des carrières calcaires

| MILIEU DE LA CARRIÈRE                 | FLORE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | FAUNE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FRONTS                                | Pas de données<br><br>(richesse potentielle en lichen, mousse, fougères...)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Potentiel fort :</b><br>- <u>Oiseaux</u> : nidification d'oiseaux rupestres* peu communs à rares (Hibou grand-duc, Grand corbeau, Faucon pèlerin, Merle de roche, Merle bleu), notamment dans les régions pauvres en habitats rupestres*.<br>- <u>Invertébrés</u> : habitat d'insectes des rochers, notamment diverses guêpes, mais les connaissances sont à préciser, habitat refuge pour des gastéropodes, en particulier dans les régions à fort endémisme comme les Pyrénées ou les Alpes méridionales.                                                                                                                                                                                                 |
| FRONTS DE SABLES (CAS PEU FRÉQUENT)   | Pas de données                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Potentiel fort :</b><br>- <u>Oiseaux</u> : nidification du Guêpier d'Europe et de l'Hirondelle de rivage, espèces typiques et peu communes des falaises de sables.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ÉBOULIS, TALUS CAILLOUTEUX, ROCAILLES | <b>Potentiel très fort :</b><br>Végétation pionnière à forte valeur patrimoniale et d'intérêt le plus souvent national. Biotope* potentiel de plantes rares, certaines étant endémiques. La plupart de ces espèces possèdent un statut de protection soit européen, soit national, soit régional. Groupement d'éboulis remarquable lorsque ceux-ci sont fonctionnels (cas peu fréquent en carrière). | <b>Potentiel fort :</b><br>- <u>Oiseaux</u> : nidification dans les cavités d'oiseaux peu communs à rares (Merle de roche, Merle bleu, Huppe fasciée, Traquet motteux...).<br>- <u>Invertébrés</u> : habitats pour divers espèces pionnières (criquets, arachnides...), mais connaissances à préciser.<br>- <u>Reptiles, batraciens et mammifères</u> : caches et abris potentiels.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| PELOUSES*                             | <b>Potentiel fort :</b><br>Forte diversité floristique. Habitat potentiel pour de nombreuses plantes d'intérêt régional, plus rarement national. Richesse potentielle en orchidées. Groupement* végétal d'intérêt communautaire avec les pelouses sèches à orchidées                                                                                                                                 | <b>Potentiel assez fort :</b><br>- <u>Oiseaux</u> : quelques espèces d'intérêt patrimonial peuvent se reproduire dans ces pelouses (Pipit rousseline et Œdicnème criard). Mais conditions optimales rarement réunies (taille réduite, envahissement par les ligneux).<br>- <u>Reptiles, batraciens et mammifères</u> : terre de nourrissage pour de nombreuses espèces vivant au sein de la carrière ou venant de l'extérieur.<br>- <u>Invertébrés</u> : richesse entomologique (criquets, papillons...), mais connaissances à préciser.                                                                                                                                                                       |
| FOURRÉS                               | <b>Potentiel faible :</b><br>La fermeture du couvert végétal réduit considérablement la diversité et l'originalité floristiques.                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Potentiel moyen :</b><br>Peu d'espèces patrimoniales particulières sont liées à cet habitat. D'intérêt limité, il est néanmoins susceptible d'introduire de la diversité faunistique en offrant des caches à diverses espèces, des sites de reproduction pour des oiseaux des fourrés tels que les fauvettes, une ressource trophique en automne (baie)...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| BOIS                                  | <b>Potentiel faible :</b><br>La diversité et l'intérêt floristiques baissent. Quelques plantes peu communes du groupe des pyroles sont occasionnellement rencontrées. Les boisements ombragés (exposition nord) peuvent présenter un intérêt pour des fougères.                                                                                                                                      | <b>Potentiel faible :</b><br>La diversité faunistique des zones boisées est en général relativement élevée, mais sur le plan patrimonial, elles ne contribuent pas au potentiel faunistique de la carrière.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| MILIEUX HUMIDES                       | <b>Potentiel assez fort :</b><br>Quelques cas font mention de marais apparus sur d'anciennes carrières à flore remarquable. Ce sont des milieux à potentiel floristique intéressant mais peu fréquent en carrières calcaires.                                                                                                                                                                        | <b>Potentiel fort :</b><br>- <u>Batraciens</u> : l'intérêt repose d'une part sur la reproduction d'espèces peu communes à rares comme le Triton crêté et des pionniers* (Crapaud accoucheur, Pélodyte ponctué, Crapaud calamite), d'autre part sur le nombre parfois élevé d'espèces susceptibles de se reproduire.<br>- <u>Invertébrés</u> : habitat potentiel pour les crustacés (notamment des milieux temporaires) et pour les libellules, mais les connaissances sont à approfondir (Frochot et al., 2006),<br>- <u>Autres</u> : l'eau constitue un attrait indéniable pour toutes les espèces animales de l'environnement de la carrière. C'est un facteur contribuant à la fréquentation de la carrière |
| ANCIENNES CARRIÈRES SOUTERRAINES      | Potentiel nul                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Potentiel très fort :</b><br>- <u>Chauves-souris</u> : plus de la moitié des espèces françaises se reproduisent ou hibernent dans ce milieu. C'est un habitat majeur pour la préservation d'un groupe faunistique en raréfaction.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| MILIEUX ANNEXES DE LA CARRIÈRE        | <b>Potentiel à déterminer :</b><br>Les pistes et autres zones techniques de cette nature peuvent se rattacher aux éboulis et talus peu végétalisés et abriter ainsi une flore pionnière remarquable.                                                                                                                                                                                                 | <b>Potentiel à déterminer :</b><br>Possibilité de reproduction d'Hirondelle de rivage sur des stocks de matériaux fins, mais situation peu fréquente.<br>Possibilité de reproduction de batraciens dans les bassins de décantation, mais là encore situation peu rencontrée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



Comme le montre l'étude des carrières de roches éruptives du Massif armoricain (ENCEM, 2001), un bilan de la valeur patrimoniale (liste d'espèces et d'habitats) est également difficile à établir. S'il est évident que certaines espèces profitent des nouvelles conditions environnementales créées par la mise à nu de roches, la création de falaises etc., il est en revanche beaucoup plus difficile de replacer ce constat dans un contexte plus large intégrant l'ensemble des facteurs (positifs et négatifs) d'évolution de la biodiversité et de mesurer la contribution quantitative des carrières dans ce domaine. Cependant, les quelques éléments qui ont été recueillis dans la littérature et les informations communiquées par des scientifiques et des naturalistes (ou associations de naturalistes) permettent d'affirmer que, si les carrières sont **souvent banales sur le plan écologique, certaines accueillent des espèces animales et végétales ainsi que des habitats peu répandus sur le reste du territoire**. Il semble également que l'intérêt écologique des carrières dépasse la simple valeur patrimoniale, en proposant par exemple, sur une faible surface, **un grand nombre d'habitats et des schémas fonctionnels originaux**. Cette diversité aura par ailleurs un grand intérêt pédagogique. D'autre part, il est évident qu'un diagnostic approfondi du fonctionnement écologique des carrières de roches massives et des espèces qui y trouvent une partie ou toutes les ressources nécessaires à leur existence s'impose. Il devrait permettre d'aboutir à un bilan plus objectif et fondé de la contribution des carrières au maintien de la biodiversité armoricaine.

L'inventaire des carrières incluses dans des ZNIEFF de type I, ou mieux justifiant à elle seule le repérage d'une ZNIEFF de type I, peut donner une indication de la valeur patrimoniale de ces sites. Cet inventaire permet d'estimer à une vingtaine le nombre de zones pour lesquelles les carrières participent significativement à la justification du zonage (pour l'ensemble du Massif armoricain, Deux-Sèvres excepté). Ce chiffre relativement faible ne doit pourtant pas conduire à une sous-estimation de la valeur biologique des carrières. Il est en effet certainement plus à rattacher à la faible superficie occupée par les carrières (0.02% du territoire) comparée à la taille du territoire étudié et à un manque de prospection en raison des difficultés d'accès qu'à une réelle valeur patrimoniale moindre. De nombreuses découvertes restent à venir...

Si le nombre d'espèces et la part des espèces peu communes sont les composantes essentielles du potentiel écologique de ces carrières, la productivité des carrières (mesurée par la biomasse produite) est, elle, relativement faible. Cette faible productivité s'explique par le manque d'eau sur les sites et la nature très minérale des substrats. Rappelons tout de même que la productivité ne va pas toujours de pair avec une valeur patrimoniale des écosystèmes, les habitats pionniers peu productifs ont régulièrement une forte valeur patrimoniale. La fonctionnalité des écosystèmes doit également être prise en compte et, bien que ces milieux de surface limitée ne nourrissent que de petites populations\* animales, ils offrent à des espèces capables de se déplacer et de prospecter l'environnement de la carrière des lieux de nidification et de reproduction. Les couples isolés de Faucon Pèlerin ou de Hibou Grand Duc, les colonies de Choucas ou d'Hirondelles de rivage apprécient notamment ce mode d'organisation (Frochot, 1993). À l'échelle du paysage, cet auteur conclut que l'ensemble « carrière + son environnement » présente une productivité intéressante.

Les carrières sont des territoires privilégiés où un certain nombre d'espèces animales et végétales **rares, endémiques ou menacées** se développent. Elles servent parfois de **refuge à des noyaux de population\*** importants d'espèces rares et peuvent constituer alors en retour des réservoirs pour leur environnement.

Ce potentiel s'exprime aussi bien **en cours d'exploitation** (oiseaux rupestres\* et des falaises sableuses, batraciens, plantes pionnières) qu'à son terme. Mais c'est avec l'âge et le maintien d'habitats variés, allant des milieux nus aux boisements, que la plus grande partie de la richesse écologique de la carrière s'acquiert.

Au-delà de cette richesse intrinsèque, **le potentiel écologique des carrières doit être apprécié à l'échelle du paysage comme une complémentarité** : zone refuge, zone de reproduction, aire de nourrissage, zone d'hivernage, territoire relais.



***Partie 3 : les facteurs de la diversité  
écologique des carrières***

## PARTIE 3 : LES FACTEURS DE LA DIVERSITÉ ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES

### 3.1 ORIGINE DU POTENTIEL ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES

La majorité des auteurs analysés donnent des exemples du potentiel écologique des carrières. Il tient à deux propriétés évidentes :

- en fin d'exploitation, la carrière constitue un milieu libéré de toute pression anthropique\* : un écosystème autonome peut s'y développer, sans intervention de l'Homme ;
- ce milieu est original au sein d'un environnement dont l'occupation du sol est très différente (cultures, zones urbanisées, voirie...). L'épaisseur du sol y est souvent nettement moindre (sauf cas particulier de zones méditerranéennes).

Ces deux caractéristiques de la carrière se déclinent de la façon suivante :

- les carrières constituent **des milieux « neufs »**, à prospector pour les espèces présentes aux alentours ;
- ce sont des **milieux difficiles** (aridité, exposition, érosion forte) (Vanpeene-Bruhier, 2003), « handicapés » par l'absence de sol, des tassements intenses (Frain, 1991) : seules des plantes adaptées peuvent s'y installer, ce qui introduit souvent de la rareté et de l'originalité. Petit (1980) décrit ainsi l'adaptation de l'Oseille à feuilles rondes (*Rumex scutatus*) aux éboulis instables et son rôle dans la stabilisation progressive des terrils du nord de la France (Figure 44). La productivité y reste faible (Frochot, 1993).

**Ces fortes contraintes limitent l'envahissement de ces milieux par des espèces banales de la flore (Coumoul & Mineau, 2002) et permettent l'expression d'espèces moins concurrentielles, mais mieux adaptées.**

- ▶ Ces sites sont constitués de **nombreux micro-habitats** : front, éboulis, merlon de terre, carreau, mare... Cette **mosaïque** de milieux et leurs zones de transition multiplient les types de conditions de vie et favorisent la biodiversité (nombre d'espèces colonisant chaque milieu + nombre d'espèces intéressées par la complémentarité de ces milieux). Cela forme des systèmes écologiques remarquables, rarement présents à l'état naturel. Un brassage phytogéographique des espèces floristiques qui s'y installent se réalise (Decocq, 1994). Par ailleurs, la multiplicité et l'originalité de certains des habitats favorisent l'expression d'espèces végétales endémiques (Stott, 1975). La mise à nu des terres de découverte sableuses, conséquence de l'exploitation des matériaux sous-jacents, ainsi que des stocks de matériaux fins favorisent l'installation du Guêpier d'Europe ou de l'Hirondelle de rivage.
- ▶ La carrière forme une enclave dans un environnement souvent homogène et monotone (agriculture intensive, forêt de production). Elle constitue un site d'exception où la nature peut s'exprimer. Les messicoles disparues des cultures, d'ailleurs originaires d'éboulis naturels (Royer, 1977), s'y développent.

Une identité locale est néanmoins préservée par l'effet fondateur des espèces alentour qui colonisent le site. Un parallèle peut être fait avec la colonisation des terrassements et bermes routières, des remblais ferroviaires (Clavery, communication orale ; Cuénot, communication orale).



**Figure 44** Oseille à feuilles rondes (*Rumex scutatus*)  
(photos ENCEM)



Sur éboulis naturel dans la côte dijonnaise



En pied de front d'une ancienne carrière dans la région  
des Grands Causses

- ▶ La carrière est remarquée par les naturalistes pour l'originalité des espèces avant tout **rupestres\*** qui s'y implantent, mais également plus **thermophiles\*** : les carrières accueillent souvent des **espèces en limite de leur aire de répartition** ou sont potentiellement des réservoirs de populations\* isolées. Une protection réglementaire de cette originalité est parfois mise en place. Les carrières constituent des réservoirs phytogénétiques (Decocq, 1994). Dans le nord de la France, elles offrent ainsi des conditions de milieux secs à une flore xérothermophile\* qui y trouve refuge. Des espèces méditerranéennes, auxquelles le climat picard n'est pas favorable, étendent ainsi leur aire de répartition vers le nord.
- ▶ Le stade climacique signifiant fermeture du milieu et réduction du nombre d'espèces, certains écologues (Frochot, 2000) proposent l'intervention humaine pour **maintenir artificiellement un stade jeune** (fauchage, pâturage, reprise d'exploitation du matériau pour rafraîchir les fronts et les éboulis...).
- ▶ Constituées de terres remaniées, de milieux neufs et récents, les carrières peuvent offrir des conditions propices à l'accueil de **plantes dites « envahissantes »**. La présence de ces végétaux, en général d'origine exotique, peut constituer un fléau biologique (appauvrissement drastique du cortège floristique et faunistique associé), sanitaire (risque d'allergie dans le cas par exemple de l'ambroisie), économique (plantes résistantes en agriculture) ou paysager (modification des espèces dominantes dans le paysage). Leur installation est favorisée par la perturbation des milieux et leur propagation accentuée par le dysfonctionnement de l'écosystème dans lequel elles vont proliférer. Leur impact négatif sur le milieu est dû à leur caractère très compétitif permettant d'éliminer les espèces moins agressives, à leur toxicité pour les espèces floristiques autochtones, mais également pour la faune qui ne peut s'opposer à leur développement, à leur faculté à se développer et se propager rapidement (multiplication végétative par rhizome traçant, dispersion efficace par le vent, les animaux...). Si ce **risque** n'est pas clairement souligné par les ouvrages consultés, il n'en demeure pas moins **potentiel**, d'autant que les engins et les camions amenés à fréquenter les carrières peuvent constituer des vecteurs à la dissémination de telles espèces.



Libérée de toute pression anthropique\*, la carrière abandonnée offre **un site d'expression spontanée de la nature**. Celle-ci en fait bien souvent un site remarqué par les naturalistes, **original par rapport à l'occupation du sol alentour**.

Milieu neuf, difficile à coloniser par des espèces banales, il offre souvent une **mosaïque d'habitats (pierriers, paroi nue, sol mince, zones humides...)** favorable à l'expression d'une grande biodiversité.

Mais la carrière crée également des conditions favorables à un certain nombre de plantes naturalisées au rang desquelles sont relevées des **plantes dites « envahissantes »**. Selon l'importance du développement de ces dernières, les conséquences sur le milieu naturel peuvent être préjudiciables.

## 3.2 LES FACTEURS DE VARIABILITÉ DES CARRIÈRES

Une carrière se singularise par sa surface et son originalité dans le paysage. Des échanges de matières et d'individus s'y produisent entre les différents habitats qu'elle renferme, constituant ainsi un véritable écosystème (ENCEM, 2001). L'originalité de l'écosystème constitué tient à de multiples facteurs. Abiotiques et biotiques, ceux-ci se combinent de nombreuses façons. Ces diverses combinaisons favorisent la richesse des peuplements biologiques qui se développent dans la carrière. Chaque espèce végétale et animale est liée à une combinaison précise des différents facteurs cités par la suite, caractérisant son biotope\* (Figure 45). Plus ces facteurs seront diversifiés, plus les peuplements inféodés à ce milieu seront également diversifiés (Robert *et al.*, 1993).

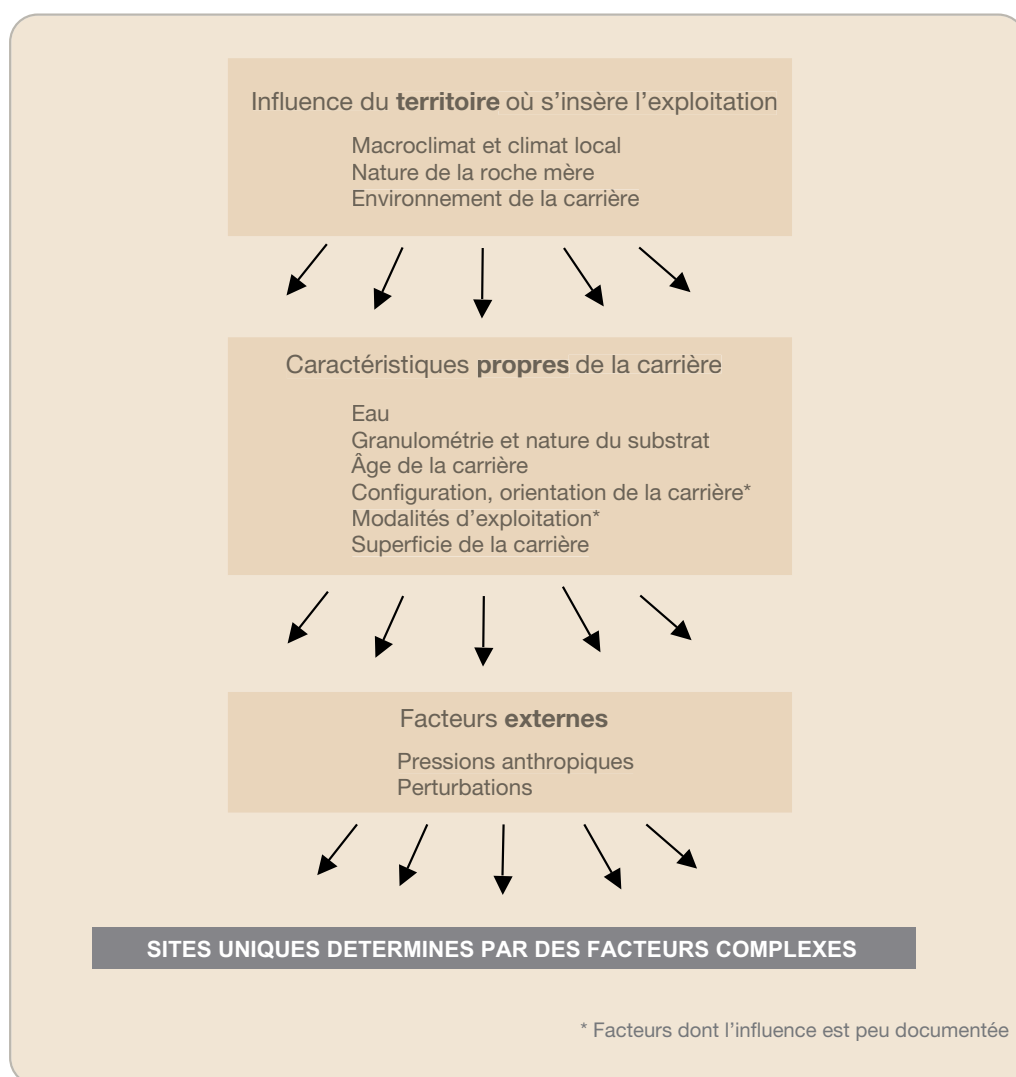
La distinction de l'influence propre à chaque paramètre est difficile à établir, tant leur expression est variée et leur combinaison multiple (Juffard, 1996). Les principaux facteurs décrits dans la bibliographie sont présentés ci-après.

Decocq (1994) présente l'écologie des différentes carrières qu'il étudie comme résultant de l'action simultanée de facteurs :

- édaphiques : sols et sous-sols fournissent un support physique à la végétation et une source de nutrition ;
- climatiques : températures (moyennes et extrêmes), vents, luminosité influencent le cycle et la répartition des plantes. Ces facteurs se modifient avec la topographie du site ;
- biotiques : au fur et à mesure de la colonisation d'un site, les êtres vivants installés modifient les conditions d'accueil du milieu. L'ombrage apporté par les premiers arbustes crée par exemple un phytoclimat propice à la stallation de plantes sensibles aux températures trop extrêmes (Lebahy, 1983).

Sauveterre (1985), Sionneau (1993) dressaient une liste équivalente sous les termes de facteurs climatiques, physiques et biologiques. Mais ces derniers intègrent, en plus, le rôle des populations\* vivantes aux alentours de la carrière. Ces éléments sont développés ci-après.

**Figure 45** Les facteurs de variabilité des carrières



### 3.2.1 Climat

Les quatre régions biogéographiques\* françaises se distinguent entre elles par un facteur macroclimatique. Pluviométrie, ensoleillement, sécheresse caractérisent chacune d'entre elles. La région méditerranéenne se différencie assez nettement du reste du territoire par le type de paysage dans lequel se localisent les carrières. L'environnement de la carrière semble en effet moins contrasté dans le Midi : les carrières se creusent souvent dans des paysages de rocaillies arides, dont l'aspect reste assez proche de l'aire minérale que crée la carrière.

Le caractère « sécheresse » différencie également les régions biogéographiques\* françaises, par conséquent les carrières qui s'y trouvent : le nord-ouest reçoit ainsi de fortes précipitations en automne et est généralement épargné de toute sécheresse ; en région parisienne, les précipitations sont plus faibles et une sécheresse peut apparaître certaines années ; dans le sud-est, une sécheresse estivale est nettement caractérisée, tant en intensité qu'en durée, et constitue un frein notoire dans la dynamique de recolonisation des milieux par la flore.

Le **macroclimat** (à l'échelle de la région) et les **microclimats** (à l'échelle du site) influencent les biocénoses\* d'un milieu par le biais de la température (moyenne, extrêmes, nombre de jours de gel...), les précipitations (moyenne et répartition sur l'année) et l'ensoleillement (Sauveterre 1985). D'autres facteurs caractéristiques du climat se révèlent déterminants : l'hygrométrie, les vents, l'évapotranspiration potentielle.

### 3.2.2 Nature de la roche mère des sites d'extraction

D'après Sauveterre (1985), la nature de la roche mère n'apparaît pas comme un facteur important pour ce qui concerne les potentialités écologiques ou la vitesse de colonisation par la végétation. Pour les végétaux supérieurs, la première exigence semble être l'existence d'un support pour l'enracinement : fissures, placages plus ou moins humifères, poches de sédiments fins (dues à une dissolution dans les calcaires, à des fracturations, à des apports de matériaux). **Les cortèges\* floristiques sont malgré tout profondément affectés par la nature de la roche mère**, ils répondent directement aux propriétés acides des roches, puis des sols et de l'eau qui en découlent (Boulet, 1996). Dans sa thèse, cet auteur distingue très nettement les groupements\* floristiques de nature acidiphile\* (pelouses\* sur silice, landes\*...,) se développant dans les carrières de schiste, de grès ou de granite, de ceux nettement plus calcicoles\* (fourrés\*, prairies\*, pelouses\* calcicoles\*), se développant dans des carrières de nature calcaire. ENCEM (2001) remarque d'ailleurs que la présence généralisée de la silice dans les roches du Massif armoricain distingue fortement les carrières de cette région. Certains groupements\* restent pourtant indifférents à l'acidité ou à l'alcalinité, ce sont des groupements\* rudéraux\* et arborés pionniers\*.

### 3.2.3 Environnement de la carrière

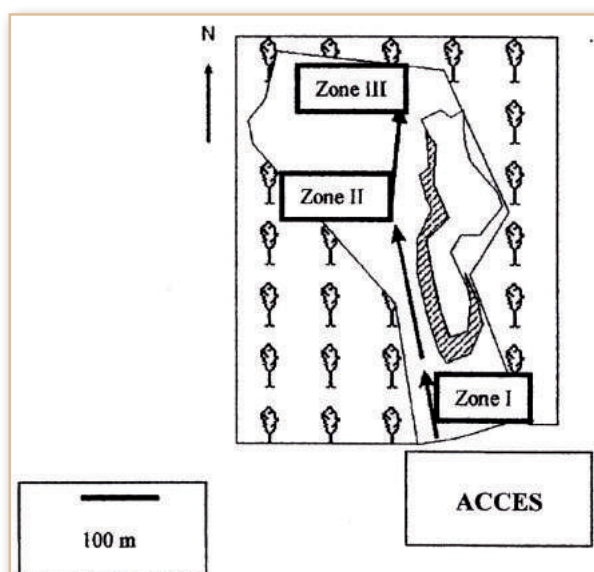
Plus les sources de diaspores<sup>6</sup> sont éloignées du site à coloniser, plus la probabilité qu'une espèce atteigne le site devient faible. Les chances de survie d'une population\* dans un milieu isolé diminuent également. L'occupation du sol autour de la carrière influence fortement la nature des colonisateurs du site, surtout pour les espèces à **faible distance de dissémination**, soit l'essentiel des plantes, insectes, gastéropodes. Les populations\* sources de cet environnement prospectent généralement de proche en proche et occupent progressivement le site vierge riverain (Wiegand & Felinks, 2001a et 2001b ; Boulet, 1996).

L'existence de liens physiques et biologiques, des « corridors » formés par des haies, des chemins, des fossés d'évacuation des eaux pluviales... favorisent cette colonisation de proche en proche (Usher, 1979 ; Picaud & Petit, 1998). À l'inverse, un environnement forestier constituera une barrière à l'immigration d'espèces prairiales (Picaud, 1998 ; Brunaud, 1997a). Picaud (1998) montre comment l'obstacle naturel que constitue un bois en bordure d'un site minier concentre la colonisation du site par les Orthoptères sur le débouché d'un chemin d'accès (Figure 46).

A une échelle plus large, la position géographique du site d'extraction par rapport aux grands axes de migration, les grands axes de pénétration que sont les fleuves, la proximité du littoral, l'influence des vents dominants, etc. sont également des facteurs à prendre en compte. Boulet (1996) observe ainsi dans les carrières littorales de Basse-Normandie, la présence de groupements\* à Ajonc de Le Gall. Ces carrières sont en effet environnées par des landes\* littorales à Ajonc de Le Gall, espèce essentiellement localisée au littoral armoricain et au Pays basque.

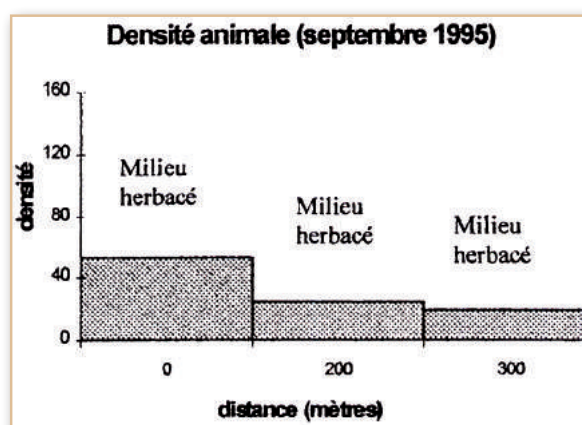
<sup>6</sup> *Diaspore : tout organe de propagation des plantes (fruit, graine, partie végétative de la plante...).*

**Figure 46** L'importance des corridors biologiques pour la colonisation d'un site.



Picaud (1998) a étudié la distribution de la densité et de la diversité des orthoptères en fonction de la distance par rapport à la source. Il a utilisé pour cela un site minier entouré de bois (formation\* qui représente une barrière biologique) et dont la seule voie d'accès pour les orthoptères est un chemin qui amène au site. Ce chemin possède des bas côtés herbacés\* et dessert des prairies\*. Il existe donc une zone source, avec un éloignement des zones à coloniser :

- 0 mètre - Zone I
- 200 mètres - Zone II
- 300 mètres - Zone III



Un an et demi après la restauration du site (engazonnement par projection hydraulique), la densité et la diversité des orthoptères diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la voie d'accès. Cela suggère que les insectes utilisent les bas côtés du chemin pour coloniser progressivement le site.

Pour des espèces à grands rayons d'action et territoriales comme les rapaces, la proximité d'un site déjà occupé n'est par contre pas toujours un atout. Pour le Faucon pèlerin dans les carrières d'Irlande, Moore *et al.* (1997) montrent ainsi l'importance de l'éloignement entre les territoires d'individus distincts.

Selon la région considérée et la qualité des milieux naturels qui la composent, la carrière peut être à l'origine d'habitats originaux ou non. En région méditerranéenne, l'essentiel des sites d'exploitation est ouvert en zone naturelle de rocaïlle, les sols épais étant réservés à d'autres usages. La carrière se trouve intégrée à un paysage de falaises et d'éboulis. Les espèces colonisatrices sont ainsi moins originales dans ce type de région où le contraste est faible entre la carrière et son environnement naturel. Dans d'autres régions biogéographiques\* telles que les plaines agricoles du nord et de l'ouest de la France, ce contraste est plus fort et de fait l'originalité de la carrière est à l'origine d'un potentiel écologique significatif. Elle est un refuge pour des plantes et des animaux rupestres\*, des sols superficiels ou des stations plus thermophiles\*. Moore *et al.* (1997) font ce constat pour le Faucon pèlerin dans les carrières d'Irlande. Ce rapace est abondant dans les carrières de l'est de l'Irlande où l'environnement est pauvre en falaises naturelles (42% des carrières sont occupées). Dans le reste de l'île, plus riche en parois, la reproduction du faucon en situation naturelle est plus importante tandis que le taux d'occupation en carrière descend en-dessous de 22%.

Par ailleurs, le relief général et la situation géographique d'une région naturelle conditionnent des flux migratoires, ceux des oiseaux par exemple. La position relative de la carrière par rapport à ces axes explique que ce type d'espèces la fréquente ou non.



### 3.2.4 Eau

Concernant le rôle écologique de l'**eau retenue** dans les carrières laissées en eau après exploitation, nous ne disposons d'aucune information concrète. Cela constitue une lacune majeure puisque une part importante des carrières contemporaines, en cours d'exploitation ou désaffectées, sont ou seront inondées (notamment les carrières de roches éruptives). Le rôle écologique des banquettes remblayées ou non dans les zones de marnage des plans d'eau, l'utilisation estivale de l'eau stockée pour l'irrigation des terres agricoles et les fortes variations de niveau que cela entraîne, etc. sont autant d'éléments qu'il reste à étudier pour comprendre l'écologie de ces carrières en eau.

La présence d'**eau de surface** ou d'eau contenue dans les substrats\* intervient (et avant la nature de la roche mère) dans la caractérisation des unités de végétation des carrières (groupements\* hygrophiles\*, d'éboulis...). L'eau peut se présenter sous forme temporaire ou permanente et, dans ce dernier cas, elle peut être stagnante ou s'écouler. La description de Boulet (1996) de la distribution de trois groupements\* herbacés\* hygrophiles\* sur les carreaux\* de carrières de roches massives armoricaines fournit un bon exemple de l'influence de ce facteur :

- Le groupement\* à Jonc bulbeux (*Juncus bulbosus*) occupe de faibles superficies (quelques mètres carrés) du carreau\* des carrières. Il tend à se développer dans les ornières de chemins et dans les dépressions où l'eau est retenue par une mince couche de particules fines. Il profite des alternances de sécheresse et d'humidité.
- Le groupement\* à Jonc acutiflore (*Juncus acutiflorus*) est comme le précédent, strictement acidiphile\*. Il occupe toujours des portions mal drainées, où demeurent, d'une manière quasi permanente, des flaques d'eau peu profondes, même en période estivale.
- La typhaie (*Typha latifolia*) se retrouve aussi bien sur roche acide que sur roche calcaire (Figure 47). Un substrat\* fangeux (bassins de décantation...) et de l'eau permanente (mares et fossés peu profonds) sont les conditions nécessaires à son apparition et à son développement. La Massette (*Typha latifolia*) manque généralement dans les très anciennes carrières car elle occupe souvent des zones inondées peu profondes et se trouve rapidement éliminée par la concurrence de la végétation ligneuse\* hygrophile\* (saules, bouleaux).

La qualité de l'eau et notamment son acidité peuvent contraindre le développement de la végétation. Pour des sites dégradés de République Tchèque, Prach et Pysek (1994) donnent l'exemple du très faible succès d'implantation d'arbustes et d'arbres dans des situations de remontées d'eau acide.

Finalement, ces trois groupements\* se distinguent par leurs exigences particulières : la forme sous laquelle l'eau est présente et l'épaisseur du substrat\* (Tableau 12).

| <b>Tableau 12</b> Exigences écologiques des groupements* hygrophiles<br>d'après Boulet, 1996 |                           |                              |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
|                                                                                              | Eau temporaire            | Eau permanente               |                       |
|                                                                                              |                           | Avec écoulement              | Stagnante             |
| Substrat* fangeux, faible couche de particules fines (< 5 cm)                                | Groupement à Jonc bulbeux |                              |                       |
| Substrat* fangeux, couche épaisse de particules fines (> 5 cm)                               |                           | Groupement à Jonc acutiflore | Groupement à Massette |

**Figure 47** Portion de carreau\* inondé en permanence où se développe une végétation hygrophile\*  
(Photo P. Fouillet)



La flore se compose entre autres de Massette (*Typha latifolia*), Renoncule flammette (*Ranunculus flammula*), Jonc acutiflore (*Juncus acutiflorus*).

Sur les fronts de taille\* ou les éboulis, l'eau, sous la forme de suintements notamment, est également un facteur essentiel du développement d'espèces rupicoles\* végétales et animales, telles certains gastéropodes comme nous l'avons déjà vu. Les difficultés techniques inhérentes à l'étude des falaises expliquent en partie le peu d'informations disponibles.

### 3.2.5 Granulométrie et nature du substrat

Peu d'informations ayant trait aux carrières calcaires sont rapportées à ce sujet dans la bibliographie. Elles sont basées sur des observations et des constats de terrain.

L'accumulation de particules fines est soulignée comme un facteur favorisant la végétation pionnière. Ces particules fines peuvent être directement issues du substrat (sables calcaires, craies friables) ou de l'érosion rapide de substrats friables tels que certains calcaires cryoclastiques (Coumoul & Mineau, 2002 ; Khater, communication orale).

Selon Maubert (à paraître), l'intérêt floristique des anciennes carrières est dû aux conditions écologiques particulières liées au sol. Le substrat constitué par la roche mère offre des sols le plus souvent squelettiques, pauvres en éléments minéraux nutritifs, subissant un fort ensoleillement et des périodes de sécheresse drastique. Ces conditions de vie particulièrement peu clémentes sélectionnent des espèces frugales, tolérantes aux stress liés au manque d'eau et de nutriments. De telles plantes supportent en général très mal la compétition avec d'autres végétaux et sont de ce fait souvent rares. L'évolution spontanée\* du couvert végétal y est très lente, nécessitant des dizaines d'années, voire des siècles, pour qu'un couvert arborescent dense parvienne à se développer.

A l'inverse, des sols remaniés, épais et riches en nutriments sont profitables aux plantes à fort pouvoir compétitif et exigeantes en azote. Elles forment des peuplements denses étouffant les autres espèces. Les stades pionniers\* y sont fugaces, rapidement supplantés par des formations ligneuses plus évoluées.

Concernant les carrières éruptives, une étude plus fine de l'influence de ces facteurs a été réalisée par ENCEM (2001), c'est elle que nous reprenons ici.

### 3.2.5.1 Morphologie des substrats

Qu'elle découle de la simple remise en état des lieux en fin d'exploitation ou d'un réaménagement à des fins paysagères ou écologiques, la morphologie du site conditionne fortement les possibilités d'installation des communautés (Frochot *et al.*, 2000) et, d'après Boulet (1996), toutes les zones d'exploitation de la carrière sont occupées par des végétaux (Tableau 13). Les substrats\* qui caractérisent ces différents habitats\* se distinguent par leur granulométrie\*, mais le facteur qui conditionne l'implantation des espèces semble davantage être la réserve en eau du substrat\* que la dimension propre des particules ou blocs qui le constituent (Sauveterre, 1985).

**Tableau 13** Répartition des groupements\* dans les carrières siliceuses d'après Boulet, 1996

|                                                       |  |  |
|-------------------------------------------------------|--|--|
| Gpt muscinal à <i>Grimmia pulvinata</i>               |  |  |
| Lande à <i>Erica cinerea</i> et <i>Ulex gallii</i>    |  |  |
| Lande haute à <i>Ulex europaeus</i>                   |  |  |
| Lande haute à <i>Sarothamnus scoparius</i>            |  |  |
| Pelouse à <i>Aira praecox</i>                         |  |  |
| Lande à <i>Erica cinerea</i> et <i>Ulex europaeus</i> |  |  |
| Saulaies                                              |  |  |
| Bétulaies                                             |  |  |
| Chênaies acidiphiles                                  |  |  |
| Gpt muscinal à <i>Polytrichum piliferi</i>            |  |  |
| Gpt à <i>Sedum anglicum piliferum</i>                 |  |  |
| Gpt muscinal à <i>Ceratodon purpureus</i>             |  |  |
| Gpt muscinal à <i>Polytrichum commune</i>             |  |  |
| Pelouse à <i>Agrostis tenuis</i>                      |  |  |
| Lande à <i>Erica tetralix capillaris</i>              |  |  |
| Lande à <i>Molinia caerulea</i>                       |  |  |
| Gpt à <i>Juncus bulbosus</i>                          |  |  |
| Gpt à <i>Juncus acutiflorus</i>                       |  |  |

## • Les fronts de taille

Les fronts de taille\* des carrières acides de Basse-Normandie sont surtout colonisés par les lichens et les bryophytes\*. Peu de plantes vasculaires font de bons lithophytes\* (Boulet, 1996). Dans le Limousin, à l'exception des surfaces subissant un trop fort éclaircissement, les lichens sont bien représentés (Frain, 1991). Ce sont soit des saxicoles\* (*Xanthoria parietina*, *Rhizocarpon* sp.), soit des espèces foliacées (*Evernia prunastri*, *Parmelia caperata*, *Anaptychia ciliaris*...), soit enfin des espèces terricoles (*Cladonia fimbriata*, *C. subulata*, *C. pyxidata*...). Le groupement\* à *Grimmia pulvinata* (saxicole\* et xérophile\*) s'installe directement sur la roche des fronts de taille d'exposition sud ou est (Boulet, 1996 ; Frain, 1991).

En revanche, les moindres failles, interstices, avec accumulation de terre issue des sols situés audessus du front de taille, permettent l'installation aussi bien de mousses que de végétaux supérieurs, en provenance des groupements\* environnants (Boulet, 1996). D'une manière générale, se sont des végétaux supportant l'alternance de périodes sèches et de périodes humides qui s'installent (Sauveterre, 1985), tels que : *Aira praecox*, *Hypochaeris radicata*... (Boulet, 1996), *Asplenium adiantum-nigrum*, *A. septentrionale*, *Ceterach officinarum*, *Sedum hirsutum*... (Frain, 1991).

Dans le Limousin, les replats de fronts de taille constituent des aires xériques\* pouvant être colonisées par quelques espèces de lichens (*Cladonia fimbriata*), de bryophytes\* (*Polytrichum piliferum*), de graminées (*Vulpia myuros*...) associées au nard de Haller (*Micropyrum tenellum*), une graminée annuelle\* raide et érigée, très prolifique dans ces stations\* (Frain, 1991). Ce cortège\* d'espèces doit supporter des conditions extrêmes de sécheresse et d'échauffement du substrat\*. L'apparition du Bouleau et du Genêt à balais est à noter mais, dans l'ensemble, le rajeunissement fréquent du substrat\* (effet éolien), permet le maintien de cette association pionnière\*.

## • Les éboulis

Les éboulis, amas de blocs, pierriers sont facilement colonisés, pourvu qu'ils soient stables et enrichis en particules fines. En dehors des espèces primitives : lichens, mousses (groupement\* à *Grimmia pulvinata*), le Bouleau pubescent (*Betula pubescens*) est le seul capable, dans le cas des carrières de Basse-Normandie, de coloniser des éboulis mobiles à fraction minérale très grossière (surtout des blocs > 20 cm) (Boulet, 1996). Cette espèce semble être remplacée par le Bouleau verruqueux (*Betula pendula*) dans les carrières du Limousin (Frain, 1991), sur les pentes des terrils\* miniers (Petit, 1980) et dans les sites dégradés d'Europe centrale (Prach & Pysek, 1994 ; 2001).

D'autres espèces (Figure 48) semblent bien adaptées à cette topographie particulière : la petite Oseille (*Rumex acetosella*) dans des carrières de Basse-Normandie (Boulet, 1996), l'Oseille à feuilles rondes (*Rumex scutatus*) des éboulis alpins et des terrils\* du nord de la France (Petit, 1980) et des carrières de granite près de Limoges (Frain, 1991). La petite Oseille colonise plutôt les éboulis dont les teneurs en pierrailles (des gravillons de 2 à 5 mm, aux cailloux de 2 à 20 cm) représentent plus de 50% de la fraction minérale. L'ensemble repose sur un horizon de particules fines qui facilite la progression de l'éboulis. L'extrémité de la racine de l'Oseille prospecte l'horizon argileux. La plante suit le glissement progressif de la fraction grossière grâce à un allongement considérable et une élasticité du système racinaire. Dans des carrières d'Ille-et-Vilaine, Sauveterre (1985) observe également des saules et des ronces émergeant entre les blocs de pierres.

Dans les éboulis où s'est formé un lithosol\* très filtrant et pauvre en matière organique, constitué de sable et de graviers en mélange, une pelouse\* à *Sedum anglicum* apte à résister à la sécheresse s'installe fréquemment. À proximité du littoral, l'association à *Sedum anglicum* peut, lorsque l'éboulis est stable, contribuer à une micro pédogenèse\* par l'accumulation d'humus. Une fois que la couche du micro-ranker\* atteint quelques centimètres, elle peut être remplacée par la pelouse\* xérophile à Canche précoce (*Aira praecox*). Si la pente est faible, le phénomène se poursuit et la pelouse\* mésoxérophile\* à Agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) se ferme progressivement et finit par la remplacer. Une évolution régressive peut avoir lieu par un rajeunissement de l'éboulis une année exceptionnellement sèche (Géhu et al., 1977, in Boulet, 1996) ou sous l'effet du pâturage par les lapins (Boulet, 1996).

Les éboulis peuvent également constituer des zones d'abri ou d'alimentation pour des reptiles, quelques mammifères (la Fouine, l'Hermine et le Renard) et certains gastéropodes (Sauveterre, 1985).



**Figure 48**L'Oseille à feuilles rondes, *Rumex scutatus*

Marjorie Blamey (In Blamey &amp; Grey-Wilson, 1991)

Des bourgeons ascendants (Ba) apparaissent au niveau du collet de la racine principale (Rp) de l'Oseille à feuilles rondes, *Rumex scutatus*. Leur développement donne des rameaux qui percent directement la couche pierreuse. On observe une courbure de l'appareil souterrain, résultat de l'entraînement vers l'aval des parties aériennes (d'après Petit, 1990).

#### • Les remblais

Les substrats\* meubles, graviers et sables, sont colonisés d'autant plus vite (dès la première saison) et abondamment qu'ils contiennent des particules fines (argiles et limons) (Sauveterre, 1985). Ce sont en général des plantes annuelles\* (essentiellement des graminées) qui s'implantent. La fixation des pentes mobiles par ces pionnières\* permet peu à peu l'installation de formations\* plus stables au sein desquelles les espèces pérennes deviennent dominantes. Certains bryophytes\* affectionnent ce type de milieux ; c'est le cas du groupement\* à *Polytrichum piliferum* qui s'installe sur substrats\* filtrants qui ressuient rapidement. La pelouse\* à Canche précoce (*Aira praecox*) y trouve également des conditions favorables à son installation. Cette formation\* très discrète est dominée par la Canche précoce disposée en touffes menues à l'aspect soyeux dont émerge parfois la Vulpie queue de rat (*Vulpia myuros*) (Boulet, 1996).

La stabilité de ces substrats\* meubles joue un rôle important ; dans la mesure où une pente trop forte est sujette à de petits éboulements au gré du gel, du ruissellement, du passage d'animaux..., la végétation ne peut s'y implanter durablement, chaque éboulement renvoyant à la situation initiale (Sauveterre, 1985). Certaines pentes non stabilisées peuvent être colonisées par le Bouleau (Boulet, 1996), le Galeopsis à feuilles étroites (*Galeopsis angustifolia*), la Linaire commune (*Linaria repens*), l'Épilobe des collines (*Epilobium collinum*), etc. (Frain, 1991).

Comme pour les merlons\*, les remblais riches en azote sont colonisés par des groupements\* rudéraux\* nitrophiles\* : Matricaire (*Matricaria discoidea*), Renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*).

### • Les merlons

Le substrat\* constituant les merlons\* est plus stable et riche en terre végétale, ce qui entretient une certaine fraîcheur et lui donne un caractère mésophile\*. Boulet (1996) constate ainsi que tous les groupements\* hygrophiles\*, mésohygrophiles\*, mésoxérophiles\* et xérophiles\* sont exclus des merlons\*. Le substrat\* est meuble et favorise l'installation très rapide d'espèces telles que l'Ajonc d'Europe ou le Genêt à balais qui peuvent alors former des peuplements mono-spécifiques. Ces groupements\* ne sont d'ailleurs pas caractéristiques des carrières, mais de leur environnement proche.

Les merlons\* sont également colonisés par des groupements\* rudéraux\*, indépendants de la nature géologique (acide ou basique) de la roche mère, et riche en espèces nitrophiles\* (Figure 49) : Mélilot blanc (*Melilotus albus*), Tussilage (*Tussilago farfara*), Grande ortie (*Urtica dioica*). Ils profitent des teneurs en azote, phosphore et potassium élevées. Ainsi, plus encore que pour tous les autres groupements\*, cette végétation est sous l'influence directe de l'homme et l'arrêt des actions anthropiques\* suffit à entraîner leur disparition (Boulet, 1996).

**Figure 49** Merlon\* colonisé par le Tussilage (*Tussilago farfara*).  
(Photo ENCEM)



### • Les carreaux

Boulet (1996) a reconnu huit groupements\* colonisant uniquement le carreau\* des carrières. Ils sont en général mésohygrophiles\* (6), voire hygrophiles\* (1), traduisant une imperméabilisation importante du substrat\* suite à sa compaction et qui entraîne une stagnation de l'eau.

Sur les carreaux\*, l'évolution de la végétation est rapide et, en règle générale, les stades pionniers\* s'installent dès l'arrêt des perturbations\*. C'est ainsi que la prairie\* à jonc acutiflore, *Juncus acutiflorus* (zones de suintements où l'eau peut s'écouler), le groupement\* à bryophytes\* (*Polytrichum commune*), la lande\* à Bruyère à quatre angles (*Erica tetralix*) et le groupement\* à Jonc bulbeux, *Juncus bulbosus* (qui s'installe dès qu'une fine couche de boue s'est déposée) ne sont présents que sur le carreau\*. Le groupement\* à bryophyte (*Ceratodon purpureus*), plus ubiquiste, tolère des inondations hivernales ou des assèchements estivaux intermittents et de faible durée. Les rhizomes des Massettes (*Typha latifolia*) baignent dans l'eau stagnante relativement profonde des dépressions.



L'implantation des pelouses\* pionnières\* xériques\* (Figure 50) est plus ou moins ralentie selon le degré de compaction du substrat\*. C'est le cas de la pelouse\* très ouverte à Canche précoce (*Aira praecox*) qui s'installe plutôt sur les aires de stockage de sable ou de graviers (voir plus bas) et de la pelouse\* à Agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) présente sous la forme d'un tapis en général fermé mais pouvant s'accompagner d'espèces de landes\* dont notamment la Callune.

**Figure 50**

Pelouse\* à Canche précoce, *Aira praecox*  
(Photo ENCEM)



Ces observations effectuées pour le Massif armoricain peuvent être complétées par celles de Frain (1991) concernant des colonies de lichens plus ou moins imbriquées avec des tapis de mousses (*polytrics*), dans des carrières du Limousin. Ces plages à lichens de type cladonies (*Cladonia subulata*, *C. fimbriata*, *C. major*...) occupent des surfaces de quelques m<sup>2</sup> du carreau\*, sur substrat\* à forte teneur en sable et gravier, issu de la désagrégation du granite ou du gneiss. Elles viennent en contact avec des pelouses\* proches de celles évoquées précédemment (groupements\* à Vulpie queue de rat, *Vulpia myuros*, Canche caryophyllée, *Aira caryophyllaea*...) et peuvent être considérées comme «indicateurs d'une phase de vieillissement» de groupements\* xériques\*. Frain (1991) suggère que ces plages lichéniques ont succédé (hypothèse d'une action inhibitrice d'acides lichéniques ou de semi-parasitisme) aux plages à polytrics, puisque ces groupements\* ne s'observent que dans des carrières anciennes. Il est probable que ce stade lichénique est provisoire et cède la place à d'autres formations\* telles que des pelouses\* à graminées vivaces\*. On peut également rapprocher ces observations de celles concernant le groupement\* à Polytric (*Polytrichum piliferum*) et à Bouleau verruqueux (*Betula pendula*) de Petit (1980) sur des terrils\* plats. Le Bouleau verruqueux, par ses racines très superficielles et denses, entre en compétition avec les espèces herbacées\* qui pourraient apparaître. Seuls, mousses et lichens se développent. Les populations\* de lapins entretiennent de surcroît cet état, en broutant les quelques herbacées\* existantes.

### 3.2.5.2 Facteurs pédologiques

Comme précédemment évoqué, les facteurs pédologiques interviennent fortement dans la caractérisation des unités de végétation des carrières de roches massives. Ils agissent surtout par l'économie en eau du substrat\* et le gradient trophique (teneur en nitrates...). En dehors des zones des remblais et merlons\* formés des terres de découverte\*, des sols peuvent se former progressivement à tous les niveaux de la carrière : sur de grandes étendues du carreau\* comme dans les failles des fronts de taille et dans les interstices des amas de blocs et cailloux.

Une augmentation de la profondeur des sols est observée, depuis les groupements\* pionniers\* jusqu'aux groupements\* forestiers. Toutefois, ceux-ci restent peu évolués par rapport à la végétation qui les surmonte, et la profondeur des sols dépasse rarement 30 cm. En effet, il n'est pas rare d'observer, dans les carrières acides, des chênaies sur sol très peu évolué (podzol\*-rankers\*) (Boulet, 1996). Ce sont toujours (à l'exception des terres de surfaces conservées) des sols pauvres présentant des carences importantes en éléments nutritifs majeurs (N, P, K) (Boulet, 1996 ; Frain, 1991).

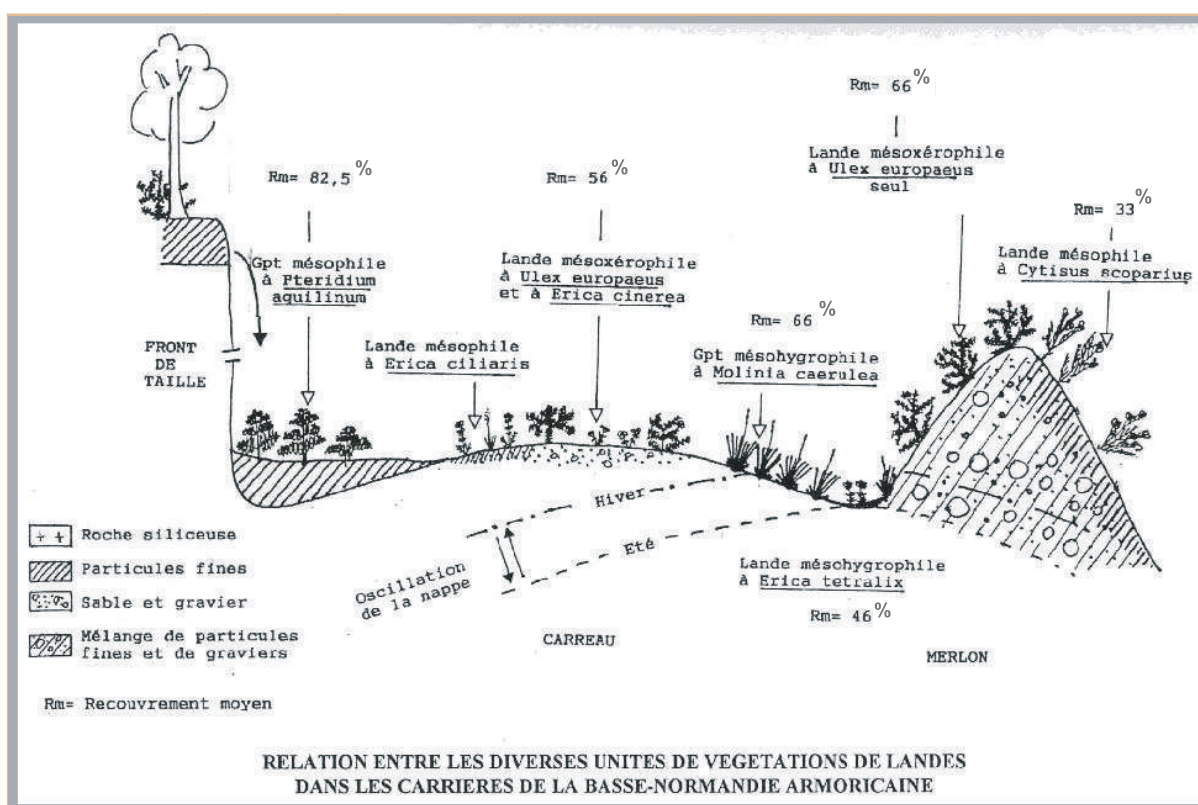
La formation de sols profite à certains groupements\* telles que les pelouses\* à Canche précoce (*Aira praecox*) et Agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) signalées plus haut, mais elle permet surtout l'installation de landes\* et de formations\* arbustives et arborées.

### • Les landes

On retiendra de Boulet (1996) que le degré d'humidité du substrat\* et la profondeur du sol semblent être les facteurs déterminants dans la localisation et la présence des groupements\* de landes\* (Tableau 14 et Figure 51 ).

| Tableau 14 Situation stationnelle relative des groupements* de lande* en fonction de la profondeur et du degré d'humidité des sols (d'après Boulet, 1996) |                                                                                           |                                   |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                           | Sol squelettique                                                                          | Sol plus profond                  | Sol très profond       |
| <b>Landes* mésoxérophiles*</b>                                                                                                                            | Landes à Ajonc d'Europe et Bruyère cendrée<br>Lande à Ajonc de Le Gall et Bruyère cendrée | Lande haute à Ajonc d'Europe seul |                        |
| <b>Landes* mésophiles*</b>                                                                                                                                | Lande à Bruyère ciliée                                                                    | Lande haute à Genêt à balais      | Groupe à Fougère aigle |
| <b>Landes* mésohygrophiles*</b>                                                                                                                           | Lande à Bruyère à quatre angles                                                           | Groupe à Molinie                  |                        |

**Figure 51** Relation entre les différentes unités de landes\* dans les carrières de la Basse-Normandie armoricaine (Boulet, 1996)





Les landes\* et notamment le groupement\* à Ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*) et Bruyère cendrée (*Erica cinerea*) constituent l'un des groupements\* les plus banals que l'on rencontre dans les carrières de Basse Normandie (Figure 52) (Boulet, 1996).

**Figure 52**

Lande\* haute à Genêt à balais (*Cytisus scoparius*)  
et Ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*)  
(Photo ENCEM)



L'Ajonc d'Europe, la Callune et la Bruyère cendrée s'installent sur toutes les topographies et tous les substrats\* de la carrière. Ces espèces poussent aussi bien sur le carreau\* que sur les merlons\* et il n'est pas rare qu'elles profitent du moindre interstice des fronts de taille. L'Ajonc est une légumineuse dont les nodosités\* symbiotiques\* lui permettent de fixer l'azote atmosphérique, palliant ainsi la déficience des substrats\* oligotrophes\* des carrières. Cela explique leur rôle pionnier\* et enrichissant.

Les landes\* sèches s'installent sur les sols squelettiques et filtrants des carreaux\* et, avec le temps, l'accumulation de matière organique va permettre l'installation de groupements\* fermés à ajoncs quasi monospécifiques. Lorsque le sol est plus profond et plus riche en éléments nutritifs, des landes\* hautes à Genêt (très représentées dans les carrières du Limousin d'après Frain, 1991) ou à Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) peuvent apparaître. Si cette évolution du sol est associée à une humidité persistante, les groupements\* à Molinie sont les plus fréquents.

#### • Les formations arbustives et arborescentes

Boulet (1996) identifie dans les carrières acides quatre groupements\* qui s'individualisent selon un gradient trophique et un gradient hydrique (Tableau 15) :

- les substrats\* les plus pauvres à humus oligotrophe\* acide sont occupés par les **bétulaies\*** ;
- sur un type de sol similaire mais plus humide se développent les saulaies ;
- les chênaies se caractérisent par un mull\* moins acide de type mésotrophe\* ;
- l'aulnaie\* plus mésophile\* occupe les stations\* les plus humides.

**Tableau 15**

Situation stationnelle des groupements\* arbustifs et arborescents en fonction du gradient trophique et du degré d'humidité des sols (d'après Boulet, 1996).

|                          | Mésoxérophile*                   | Mésophile*                                            | Hygrocline*       | Mésohygrophile*      |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|
| <b>Acidiphile*</b>       | Bétulaie* pionnière* sur éboulis | Bétulaie pionnière* sur carreau*<br>Chênaie à Callune |                   | Saulaie à Saule roux |
| <b>Mésoacidiphile*</b>   |                                  | Chênaie à Aubépine et Prunellier                      |                   |                      |
| <b>Neutroacidicline*</b> |                                  |                                                       | Aulnaie*-frênaie* |                      |

La **bétulaie\*** à Bouleau pubescent (*Betula pubescens*) constitue la formation\* boisée la plus fréquente dans les carrières de Basse-Normandie (Figure 52). Si les sols sur lesquels reposent les bétulaies\* des carreaux\* sont humides une bonne partie de l'année, ils ne sont pas saturés en eau, voire inondés toute l'année comme dans le cas des saulaies. La roche mère, constituée le plus souvent de grès, donne après altération un sol sableux aux réserves hydriques relativement faibles (podzol\* ferrugineux) dont l'horizon humifère, noir, est peu épais (5 à 6 cm) et peu actif. Le Bouleau pubescent, plante pionnière\* de milieu oligotrophe\* par excellence, colonise efficacement les éboulis aux propriétés mésoxériques.

**Figure 53** Le Bouleau pubescent (*Betula pubescens*)  
(Photo ENCEM)



Le Bouleau pubescent (*Betula pubescens*), plante pionnière\* par excellence, se distingue des autres espèces ligneuses\* par son aptitude à coloniser les éboulis mobiles composés de blocs (taille > 20 cm). Cette capacité provient en particulier de deux adaptations morphologiques remarquables. La première lui permet de résister aux élévations de température des blocs exposés au soleil durant les journées d'été (la portion de tige, le plus souvent le collet, qui se trouve au contact des roches échauffées montre un important épaississement). La deuxième aptitude concerne la plasticité de l'espèce dont le tronc se courbe sans casser sous le poids des blocs qui descendent par gravité. A ces deux atouts on peut ajouter le développement racinaire très dense et abondamment mycorhizé\* qui va lui permettre de s'installer sur un substrat\* très pauvre en éléments nutritifs (Boulet, 1996).

La **saulaie** à Saule roux (*Salix acuminata*) s'installe sur les mulls\* oligotrophes\* à mésotrophes\* humides. Le Saule roux (Figure 54) se comporte comme une espèce pionnière\*, soit sur les carreaux\* de carrières, humides une grande partie de l'année, soit au pied d'éboulis d'exposition nord, où règne une certaine fraîcheur entre les blocs. Mais, contrairement au Bouleau, il ne colonise pas les pentes.

La strate arborescente des **chênaies** acidiphiles\* est dominée par le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) associé parfois à l'Érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et au Frêne (*Fraxinus excelsior*). Elle s'accompagne d'une strate arbustive bien développée et, en dehors du Bouleau, le Noisetier (*Corylus avellana*), le Prunellier (*Prunus spinosa*), le Saule marsault (*Salix caprea*) ou encore l'Aubépine (*Crataegus monogyna*) sont rencontrés. La strate herbacée\* comprend aussi bien des espèces de landes\* que des taxons\* rudéraux\*, avec un fond important d'espèces forestières. Si la tendance générale de cette chênaie est acidiphile\*, deux tendances divergentes sont toutefois observées : l'une, fortement acidiphile\*, comporte un groupe d'espèces acidiphiles\* (Ajonc d'Europe, *Ulex europaeus*, Callune, *Calluna vulgaris*, Bruyère cendrée, *Erica cinerea*...); l'autre nettement plus mésophile\*, sans espèces de landes\*, se distingue notamment par la présence de l'Aubépine et du Prunellier.



**Figure 54**

Saulaie à Saule roux, *Salix acuminata*  
(Photo ENCEM)



L'**aulnaie**\* correspond précisément à l'aulnaie-frênaie\* pionnière\* que Boulet (1996) a observée dans des carrières de schistes. Cette formation\* se met en place uniquement lorsque des conditions d'humidité du substrat\* sont suffisantes. La strate arbustive est peu développée et elle s'accompagne d'un cortège\* important d'espèces hygrophiles\* (*Juncus acutiflorus*, *J. effusus*, *Agrostis canina*). L'auteur la considère trop récente pour la caractériser plus précisément.

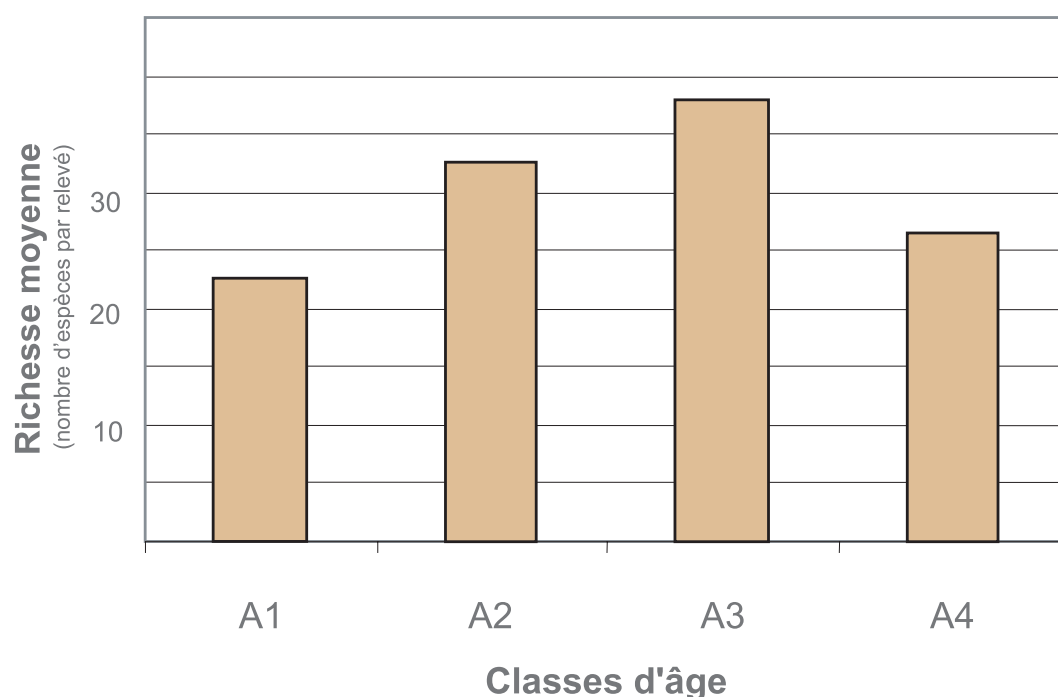
### 3.2.6 Age de la carrière

La phase de colonisation est variable d'un site à l'autre, en particulier pour les végétaux. Dans les premiers temps, les caractéristiques du substrat (fragmentation, porosité...) et des sols (épaisseur, richesse en nutriments, capacité de rétention en eau...) semblent jouer un rôle prédominant (Frochot *et al.*, 2000). Du caractère drastique et contraignant du milieu dépend l'évolution de la succession\* écologique (Maubert, à paraître).

La richesse floristique spécifique dépend de l'ancienneté de la carrière. Selon le schéma déjà décrit, elle augmente d'abord avec le temps, jusqu'à environ 50 ans, se stabilise, puis diminue vers 100 à 150 ans comme le montre Brunaud (1997a) (figure 55). Cette caractéristique des successions\* écologiques est soulignée par plusieurs auteurs (Frochot & Godreau, 1995 ; Boulet, 1996). Avec l'âge de la carrière se produit une évolution simultanée des sols et des successions\* écologiques, en particulier floristiques. La fermeture du milieu conduit à la disparition progressive de toutes les espèces de milieux ouverts et rocheux, des espèces héliophiles\* et xérophiles (Sauveterre, 1985 ; Frochot *et al.*, 2000 ; Picaud & Petit, 1998...).

**Figure 55**

Évolution de la richesse moyenne en espèces végétales de 30 carrières sèches calcaires d'âge différent  
(A1 : 0-10 ans, A2 : 11-50 ans, A3 : 51-100 ans, A4 : > 100 ans)



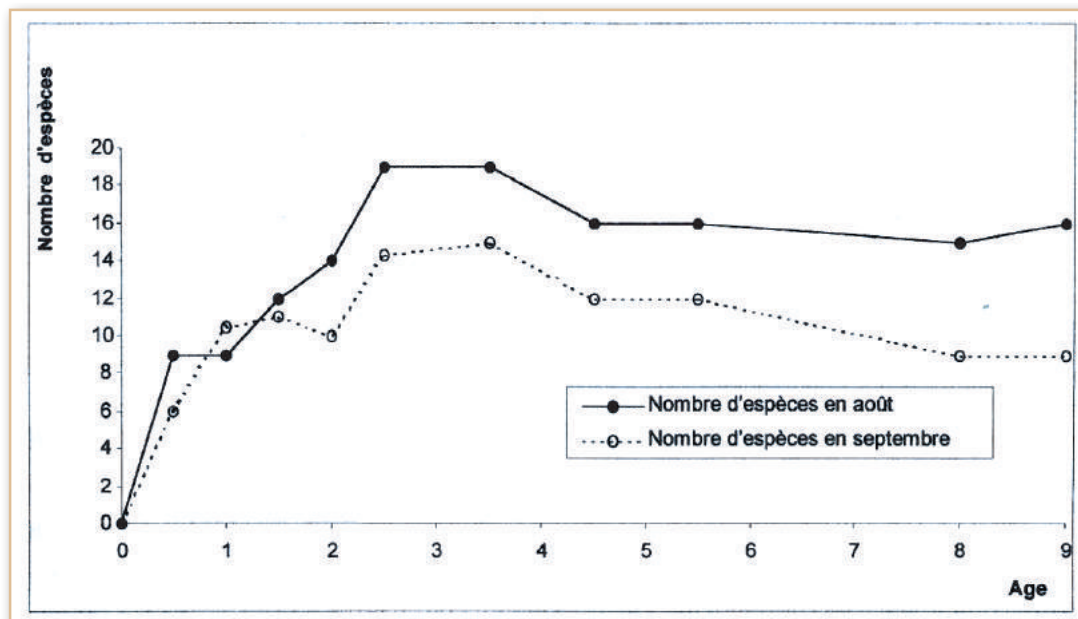
Parallèlement, Frochot *et al.* (2000) constatent que la colonisation par la végétation conduit à une raréfaction progressive, voire une disparition du site, des insectes inféodés aux parois rocheuses, à la terre nue ou aux sables et limons. D'un autre côté, Sauveterre (1985) observe que la diversité des macro-invertébrés est en relation directe avec la diversité floristique et que l'influence de l'âge se traduit également par des changements qualitatifs, le taux d'espèces xérophiles\* diminuant au profit des espèces mésoxérophiles. Le nombre d'espèces de gastéropodes et d'orthoptères augmente avec l'âge alors que, pour les hyménoptères aculéates (guêpes, fourmis, abeilles), les carrières jeunes de Franche-Comté sont plus riches que les plus anciennes. Picaud (1998) observe, sur d'anciennes mines revégétalisées du Limousin, une augmentation du nombre d'espèces d'orthoptères jusqu'à 2,5 ans après la réaffectation des sites, puis une diminution jusqu'à 4,5 ans avant de se stabiliser (Figure 56) Cependant la baisse de la richesse spécifique avec la fermeture du milieu par les ligneux est moins forte pour les insectes que pour la flore. Elle est compensée par une architecture végétale plus complexe, profitant à de nombreuses nouvelles espèces (Brown, 1984).

L'âge des carrières influe sur la présence des oiseaux liés soit aux pelouses\* (carrières jeunes), soit aux bois (carrières plus anciennes). Une augmentation du nombre d'espèces avec l'âge est mise en évidence (même si aucune indication de l'évolution qualitative des communautés aviaires n'est fournie) (Sauveterre, 1985).



**Figure 56**

Évolution du nombre d'espèces d'orthoptères sur d'anciennes mines à ciel ouvert (Haute-Vienne) en fonction de l'âge de leur réaffectation (semis de gazon...) (d'après Picaud, 1998)

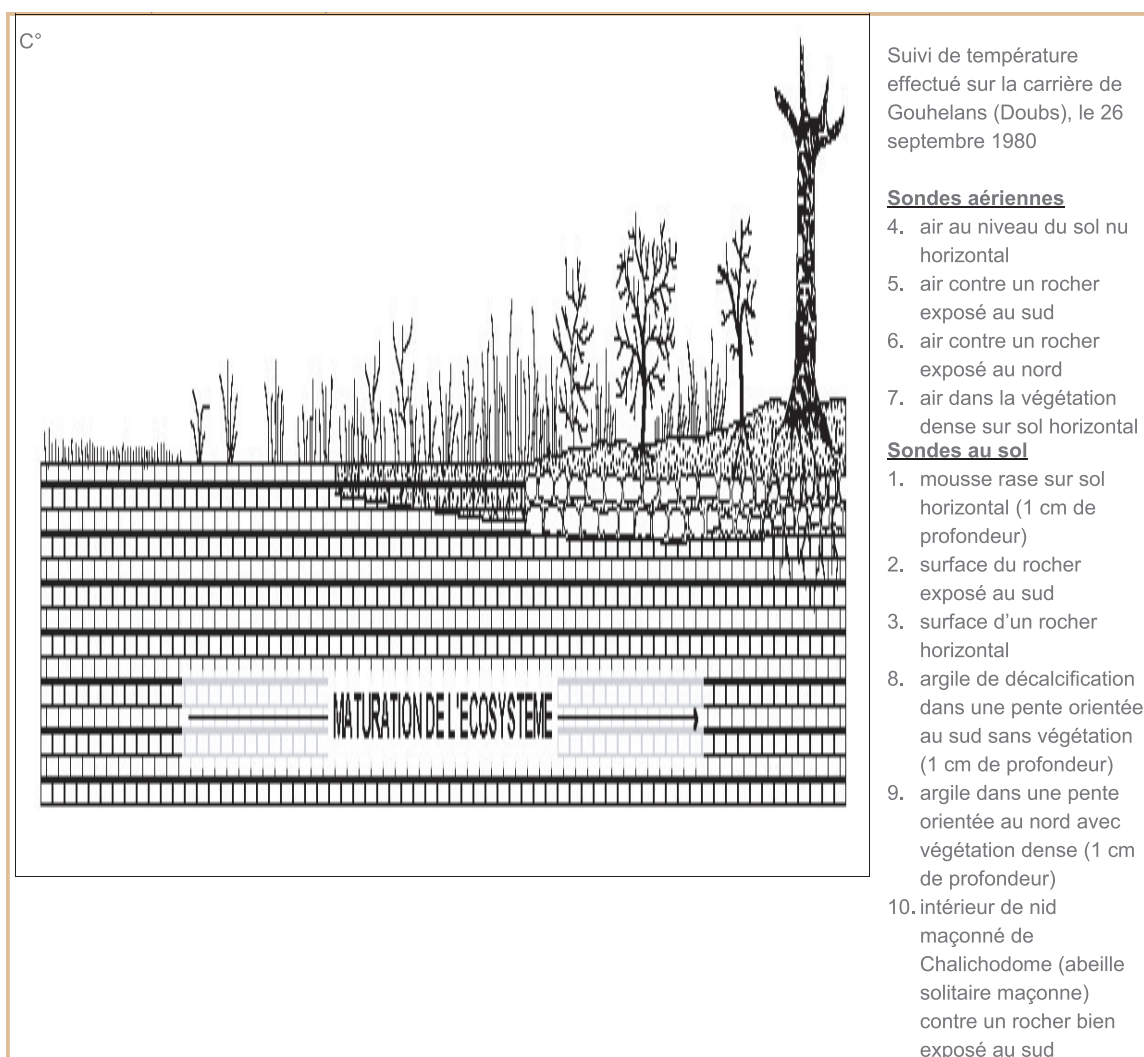


### 3.2.7 Configuration et orientation des carrières

La variété des orientations et des configurations des sites d'extraction (en forme de cirque, en dent creuse, à flanc de coteau...), du fait de la diversité des conditions microclimatiques qu'elles créent, sont autant de facteurs qui influent sur l'écologie des carrières. **Ainsi, des microclimats sont observés en carrière de roches massives** : les fronts de falaise exposés au sud présentent une franche aridité et ce, quelle que soit la zone biogéographique\* dans laquelle s'inscrit la carrière ; *a contrario*, zones d'ombre ou anfractuosités conservent une fraîcheur quasi permanente. Dans le Midi, l'écart de températures sur les parois atteint 10 °C selon qu'elles sont exposées au sud ou au nord. L'hygrométrie varie inversement. Partout, ces écarts de températures, selon l'exposition, expliquent les vitesses de colonisation différentes. Dans le Midi, les expositions est présentent le maximum d'espèces pionnières. Les parois exposées nord, pourtant moins arides, ne sont pas colonisées, car les plantes riveraines, colonisatrices potentielles, sont essentiellement thermophiles\* dans cette région.

La courbe de mesures microclimatiques, présentée ci-dessous (Figure 57), a été établie par Robert *et al.* (1991) sur une carrière calcaire de Franche-Comté. Malgré la date tardive et l'orientation sud-ouest de la carrière, la diversité des comportements climatiques d'un habitat à l'autre au sein de la carrière se révèle très forte. Cela explique la forte diversité biologique observée sur les insectes qui fréquentent ces sites.

**Figure 57** Évolution de la température dans différents habitats d'une carrière  
(Robert *et al.*, 1991)



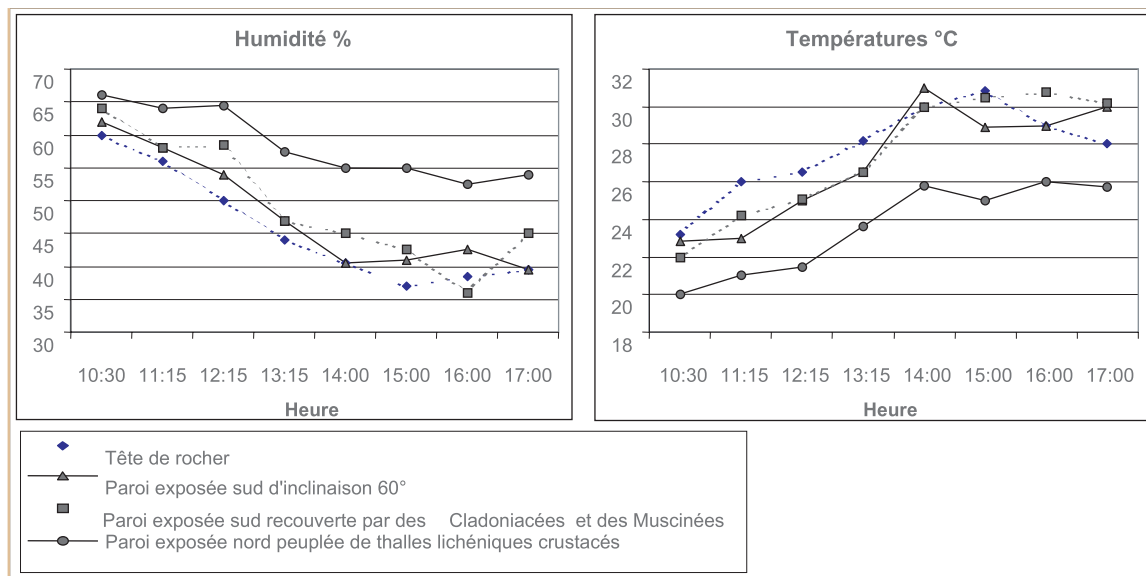
Concernant les carrières calcaires, leur **caractère méridional** est remarqué dans toutes les régions géographiques. Il est d'autant plus marqué que les fronts de taille sont hauts, de couleur blanche et en forme de cirque, concentrant les rayons solaires (Sauveterre, 1985).

Les surfaces rocheuses vont avoir, selon leur agencement dans l'espace, un rôle important sur les conditions écologiques propres aux peuplements qui s'y implantent. Il faut tenir compte de l'inclinaison des parois : elle va conditionner le degré d'humidité et l'éclairement reçu. La déclivité intervient également de manière prépondérante sur l'humidité d'une surface donnée et sur l'écoulement plus ou moins rapide de l'eau, les parois verticales étant plus «sèches». Les faces orientées vers le nord seront uniquement éclairées par la lumière diffuse et celles vers le sud le seront par une lumière directe pendant la plus grande partie de la journée. La résultante étant une température et une humidité relative différentes selon l'orientation des parois.

Les roches constituent des supports sur lesquels l'amplitude des températures (diurne notamment) est beaucoup plus élevée que dans l'environnement. Les effets sélectifs sur les espèces sont déterminants : élévation thermique de 40 °C à 0,2 cm au-dessus du sol «létale pour de nombreuses espèces» (Tort, 1987 et Paul 1977, in Petit, 1991) (Figure 58).

**Figure 58**

Mesures de l'humidité relative et de la température pendant une journée sur des versants rocheux d'Ille-et-Vilaine d'après Massé 1964



Un trop fort éclaircissement peut défavoriser certaines espèces telles que des lichens alors que d'autres mousses (*Polytrichum juniperinum*, *Racomitrium canescens*), le Genêt à balais (*Sarothamnus scoparius*), etc. profiteront d'un ensoleillement important (Frain, 1991).

L'exposition aux intempéries peut également favoriser l'implantation de certaines espèces. Massé (1964) nous donne l'exemple de la formation\* lichénique à *Candelariella coralliza*, *Pertusaria leucosora*... qui se développe toujours sur le sommet des têtes de rochers de schistes rouges exposés aux intempéries. Petit (1980), quant à lui, indique que, durant la saison hivernale, le vent, qui balaie régulièrement la litière du Bouleau, contribue au maintien des mousses sur les surfaces horizontales. Par contre, l'accumulation des feuilles dans les dépressions, favorable à une modification du substrat\*, se traduit par le développement d'espèces particulières comme *Calamagrostis epigeios*.

Les carrières sont réputées pour leurs caractéristiques thermiques qui permettent parfois la remontée d'espèces thermophiles\* ou méridionales comme nous l'avons évoqué pour le Millepertuis à feuilles linéaires (*Hypericum linarifolium*) qui colonise parfois des fronts de taille ou des éboulis à fort ensoleillement en Normandie (Boulet, 1996), l'Andryale sinieuse (*Andryala integrifolia*) en Loire-Atlantique (Chépeau, 1981) ou l'Hélianthème à gouttes (*Tuberaria guttata*). Pour des carrières du Limousin et d'Auvergne, Frain (1991) a remarqué également une «nuance thermophile\*» caractérisée par la relative importance de la flore méridionale, riche d'une trentaine d'espèces.

Sauveterre (1985) observe que la colonisation des roches dures lisses (fronts de taille, gros blocs...) par les lichens, algues et mousses est ralentie dès lors que les faciès à coloniser sont exposés au sud. Selon Frain (1991), sur les blocs de pouzzolane dirigés vers le sud, les mousses (comme *Racomitrium lanuginosum*), sont assez peu couvrantes (< 40%) et leur nombre est assez réduit, *Racomitrium heterostichum* n'étant pas rencontré. En revanche, sur les faces ouest et nord, mieux arrosées et moins ensoleillées, le tapis muscinal est plus dense (recouvrement de 30 à 90%) et les deux *Racomitrium* sont toujours associés et vigoureux. Boulet (1996) constate que si l'exposition des éboulis n'est pas déterminante en comparaison des paramètres physico-chimiques (granulométrie\*, pH), le faciès à Clématite vigne-blanc (*Clematis vitalba*) du groupement\* à Géranium Herbe-à-Robert (*Geranium robertianum*) semble plus thermophile\* (souvent en exposition est et sud-est) que celui à Valériane ou à Polypode (exposition ouest ou nord-ouest). De même, lorsque le Saule roux (*Salix acuminata*) colonise les pieds d'éboulis, ce sont uniquement ceux d'exposition nord, où règne une certaine fraîcheur entre les blocs. Dans le cas des terrils\* miniers, la friche\* à Tussilage (*Tussilago farfara*) occupe des situations de pentes exposées au nord, une formation\* à Orpin âcre (*Sedum acre*) se développe sur les pentes Sud... (Petit, 1980).

La physionomie de la carrière et son orientation peuvent également influencer l'installation d'aires de nidification de certains rapaces, la ponte de reptiles... Ainsi sur la carrière de Kerhoul (ENCEN, 1997), des éboulis exposés au sud constituent une zone de repos diurne pour trois espèces de crapauds : le Crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*), le Crapaud calamite (*Bufo calamita*) et le Crapaud commun (*Bufo bufo*).

Remarquons également que la **moindre présence d'eau** dans ces carrières introduit un élément de variabilité remarquable relativement à l'aridité ambiante, élargissant ainsi considérablement le spectre écologique.

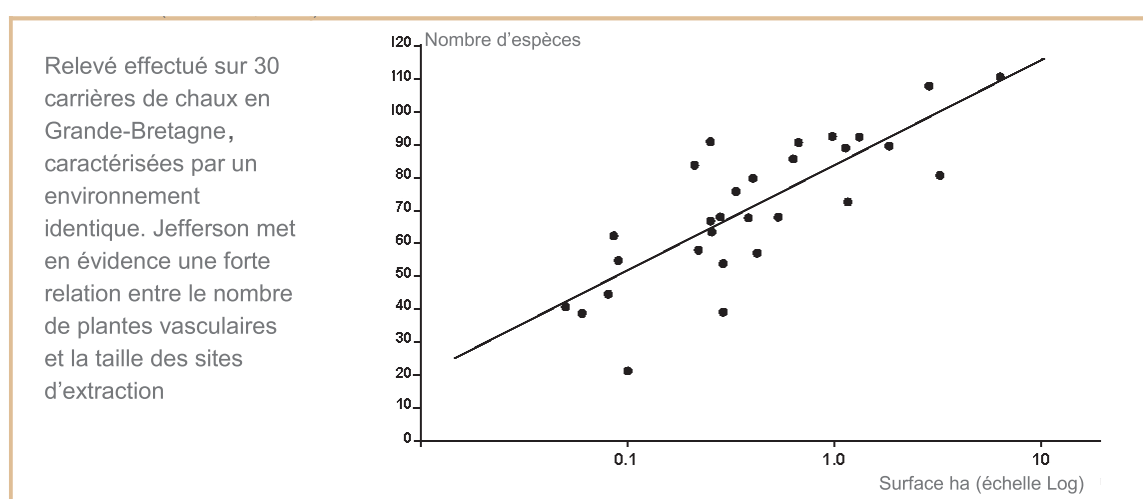
Enfin, l'environnement du site, en déterminant au moins partiellement le microclimat qui règne dans une carrière, oriente le potentiel de colonisation de certaines espèces. Frain (1991) donne l'exemple, en Limousin, du développement de certains lichens (*Cladonia*) qui sont liés à la régularité des précipitations, mais également à l'environnement forestier de certains sites, qui créent un microclimat plus favorable que le climat régional océanique atténué.

### 3.2.8 Superficie de la carrière

Exprimée par la superficie et/ou le périmètre, la taille de la carrière et par conséquent les surfaces de ses différentes composantes sont des facteurs essentiels de son fonctionnement écologique. À la taille de la carrière est associée la diversité de conditions environnementales, la superficie des différents habitats\* et leur arrangement spatial. En fonction de ces caractéristiques, des espèces aux exigences écologiques variées, trouveront dans les carrières une partie ou l'ensemble des ressources (trophiques, spatiales...) dont elles ont besoin.

A la taille est également associé, selon la théorie des équilibres dynamiques appliquée aux systèmes insulaires, le nombre d'espèces qui peuvent coloniser le site. Des tentatives d'application de ce modèle appréhendant la carrière comme un système isolé ont eu lieu (Gray, 1982 ; Park, 1982 ; Jefferson, 1984), mais elles sont remises en cause (Harvey, 1982). Ces sites ne sont pas de vraies îles et leur potentiel de colonisation dépend essentiellement de la nature de l'environnement qui les entoure (Hodgson, 1982 ; Boulet, 1996...) ou des voies d'accès à la colonisation (e.g. un chemin pour les orthoptères, Picaud, 1998). Néanmoins l'étude de Jefferson (1984), effectuée pour des carrières insérées dans des contextes environnementaux très proches (83,4% de terre cultivée et 6,4% de prairies\* permanentes), montre une **relation très nette entre la taille des carrières et le nombre croissant d'espèces les ayant colonisées** (Figure 59).

**Figure 59** Nombre d'espèces de plantes vasculaires en fonction de la taille de la carrière (Jefferson, 1984)



La plupart des insectes et plantes paraissent indifférents à la taille de la carrière, quelques mètres carrés suffisant à la réalisation de leur cycle de vie. A contrario, il a été mis en évidence que certaines espèces, telles que des oiseaux, nécessitent une surface minimum pour s'installer (Chépeau, 1981 ; Frochot, 1993). Les carrières peuvent cependant représenter, pour ces derniers, des **espaces complémentaires** où certaines espèces trouvent des ressources (alimentaires, site de nidification...) qu'elles intègrent dans leur territoire. De cette façon, elles participent de façon plus ou moins déterminante au maintien d'espèces d'oiseaux dans un secteur géographique.



Dès que les observations portent sur des organismes de grande taille (exemple des grands mammifères), le facteur surface se définit comme facteur limitant. De façon générale, **la diversité faunistique augmente avec la taille du milieu et la surface du territoire vital est proportionnelle à la taille des espèces** (Blondel, 1986). Ainsi une carrière de faible étendue, même si elle présente de nombreux habitats, ne sera occupée que par un nombre réduit d'espèces de petites tailles. Cette réflexion peut être élargie au volume de la carrière de façon à intégrer la hauteur des fronts de taille : l'installation de grands rapaces n'est possible que sur des fronts de taille de plusieurs dizaines de mètres (Frochot, 1993 ; Moore *et al.*, 1997).

Ces propos doivent être nuancés par le fait que des carrières de faible taille peuvent accueillir une richesse floristique et faunistique assez importante. Ainsi sur l'ancienne carrière d'extraction de mylonite (roche métamorphique acide) de Kerhoual (Morbihan), sur une superficie de 2,5 ha comprenant plusieurs zones humides, ENCEM (1997) relève la présence de 7 espèces d'amphibiens et de 118 espèces végétales faisant partie de six groupements\* végétaux différents (Figure 60).

**Figure 60**

L'ancienne carrière de Kerhoual (Morbihan)  
(Photo Ouest-Aménagement)



Malgré tout, la surface limite la taille des populations\* qui s'y développeront et, de ce fait, la pérennité des espèces représentées. En effet, plus la population\* d'une espèce est nombreuse, plus elle a de chance de se maintenir (Blondel, 1986).

La « sinuosité » (le rapport périmètre de la carrière / surface de la carrière) a une influence bien soulignée pour les gravières en eau avec le linéaire de berges (Kovacs *et al.*, 2001). Elle est évoquée par Sauveterre (1985) pour les carrières de roches massives, mais son rôle et son influence ne sont pas analysés.

La sinuosité d'une carrière affecte également le peuplement des sites. En effet, plus le ratio est grand, plus les zones de contact entre la carrière et son environnement sont nombreuses, ce qui peut favoriser la colonisation du site. En parallèle, le site perd de son caractère d'îlot protégé des influences extérieures telles que l'écoulement de lixiviats agricoles azotés. Son microclimat y est moins marqué. Son originalité est moins évidente dans le paysage.

### 3.2.9 Modalités d'exploitation

Les modalités du schéma d'exploitation de la carrière concernent l'ensemble des actions de mouvements de matériaux (transport, enlèvement, découverte, dépôt, reprise...) tout au long du déroulement de la phase d'extraction, le rabattement ou non de la nappe phréatique, l'utilisation de mines pour abattre les fronts de taille\*... L'importance de ce facteur sur le fonctionnement écologique des carrières est souvent pressentie mais nous ne disposons que de très peu d'informations sur cet aspect. Plusieurs observateurs rapportent en effet qu'un nombre non négligeable d'espèces pionnières autant végétales qu'animales (arachnides, gastéropodes...) colonisent les carrières dès les premières phases d'extraction.

Les mouvements de matériaux terreux ou minéraux et la mise à nu de roches permettent à des végétaux de s'implanter rapidement, soit à partir de la banque de graines en place, soit par des semences apportées par le vent notamment. Leur installation peut être remise en cause lors d'un déplacement des remblais ou d'une avancée du front de taille...

Les dépôts de particules fines (poussières) provenant de l'extraction des carrières peuvent ralentir le développement des lichens. Loppi & Pirintsos (2000) ont ainsi montré que, indifférente à la nature chimique des poussières (basique ou acide), la diversité des lichens épiphytes est directement liée à la proximité des carrières et par conséquent à la quantité de poussières déposée. Le dépôt de poussières sur les feuilles est également pressenti comme facteur limitant de leur consommation par des orthoptères et par conséquent du développement de ces derniers.

En l'absence d'éléments tangibles, on notera que Sauveterre (1985), reprenant les travaux de J.C. Robert portant sur des carrières du Doubs, accorde beaucoup d'importance à la saison du dernier remaniement avant l'interruption définitive de l'exploitation. Il souligne notamment que celui-ci peut favoriser l'espèce qui disséminera ses diaspores à ce moment : ainsi s'expliqueraient des populations\* monospécifiques de saules ou d'érables, alors que la végétation environnante est diversifiée.

Le traitement du sol (Allion, 1993 ; Juffard, 1996), exporté ou restitué, modifie considérablement les conditions écologiques de la recolonisation végétale du site. L'exportation du sol en effet laisse sur le site des habitats à caractère rupestre\*, colonisables par des espèces spécialisées souvent très originales (Figure 61). Sur sol restitué au contraire, les colonisateurs potentiels trouvent des conditions de productivité voisines de celle des sols alentour et de l'état initial du site. Ces conditions favorisent le développement de plantes conformes aux potentialités biogéographiques\* locales, donc plus banales.

Les modalités d'exploitation comme facteur écologique sont donc encore mal connues. Elles devront à l'avenir être mieux comprises afin d'être si possible prises en compte dès la réalisation des schémas d'exploitation.

**Figure 61**

Carrière des Deux-Sèvres  
(Photo Photocoptère)



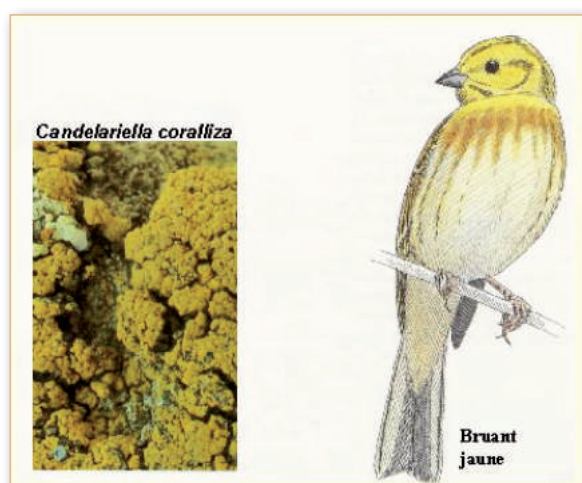
### 3.2.10 Perturbations et pressions anthropiques

L'importance des perturbations\* a été abordé à plusieurs reprises comme facteur écologique des carrières. Elles sont d'origines anthropiques ou naturelles et leur influence est généralement régressive (action rajeunissante).

Ainsi, l'action du vent, par déplacement des dépôts de litières, peut participer au maintien d'espèces pionnières\* sur les replats de fronts de taille. Le gel accélère la fracturation des parois et le mouvement des éboulis et remblais. Les merlons\* et remblais à pente forte sont rajeunis par les petits éboulements provoqués par le passage des animaux. L'alternance d'assecs et de submersions de certaines parties des carrières contraint fortement le développement de certains groupements\* végétaux, de larves d'insectes (libellules...) et d'amphibiens (têtards). Les variations de l'acidité des eaux de ruissellement et des eaux permanentes peut induire la disparition rapide de groupements\* végétaux et animaux, etc.

À cette liste non exhaustive, s'ajoute de façon plus singulière la fréquentation par les oiseaux, les lapins, les lièvres (Massé, 1964 ; Petit, 1980). Ces animaux participent de façon significative à l'augmentation de l'eutrophie par apport notamment de substances azotées sous forme d'excréments et de pelotes de régurgitation pour les rapaces (Figure 62).

**Figure 62** Exemple d'un impact de la faune sur la flore



Des expériences ont montré qu'un apport ponctuel d'excréments faisait «souffrir» certains lichens alors que d'autres au contraire supportaient bien ce traitement (Sernander, 1912, in Massé 1964). Si cet apport se fait de façon constante dans le temps il perd son caractère perturbant et permet à tout un lot d'espèces, telles que le groupement\* à Candelariella coralliza sur schistes rouges, de s'implanter. Les principales espèces d'oiseaux concernées sont la Chouette hulotte, le Faucon crécerelle, le Merle noir, l'Accenteur mouchet, le Bruant jaune... (Massé, 1964).

A ces perturbations\* naturelles s'ajoutent les perturbations\* liées aux activités humaines telles que le dépôt d'ordures ou de remblais, le passage de véhicules «tout-terrain»... ; la mise à nu de roches et les mouvements de matériaux liés à l'activité d'extraction, les détonations lors des tirs de mines, etc. La carrière en activité ne signifie pas pour autant absence d'attrait et d'intérêt. Le cas de la nidification du Faucon pèlerin en Irlande (Moore et al., 1997) et dans diverses régions de France en est un exemple.

La carrière abandonnée par l'Homme comme objet d'exploitation de matériaux devient un lieu de quiétude, échappant aux contraintes anthropiques\* s'appliquant alentour (cultures, boisements de production...). Ainsi s'installent en carrière des espèces d'animaux à la recherche de refuge et de tranquillité (Frochot & Godreau, 1995). Cet élément ne peut être négligé au regard des exemples d'installation en carrières d'espèces ne trouvant plus la tranquillité dont elles ont besoin dans leurs lieux de vie traditionnels. C'est le cas déjà évoqué plus haut, de deux espèces d'oiseaux rupestres\* : le Grand corbeau (*Corvus corax*) et le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) (Quélennec, 2001 ; Debout, 2001). Le Grand corbeau, ainsi que de nombreuses espèces de rapaces, subissent directement le dérangement provoqué par certaines activités de loisir de plein air (plaisance, promenade, VTT, varappe...) et cessent de fréquenter un site dès lors qu'il est trop fréquenté. A contrario, Quélennec (2001) a clairement montré que lorsque certaines formes de perturbations\* directes sont évitées, les carrières, **même en activité**, peuvent constituer des sites complémentaires ou de substitution pour la nidification du Grand corbeau. Ce constat peut sans doute être transposé à d'autres espèces plus ou moins sensibles aux dérangements (divers rapaces diurnes, Chouette chevêche...), mais cela reste à évaluer.

Enfin, notons que les chasseurs considèrent souvent une carrière (en activité ou non) comme une « réserve de chasse » pour lièvres et lapins.



### 3.2.11 Synthèse

Le Tableau 16 récapitule très succinctement l'influence des différents paramètres abordés précédemment. Ne sont retenues ici que les grandes lignes, bien que les interactions entre ces facteurs soient complexes et leurs influences variables, voire contradictoire sur différents sites. Comme l'illustre la Figure 45, chaque site est unique et issu de la coaction de ces facteurs.

**Tableau 16** Les facteurs de variabilité des carrières, synthèse

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Climat                              | Déterminant pour les biocénoses (précipitations, températures...).                                                                                                                                                                                                                    |
| Roche mère                          | Affectent profondément les cortèges* floristiques.                                                                                                                                                                                                                                    |
| Environnement de la carrière        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la connectivité (corridors biologiques, axes migratoires...)</li> <li>- Complexe : un environnement riche peut être un milieu source pour la colonisation de la carrière ou au contraire se révéler plus attractif.</li> </ul> |
| Eau                                 | Influence déterminante sur les peuplements floristiques et faunistiques (amphibiens, insectes...).                                                                                                                                                                                    |
| Granulométrie et nature du substrat | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toutes les zones d'exploitation de la carrière sont occupées par des végétaux. Plus que la granulométrie du substrat, il semble que ce soit davantage sa réserve en eau qui conditionne l'implantation des espèces.</li> </ul>               |
| Âge des carrières                   | Modification qualitative et quantitative des peuplements, variable selon les groupes biologiques.                                                                                                                                                                                     |
| Orientation des carrières           | À l'origine de microclimats qui agissent sur la répartition des espèces.                                                                                                                                                                                                              |
| Superficie du site                  | D'une façon générale, plus le site est grand plus il est favorable à la flore comme à la faune ; toutefois des contre-exemples existent.                                                                                                                                              |
| Modalités d'exploitation            | Impact mal connu.                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Perturbations                       | Effet rajeunissant « positif » si elles sont proches des dynamiques naturelles.                                                                                                                                                                                                       |



### 3.3 SPÉCIFICITÉS DES CARRIÈRES DE ROCHES MASSIVES

Les carrières de roches massives calcaires et de nature siliceuse, telles que celles du Massif armoricain, se distinguent entre elles et des carrières en eau (de type gravières, exploitant un gisement alluvial) du fait de caractères écologiques propres.

#### ► Carrières de roches calcaires et éruptives (roches massives) / gravières (roches meubles)

Les gravières sont souvent caractérisées par la présence d'une nappe d'eau permanente sur la surface du site. Elles présentent de ce fait une capacité d'accueil à la flore et à la faune remarquables. Les successions\* écologiques s'y déroulent plus rapidement et les sites sont nettement plus productifs. Rapidement colonisées - forte biomasse d'une végétation envahissante, nombreux canards -, ces gravières changent d'aspect en quelques années.

Les carrières sèches présentent un tout autre type d'espèces, plus thermophiles\*, plus rares, plus nombreuses (Sauveterre, 1985) et présentes durant une phase beaucoup plus longue de colonisation des sites. Il faut également noter que les carrières de roches massives, malgré l'enneigement fréquent de la fosse en fin d'exploitation (particulièrement pour les roches éruptives), présentent **peu de similitudes avec les gravières en raison de la différence de profondeur de la surface en eau.**

#### ► Carrières de roches calcaires / carrières de roches éruptives

La présence de silice, en plus ou moins grande quantité dans les roches éruptives, induit la présence d'espèces végétales plus ou moins acidiphiles, différentes de celles des milieux calcicoles\*. Le nombre d'espèces végétales est moins important que sur substrat calcaire. Le substrat acide est en général plus compact, plus résistant à l'érosion et donc moins friable. *A contrario* Usher (1979) montre que les carrières calcaires, dont l'altération du substrat est plus rapide, fournissent plus rapidement des minéraux assimilables par les plantes. Sur roche siliceuse, la colonisation végétale paraît également plus lente.

Sauveterre (1985) nuance néanmoins cette opposition théorique et, sur la base d'inventaires réalisés sur une quinzaine de carrières des différents types, affirme que la nature de la roche mère, calcaire ou acide, ne semble pas déterminante pour le mode et la vitesse de colonisation. Pour les végétaux supérieurs, la priorité est de trouver des supports à l'enracinement, éléments de couverture plus ou moins fracturés, fissures, poches de sédiments fins (issues de dissolution ou de fracturation). La présence d'eau sur le site y est, quel que soit le substrat, également un facteur déterminant du dynamisme écologique. Les groupements rudéraux semblent assez indifférents à l'acidité ou à l'alcalinité du substrat. La distinction apparaît lors de la réalisation des étapes suivantes de la succession\* écologique.

Outre les aspects dynamiques et biologiques, les carrières calcaires se singularisent de leurs homologues en roches éruptives par deux modes d'exploitation presque spécifiques : l'exploitation de matériaux meubles de type éboulis et l'exploitation en carrière souterraine.

- Pour l'exploitation de matériaux meubles de type éboulis, aucune étude ne souligne de différence fondamentale avec les carrières de calcaire massif. Les stades pionniers\* diffèrent quelque peu avec des groupements d'annuelles, la dynamique de recolonisation semble être plus rapide et la diversité spécifique plus faible.
- L'originalité de l'extraction en souterrain se traduit par un potentiel faunistique très élevé pour les chauves-souris, plus rarement pour les invertébrés cavernicoles (ou troglobies). Cet intérêt indéniable est d'ailleurs renforcé par les nombreuses citations d'anciennes carrières souterraines en ZNIEFF et site Natura 2000 par exemple.

Les carrières de roches massives se distinguent des gravières par une **colonisation plus lente et une plus faible productivité.**

Les carrières calcaires ont une réponse à l'érosion qui provoque une altération du substrat et la formation d'un sol plus rapidement que les roches siliceuses où la colonisation végétale se fait plus lentement.

On n'oubliera pas enfin l'intérêt indiscutable pour les chauves-souris dans le cas des anciennes carrières souterraines.

### 3.4 ÉLÉMENTS D'ÉVALUATION DE LA VALEUR ÉCOLOGIQUE D'UN SITE

La « valeur » écologique d'un site fait référence à des notions très discutées par les spécialistes. Néanmoins, il paraît admis que celle-ci intègre les notions de diversité et de rareté des espèces présentes.

#### 3.4.1 Approche multi-critères

Sauveterre (1985) propose d'associer des critères qualitatifs (maintien de biotopes\* en voie de disparition, refuges d'espèces et groupements rares, étapes de migration, vitesse de colonisation, intérêt du nouvel écosystème relativement à celui qu'il remplace) et des critères quantitatifs (nombre d'espèces, biomasse, productivité primaire) pour estimer une valeur écologique. Mais il n'en développe pas d'application concrète et pratique. La quantité d'informations nécessaires et la difficulté d'acquisition de certaines rendent ce type de descriptif particulièrement laborieux à mettre en oeuvre. Sionneau (1993), après analyse des facteurs de variabilité, retient comme déterminants pour la valeur écologique d'un site de carrière les critères liés à :

- **la diversité du biotope\*** : présence de plusieurs substrats de nature différente (eau, sable, roche dure, gravier...) et abondance des zones de contact et de transition de l'un à l'autre ;
- **l'environnement de la carrière** : ouverture sur l'extérieur, originalité du site par rapport aux milieux environnants, communication avec la nappe... ;
- **la diversité de la biocénose\*** : nombre d'espèces et groupements représentés, degré de relations entre espèces (chaînes alimentaires, concurrence...) ;
- **la présence d'espèces rares**, rareté reconnue à différentes échelles régionales, locales... ;
- **l'existence de facteurs limitants** : assèchement des mares, absence de sol, surface du site...

Cette approche quasi exhaustive, mais encore lourde à mettre en oeuvre (expertises écologiques approfondies nécessaires au renseignement de certains critères), est utilisée par Robert *et al.* (1991) sur les carrières de Franche-Comté pour bâtir un référentiel. L'idée développée reprend en effet l'ensemble de ces critères et tente de les concilier avec une approche de terrain simplifiée et accessible au néophyte.

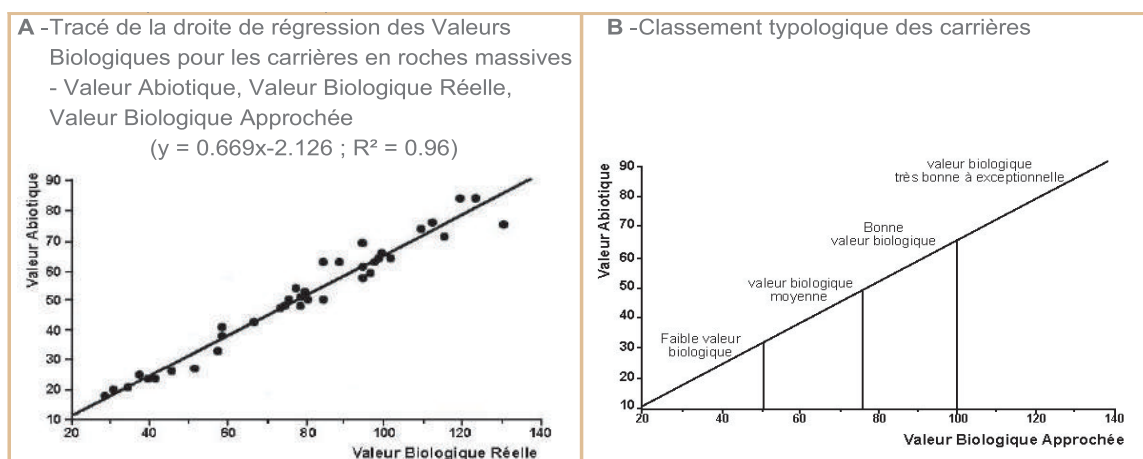
#### 3.4.2 Approche multicritères simplifiée

Robert présente cette **approche multicritères simplifiée** dans un rapport largement diffusé intitulé « Typologie des carrières hors eau de Franche-Comté » (Robert *et al.*, 1991). Parce qu'il n'est pas évident pour un non-écologue, qu'il soit exploitant, aménageur ou administratif, de « deviner » si un site de carrière sera ou non un milieu d'intérêt écologique, le groupe de travail propose une typologie des carrières, fondée sur des expertises scientifiques approfondies et extrapolables à toute la zone nord-est de la France. L'utilisation de cette typologie, sous forme de fiches pratiques, est permise à des non-initiés. Elle repose sur un principe fondamental de l'écologie : chaque espèce vit et se développe sur un milieu caractérisé par des paramètres physiques bien définis.

Dans un premier temps, une évaluation biologique (inventaire des espèces et des groupements, analyse) est menée par des scientifiques et mise en rapport avec les facteurs abiotiques du milieu (climat, géographie, habitats...). La cotation de ces résultats permet de situer chaque carrière sur un diagramme Valeur Abiotique / Valeur Biologique Réelle et d'établir une droite de régression linéaire (Figure 63). Dans un second temps, la Valeur Abiotique du milieu est traduite par le biais du coefficient de régression fourni par les scientifiques en une « Valeur Biologique Approchée » (Figure 63 B).

**Figure 63**

Approche multicritères simplifiée  
(Robert *et al.*, 1991)



La Valeur Abiotique (VA) d'un milieu peut être estimée visuellement par des néophytes : une fiche de cotation simple de différents critères physiques et chimiques est à remplir (Figure 64 et Figure 65). Un mode d'emploi permet de chiffrer un « degré d'intervention humaine » sur un site, ou autres paramètres plus difficiles à quantifier. À partir de la VA ainsi déterminée, le calcul de la Valeur Biologique Approchée (VBA) s'effectue par report sur un abaque (graphique à lecture directe facilitant les calculs numériques servant à déterminer spontanément des résultats obtenus par des calculs dans un système de lignes prédéfinies et préparées d'avance.), fourni pour la région d'étude. La VBA ainsi obtenue est proche de la Valeur Biologique Réelle (VBR) qu'auraient mesurée les spécialistes.

Cette méthode mise au point pour les carrières francomtoises s'applique à un territoire de référence relativement homogène. Elle peut être reproduite dans d'autres régions de France à condition de redéfinir les paramètres permettant d'établir l'abaque mettant en corrélation la Valeur Abiotique et la Valeur Biologique Réelle.

A titre d'exemple, l'établissement d'un tel outil a demandé trois années de travail à l'équipe de Robert (de 1980 à 1983), avec des compléments sur quatre années de plus (jusqu'en 1987). Elle a nécessité de mettre en place une équipe pluridisciplinaire (botanistes, ornithologues, entomologues spécialiste des orthoptères, lépidoptères et hyménoptères) et de disposer d'un nombre d'anciennes carrières ou en exploitation suffisant pour établir la corrélation (une centaine de sites étudiés).

### Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises (Robert *et al.*, 1991)

122



Figure 65

Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises  
(Robert *et al.*, 1991)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>REPORT DE LA VALEUR DE VA</b> <div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px 10px;">VA =</div>                                                                                                                                                                                              |                                                                                           |
| <b>VALEUR BIOLOGIQUE APPROCHEE</b> <div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px 10px;">VBA</div><br>$VBA = VA \times CE_1$ $CE_1 = 1,49$                                                                                                                                                     |                                                                                           |
| <b>VALEUR SCIENTIFIQUE APPROCHEE</b> <div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px 10px;">VSA</div><br>Cette valeur s'obtient directement d'après l'abaque n° 1                                                                                                                               |                                                                                           |
| <b>VALEUR BIOLOGIQUE POTENTIELLE</b> <div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px 10px;">VBP</div><br>Cette valeur se situe entre un maximum correspondant à la situation la plus favorable pour la carrière considérée et un minimum lorsque la perturbation humaine PH est la plus élevée. |                                                                                           |
| VALEUR BIOLOGIQUE POTENTIELLE<br>MAXIMALE                                                                                                                                                                                                                                                                       | VALEUR BIOLOGIQUE POTENTIELLE<br>MINIMALE                                                 |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <b>VBP max = VA max × CE<sub>1</sub></b> </div>                                                                                                                                                                                                            | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <b>VBP mini = VA + VSA/PH</b> </div> |
| <b>VA max</b> s'obtient en recalculant la valeur de <b>VA</b> dans l'hypothèse où les caractères modifiables atteignent leur valeur optimale (vieillessement et aménagements) soit AG = 20, PP = 6, DM = 10, EA = 10.<br><b>VBP max</b> s'obtient directement avec l'abaque 1 en y reportant <b>VA max</b>      |                                                                                           |
| <b>VALEUR ABIOTIQUE MAXIMALE</b> <div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px 10px;">VA max =</div><br>$VA = 20 + \quad + \quad + 6 + 10 + \quad + \quad + 10 +$ $AG + GP + EE + PP + DM + S + HF + EA + OR$                                                                                 |                                                                                           |
| Carrière de ..... année 19....<br><br><div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <b>VBA =</b><br/><br/> <b>VBP max =</b> </div> <div> <b>VSA =</b><br/><br/> <b>VBP min =</b> </div> </div>                                                                                             |                                                                                           |

**Tableau 17** Comparaison de bio-indicateurs

|                                     | Végétaux vasculaires                                                                                                                                                                                                                                                     | Oiseaux                                                                                                                                                                       | Insectes (coléoptères)                                                                                                                                                                                                                                           | Batrachiens et reptiles                                                                                                                                                          | Espèce emblématique (Faucon pèlerin, Hibou grand-duc, Orchidée...)                       | Valeur biologique approchée                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Caractère du bio-indicateur</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Colonisation rapide (modes de prospection variés) ;</li> <li>Formes multiples adaptées à différentes conditions physico-chimiques et large amplitude d'habitats ;</li> <li>Premiers maillons des chaînes alimentaires.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beaucoup d'espèces dans chaque milieu, à chaque stade ;</li> <li>Large amplitude d'habitats.</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Grand nombre d'espèces ;</li> <li>Grande aptitude de colonisation de tous les supports ;</li> <li>Présence souvent liée aux plantes hôtes ;</li> <li>Caractérisent des micro-habitats (même petites surfaces).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Épisodiques sur un site donné ;</li> <li>La présence de batraciens est conditionnée par l'existence d'eau au moins temporaire.</li> </ul> | Principe simple : présence ou absence de l'espèce en question sur le site.               | Calculée à partir d'une valeur abiotique (somme de descripteurs physiques du milieu), multipliée par un coefficient de conversion établi par des scientifiques pour une zone biogéographique donnée. |
| <b>Source d'information</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Conservatoires botaniques nationaux ;</li> <li>Associations botaniques, Sociétés de sciences naturelles...</li> </ul>                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Université de Bourgogne ;</li> <li>Associations ornithologiques...</li> </ul>                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Naturalistes entomologues ;</li> <li>Université de Franche-Comté ;</li> <li>OPIE, associations...</li> </ul>                                                                                                              | Ex. Autoroutes : orchidées sur les aires de repos.                                                                                                                               | Ex. Autoroutes : orchidées sur les aires de repos.                                       | Université de Franche-Comté, J.C. Robert.                                                                                                                                                            |
| <b>Méthode standardisée</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Relevés phytocécologiques méthode de Braun-Blanquet ;</li> <li>Echantillonnage par placettes (25 m²) sur transects répartis sur la surface du site.</li> </ul>                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Indices Ponctuels d'Abondance ;</li> <li>Echantillonnage par quadrats allégés...</li> </ul>                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Plusieurs types de pièges ont été mis au point : lumineux, colorés, composite ;</li> <li>Méthodes de capture +/- standardisées.</li> </ul>                                                                                | Non                                                                                                                                                                              | Temps d'observation proportionnel à la surface du site : présence ou traces de l'espèce. | Renseignement de fiches préétablies décrivant le milieu physique et l'environnement de la carrière.                                                                                                  |
| <b>Principe de la méthode</b>       | Inventaire des espèces présentes et de leur abondance, identification des groupements, évaluation de la richesse, de la rareté, de la maturité des groupements, du caractère naturel... traduisibles en notes chiffrées.                                                 | Ecoute et repérage visuel des oiseaux sur un parcours donné en temps limité.                                                                                                  | Piégeage des insectes par type de milieu sur période donnée puis identification, inventaire, évaluation de la richesse, rareté...                                                                                                                                | Observations, piégeages.                                                                                                                                                         | Exploitation du caractère intégrateur d'une espèce exigeante en qualité de milieu.       | Descripteur du site pour les écosystèmes (notamment variété des habitats).                                                                                                                           |
| <b>Bon descripteur de...</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>État du milieu (conditions physico-chimiques, biologiques) ;</li> <li>Évolution du milieu (maturation des groupements* végétaux*).</li> </ul>                                                                                     | Qualifie les milieux et leur fonctionnalité : complémentarité carrière - environnement.                                                                                       | Souligne l'originalité de micro-habitats dans un milieu donné, caractérise le fonctionnement d'un écosystème, Echelle de perception complémentaire de celle des végétaux supérieurs ou oiseaux.                                                                  | Souligne l'originalité de micro-habitats dans un milieu donné.                                                                                                                   | Analyse difficile de l'information «présence/absence d'une espèce».                      | Ne mesure pas la colonisation effective par les écosystèmes.                                                                                                                                         |
| <b>Mauvais descripteur de...</b>    | La présence des espèces dépend de l'existence ou non de sources de diaspores aux alentours de la carrière (le rayon peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres pour certaines espèces).                                                                             | La dimension du site est un facteur limitant : la surface minimale pour fréquentation par tel ou tel oiseau, même si possibilité de nidification et nourrissage.              | Assez mauvaise ; Les entomologistes restent rares, les méthodes encore peu reproductibles ; Connaissances en cours d'acquisition.                                                                                                                                | Milieux sans eau au moins temporaire.                                                                                                                                            | Très bonne.                                                                              | Très bonne ; Fiches faciles à renseigner même par des néophytes.                                                                                                                                     |
| <b>Répétitivité</b>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bonne ;</li> <li>Nombreux botanistes praticiens de ce type d'inventaires.</li> </ul>                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Assez bonne ;</li> <li>Existe un certificat des techniques de recensement d'oiseaux (Université de Bourgogne, depuis 1999).</li> </ul> | Assez mauvaise ; Les entomologistes restent rares, les méthodes encore peu reproductibles ; Connaissances en cours d'acquisition.                                                                                                                                | Assez mauvaise ; Difficulté d'inventaire.                                                                                                                                        | Très bonne.                                                                              | Très bonne ; Fiches faciles à renseigner même par des néophytes.                                                                                                                                     |
| <b>Intensité d'échantillonnage</b>  | Par site : 2 passages / an au printemps et en été.                                                                                                                                                                                                                       | Par site : 2 passages / an au printemps et en été.                                                                                                                            | Indicateur très sensible à l'intensité d'échantillonnage.                                                                                                                                                                                                        | Par site : 2 passages / an au printemps.                                                                                                                                         | Rapide, à répéter.                                                                       | 1 passage / site.                                                                                                                                                                                    |
| <b>Temps de renseignement</b>       | 1/2 h par placette.                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                  | Selon la visibilité de l'espèce recherchée.                                              | Environ 1/2 h par site + référentiel régional à établir (pour évaluer les coefficients de conversion) plusieurs observations sur plusieurs sites et plusieurs années...                              |
| <b>«Popularité» (communication)</b> | Faible sauf quelques espèces en voie de disparition réputées pour leur esthétique (orchidées), leurs vertus pharmaceutiques ou culinaires.                                                                                                                               | Quelques espèces emblématiques. Ex : Faucon pèlerin, Hibou grand-duc...                                                                                                       | Très faible.                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                  | Très bonne si l'espèce est dans le patrimoine culturel local.                            | Faible : ce n'est qu'une prévision de spécialistes ; Aspect carésien de la méthode, séduisant pour des initiés.                                                                                      |

### 3.4.3 Approche par les bio-indicateurs

Une autre méthode d'évaluation de l'intérêt écologique d'une carrière peut être fondée sur les « **bioindicateurs** », séduisants pour leur capacité à intégrer différentes caractéristiques du milieu et la simplification de l'étape observation qu'ils permettent. Un bio-indicateur peut être défini comme une espèce végétale ou animale qui, par sa présence sur un site, renseigne sur l'état de ce milieu, exprime que telle ou telle condition d'accueil est remplie (ex : présence d'eau, surface minimum, possibilité de perchoirs...).

Différents « bio-indicateurs » peuvent être envisagés. Comparés dans le Tableau 17, quelques-uns ont été retenus pour les propriétés suivantes :

- leur présence caractérise tel ou tel type de milieu ;
- ils permettent de mesurer l'évolution d'un milieu donné dans le temps ;
- ils permettent de comparer avec un état initial ou avec d'autres milieux alentour ;
- ils sont « parlants », c'est-à-dire connus et appréciés, pour un large public, objets possibles de communication, pédagogiques.

► **Les végétaux supérieurs et les insectes** se caractérisent par leur grand nombre d'espèces. Tout espace ou presque, quelle que soit la combinaison des facteurs physico-chimiques qui le caractérise, pourra être colonisé par des espèces de ces groupes. Plusieurs d'entre elles sont spécialisées et de ce fait très caractéristiques de tel ou tel état du milieu. Ces deux propriétés confèrent à ce type d'indicateur une grande aptitude descriptive. Elles permettent de mesurer des variantes et de caractériser de façon nuancée tel ou tel biotope\*.

Les botanistes belges utilisent notamment cet indicateur « végétation » pour décrire et comparer les valeurs écologiques des terrils de charbonnage (Figure 66). Ils mettent en oeuvre une cotation tenant compte de la richesse floristique et de la rareté des espèces et groupements présents (Ghio, 1978). La surcotation du stade boisement (50 sur 100) dont l'intérêt peut paraître immédiat pour les terrils (stabilisation, intégration paysagère...) ne s'applique pas en carrière car la fermeture du milieu qu'il signifie ne favorise pas la richesse écologique. Il ne paraît pas souhaitable, sauf pour comparer différents sites de carrière, d'utiliser ce type de cotation qui fournit un résultat chiffré, très difficile à interpréter dans l'absolu.

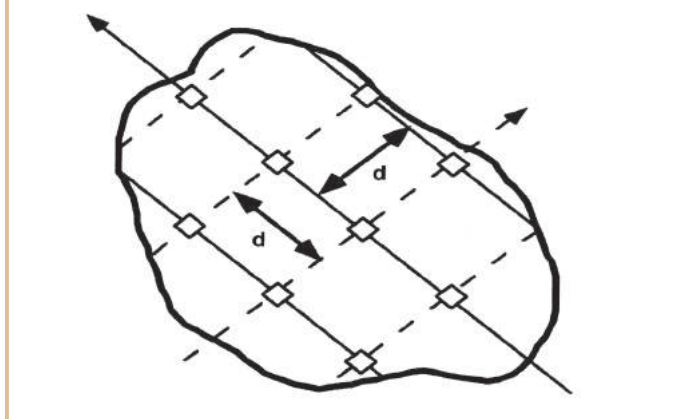
**Figure 66** Méthode d'évaluation de la valeur écologique des terrils (Ghio, 1978)

| barème de cotation 1                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (10 points) - richesse floristique : nombre d'espèces phanérogames notées de 1 (< 13 espèces) à 10 (> 120 espèces)                                                                                                                                   |
| (10 points) - rareté floristique : coefficient régional donné par les botanistes 1 (très commune) à 10 (rare)                                                                                                                                        |
| (10 points) - diversité des groupements : de 0 (sol nu) à 10 (> 10 groupements végétaux)                                                                                                                                                             |
| (10 points) - rareté des groupements : 10 (groupements de haute valeur biologique contenant plusieurs espèces rares ; ex : mare alcaline) à 5 (groupements herbeux contenant des espèces rares) à 1 (groupements communs : bois, fourrés épineux...) |
| (50 points) - maturité : degré de rapprochement du stade « climax* » : de 0 (sol nu) à 6 (pionnier sur pentes peu stables), à 25 (pelouses à épineux) à 50 (bois)                                                                                    |
| (10 points) - caractère naturel : de 0 (> 80% de la surface occupée par des végétaux exotiques ou sol nu) à 10 (< 20%)                                                                                                                               |
| Note sur 100 points.                                                                                                                                                                                                                                 |

**Figure 67**

Méthode d'échantillonnage pour des relevés botaniques  
(Brunaud, 1997a)

Représentation de l'échantillonnage systématique des relevés floristiques au sein de la zone à étudier. Les placettes sont disposées régulièrement le long des transects. La distance « d » entre chaque transect est fonction de la taille de la carrière



Les anciennes carrières de Bourgogne étudiées par Brunaud (1997a) ont fait l'objet d'inventaires botaniques systématiques selon un principe d'échantillonnage présenté ci-contre (Figure 67).

Cette méthode, adaptée aux anciennes petites carrières de l'échantillonnage retenu (27 des 30 carrières étudiées s'étendaient sur moins de 1 ha), nécessite une phase de mise en place qui trouve ses limites lorsque le site devient nettement plus grand comme dans le cas des carrières actuelles. Elle ne permet pas par ailleurs de repérer la plante rare ou localisée, ou de décrire une zone particulière non couverte par la géométrie de la trame.

- Les oiseaux qualifient moins le site de la carrière que son fonctionnement et son articulation avec les milieux environnants. Selon l'objectif retenu et les besoins de suivi scientifique, cette catégorie d'indicateurs pourra apporter d'utiles informations complémentaires sur la carrière et le milieu dans lequel elle s'insère. De plus, à la différence de la plupart des autres groupes zoologiques, les oiseaux sont bien connus et faciles à étudier dans le cadre d'inventaires de terrain.
- Les reptiles sont davantage représentés par des espèces liées aux milieux évolués et aux mosaïques (lisières, fourrés, pelouses) que par des espèces pionnières liées à un habitat uniforme. Peu cités en carrière, il paraît ainsi opportun de les étudier systématiquement lors d'inventaires floristiques et ornithologiques.
- Les batraciens, les chauves-souris, les oiseaux non ubiquistes sont occasionnels en carrière. Il paraît intéressant de les retenir comme indicateurs complémentaires lorsque la combinaison d'habitats existant dans la carrière étudiée leur est favorable : par exemple, la présence de mares temporaires (pour les batraciens), d'anfractuosités profondes (pour les chauves-souris), de fronts de taille hauts et accidentés (pour les rapaces rupestres)...

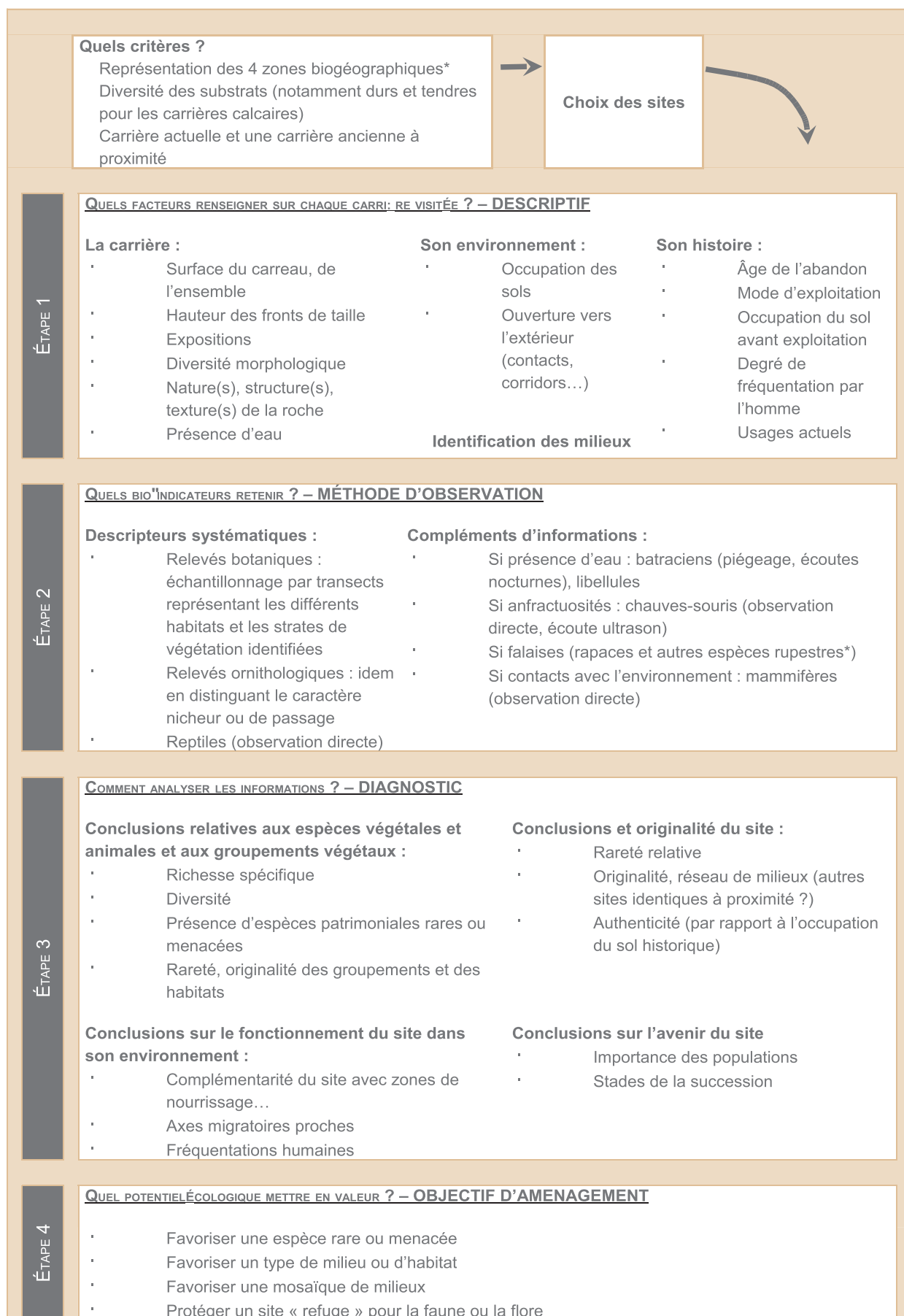
Différentes méthodes permettent de décrire l'intérêt écologique d'un milieu : les relevés floristiques ou ornithologiques s'appliquent ainsi à tout type de milieu. S'ils sont régulièrement pratiqués, ces relevés **caractérisent de façon précise et nuancée l'état du milieu et sa complémentarité avec l'environnement**. Il est proposé de les appliquer à chaque site de carrière étudié. Au cours de ces inventaires, les reptiles seront également systématiquement recherchés.

En complément, selon l'originalité de certains habitats en présence (mare, pierrier, falaise...), d'autres groupes (batraciens, chauve-souris...) seront étudiés pour affiner l'évaluation. Sur ces bases, les étapes d'un diagnostic écologique sur le terrain se décomposent comme indiqués par la Figure 68.

D'autres démarches plus intégratrices ont été mises en oeuvre sur des carrières ou milieux apparentés : calcul d'une Valeur Biologique Approchée, quantification de l'intérêt floristique d'un site, présence / absence d'une espèce bio-indicatrice. Elles présentent le **défaut d'une interprétation difficile du résultat et doivent être réservées à des comparaisons entre sites**.



**Figure 68** Les étapes d'un diagnostic écologique sur le terrain





***Partie 4 : le réaménagement  
écologique des carrières***

## PARTIE 4 : LE RÉAMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES

Les potentialités écologiques des carrières ont été explicitées dans les chapitres précédents. Il paraît aujourd'hui pertinent d'envisager, pour les sites qui s'y prêtent, un retour du site à la nature comme objectif de « réaménagement <sup>7</sup> ». Sous les termes de « réaménagement à objet écologique », de nombreux dossiers de demande d'autorisation d'ouverture de carrière présentent néanmoins depuis une dizaine d'années des opérations de « verdissement », plus apparentées à des interventions de jardinage (introduction d'espèces exotiques, fertilisation, entretien...) qu'à une expression stricte de la nature.

Il ne s'agit pas ici de faire un traité de « l'écologie de la restauration »<sup>8</sup> mais d'aborder quelques notions importantes pour la compréhension et la mise en oeuvre de programmes de restauration de sites transformés par des activités industrielles et notamment celle de l'extraction de matériaux.

### 4.1 LA RÉAFFECTATION ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES EN FRANCE

Il a fallu attendre 1994 pour qu'un colloque intitulé «Recréer la nature» soit consacré entièrement à la restauration écologique. En revanche, dans le cadre plus précis des carrières, il faut signaler que, dès 1979, l'UNPG a organisé une journée d'études sur le thème du potentiel de création et de reconquête des milieux naturels par les carrières. Ensuite l'AFIE a consacré en 1993 deux de ses journées techniques au thème de l'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Enfin, plus récemment en 2000, s'est tenu dans les locaux de l'UNESCO, à Paris, un colloque consacré à l'apport écologique des carrières pour la récréation de zones humides. Cette rencontre concrétisait l'aboutissement d'une étude initiée par le Comité national de la Charte de l'UNPG, portant sur le patrimoine écologique des zones humides issues de l'exploitation des carrières (Écosphère, 2001) et s'insérant dans le cadre plus large des programmes «Zones humides» et «Recréer la nature» lancés par le ministère de l'Environnement. Elle faisait suite à une étude moins ambitieuse mais également de grande portée, intitulée : «Évaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique», financée par la taxe parafiscale sur les granulats et qui reposait sur le diagnostic écologique de douze carrières sèches en roches massives et douze gravières réparties sur les différentes régions de France (Sauveterre, 1985). Par ailleurs, des inventaires d'anciens sites d'extraction ont été effectués en Loire-Atlantique (Chépeau) et dans les Côtes d'Armor et le Morbihan (Barnaud, 1980a, b), dans le but d'identifier quelques sites à réaffecter en priorité. On regrettera, pour ces derniers, qu'ils n'aient pas abouti à des réalisations concrètes d'opération de réaffectation.

L'ensemble de ces initiatives a donné lieu à la publication d'actes (UNPG, 1979 ; Le Duc, 1979 ; AFIE, 1993 ; Écosphère, 2001) qui complètent les nombreux guides sur «la remise en état» des carrières (Vignes, 1980 ; CEMAGREF, 1983 ; Sauveterre, 1985 ; Coppee & Noiret, 1995 ; Repérage, 1997 ; CNC-UNPG, 1998 ; Odent & Lansiait, 1999 ; Danais & Montfort, à paraître...). Malgré ce volume important de mise à disposition d'informations, il n'existe que très peu de réalisations concrètes de réaffectation de carrières de roches massives à vocation strictement écologique. Beaucoup d'aménagements de carrières se réduisent encore à la simple mise en eau des cavités d'extraction et à une dissimulation paysagère de l'empreinte visuelle du site. On se rappellera cependant de l'exemple du parc du Conservatoire botanique national de Brest, site récréatif ouvert au public, installé dans d'anciennes carrières qui, en offrant une grande diversité de milieux, ont permis la conservation de plantes aux exigences écologiques variées.

<sup>7</sup> Rappelons le sens des termes « remise en état » et « réaménagement ».

Au sens réglementaire du terme (arrêté ministériel du 22 septembre 1994, article 12-2), la **remise en état** prévoit « La mise en sécurité des fronts de taille, le nettoyage de l'ensemble des terrains et, d'une manière générale, la suppression de toutes les structures n'ayant pas d'utilité après remise en état du site, l'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation dans le paysage, compte tenu de la vocation ultérieure du site ». Ces opérations sont donc réalisées par l'exploitant de carrière avant la fin de l'exploitation.

**Le réaménagement** n'est pas défini dans les textes réglementaires. Il consiste à créer des équipements permettant de donner au site une nouvelle vocation. C'est une démarche qui dépend beaucoup de la volonté du propriétaire et qui n'est pas de la responsabilité de l'exploitant.

<sup>8</sup> L'écologie de la restauration est une discipline de l'écologie qui a pris son essor au cours des années 1980 («The Society for Ecological Restoration» qui réuni 2800 membres a été fondée en 1980). Plusieurs revues lui sont consacrées : *Restoration ecology*, *Ecological Engineering*...).

Cet état de fait résulte en partie des obligations imposées par la réglementation (régalage\* des sols, exigence d'insertion paysagère, mise en sécurité...) et des orientations essentiellement «paysagères-agricolesforestières» des guides techniques au réaménagement qui en découlent. **En l'absence de concertation des personnes compétentes, il existe en effet une forte incompatibilité entre des aménagements à vocation paysagère, visant à réduire l'impact visuel des carrières, et ceux à vocation écologique, visant à exploiter les potentialités écologiques du site.** Elle se concrétise par des choix techniques divergents, tels que la plantation d'espèces exotiques et l'utilisation abondante de terre végétale, qui s'opposent par exemple à la colonisation naturelle par la flore de substrats minéraux laissés nus. Pourtant ces deux visions ne sont pas incompatibles et peuvent parfaitement se compléter (Sauveterre, 1985 ; Coppee & Noiret, 1995 ; Danais & Montfort, à paraître).

Même si la présentation sous forme de «livres de recettes» de certains de ces documents intégrant cette complémentarité est critiquable – **chaque carrière est un cas particulier et il n'existe pas de solutions miracles pour leur «bonne» restauration** (Sauveterre, 1985 ; Frochot *et al.*, 2000) –, ils reflètent clairement une avancée significative des idées dans le domaine de la réaffectation des carrières de roches massives.

## 4.2. CONCEPTS DE RÉAFFECTATION ÉCOLOGIQUE

Afin de réparer les dommages causés aux habitats\* naturels, un certain nombre de concepts d'intervention corrective ou palliative sont apparus dans le cadre d'un domaine appelé « écologie de la restauration ». Les termes et concepts usuels de cette discipline sont utilisés selon les auteurs et les circonstances comme autant de synonymes ou de contraires. Plusieurs propositions de définitions ont été faites (Higgs, 1997, Cairns, 1998, Hobbs & Norton, 1996...), et nous reprendrons ici essentiellement la terminologie de base, applicable à de nombreuses situations, proposée par Aronson et ses collègues (Aronson *et al.* 1993a, b, Le Floc'h & Aronson, 1995) :

- Le concept général de **trajectoire** d'un écosystème\* recouvre à la fois la succession\* «naturelle» d'un écosystème\* et tous les autres itinéraires que peut suivre cet écosystème\* sous les diverses pressions qui lui sont applicables.
- Même si elle est en partie arbitraire, il est souhaitable de disposer d'une norme pour décrire la cible et donc évaluer le succès relatif d'une opération de restauration, de réhabilitation ou de gestion raisonnée. Cette norme est dénommée **écosystème de référence** (Aronson *et al.*, 1993a, 1993b, 1995). Il est évident que dans aucune situation réelle une même trajectoire d'écosystème\* ne sera suivie deux fois consécutivement. Il n'en demeure pas moins qu'un point de repère (référence) est essentiel lorsqu'on cherche à tester des hypothèses concernant l'effet de telle ou telle intervention sur un écosystème\*.
- Même dans le cas de disparition de la cause de leur dégradation, la plupart des écosystèmes\* ne peuvent revenir à un état antérieur lorsqu'ils ont franchi un **seuil d'irréversibilité**, sauf en cas d'interventions volontairement réalisées pour corriger les changements qui ont conduit à ce franchissement. Il peut, par exemple, être nécessaire de reconstituer la banque de semences ou le stock de matière organique et de micro-organismes du sol afin de faciliter l'établissement des plantes et leur croissance.

Parmi les différentes approches proposées par les auteurs (Cairns, 1998 ; Aronson *et al.*, 1993a), trois d'entre elles sont illustrées dans un modèle général (Figure 69), qui situe la restauration, la réhabilitation et la réaffectation par rapport à la dégradation, à l'exploitation des ressources ou par extensification des activités humaines dans un espace donné.

- **La restauration** est définie par analogie avec la restauration d'une toile de maître détériorée mais dont les traits et les couleurs originelles, encore suffisamment perceptibles, permettent à des professionnels de rétablir l'oeuvre d'art dans son état initial. Elle correspond donc à la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir la structure, la diversité (taxonomique) et la dynamique de l'écosystème\* considéré comme indigène et historique. En des termes plus larges, la restauration qualifie le fait de stopper la dégradation et de tenter, en priorité, de rétablir les fonctions essentielles (production, autoreproduction...) et la structure générale d'un écosystème\* préexistant.

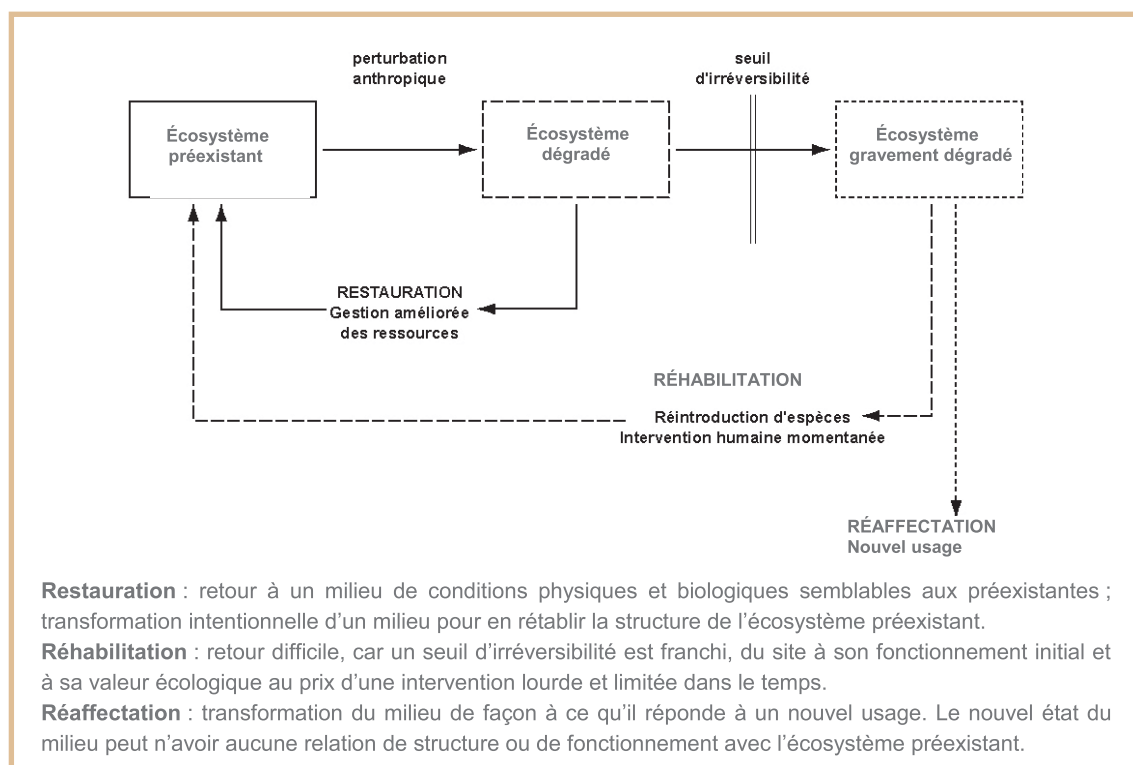


La restauration n'est applicable qu'à condition que l'écosystème\* ait conservé la capacité à «se restaurer» suite à une perturbation\*, autrement dit qu'il subsiste un certain niveau de résilience et que l'intervention de l'homme soit, si possible, limitée à une diminution puis un contrôle de son niveau de pression. Dans le cas contraire, sa capacité dynamique étant devenue nulle, l'écosystème\* se trouve être «bloqué». Seule une intervention humaine forte permet alors soit de replacer l'écosystème\* sur une trajectoire favorable au rétablissement des fonctions essentielles (réhabilitation), soit d'en faire un tout nouvel usage (réaffectation), selon un modèle différent de celui de l'écosystème\* préexistant.

- **La réhabilitation** d'un écosystème\* consiste à lui permettre de retrouver ses fonctions essentielles grâce à une intervention forte mais limitée dans le temps. Comme pour la restauration, la réhabilitation aura pour objectif de rétablir des écosystèmes\* autonomes (et durables si une exploitation quelconque est maintenue), caractérisés par l'existence d'une dynamique dans les communautés végétales et animales et par leur capacité à réparer eux-mêmes les méfaits de perturbations\* (résilience).
- **La réaffectation** décrit ce qui se passe lorsqu'un écosystème\* est transformé par l'homme et qu'un nouvel usage en est fait. Le nouvel état est éventuellement sans relation de structure ou de fonctionnement avec l'écosystème\* qui préexistait (ex : colline transformée en plan d'eau). La réaffectation concerne également la modification d'un écosystème\*, par la gestion qui en est faite, afin d'en privilégier un élément ou une fonction particulière, au prix d'interventions constantes. Ce dernier terme paraît le plus approprié au cas de l'aménagement à vocation écologique d'une carrière calcaire (Frochot & Godreau, 1995). En effet il ne paraît pas techniquement envisageable de reconstituer le site dans son état initial, sauf dans quelques cas particuliers où le site initial présente déjà des faciès essentiellement rocheux (Brunaud, 1997a, évoque alors la « réhabilitation »). En revanche, il est possible de créer un nouvel écosystème en s'appuyant sur les conditions environnementales créées par l'action d'extraction (mise à nu du substrat, constitution de pierriers...).
- **Le rajeunissement** pourrait être ajouté au modèle de la Figure 69 et constituer la quatrième technique de l'écologie de la restauration (Cairns, 1998). Cette voie permet de ramener, volontairement, un écosystème\* ayant atteint son état de maturité (ou y tendant) vers un état plus jeune marqué, par exemple, par une plus grande diversité de strates basses de végétation, une plus grande richesse floristique... Dans le cas des carrières de roches massives acide par exemple, l'élimination de bétulaies\* peut être une intervention à envisager afin de permettre le maintien de pelouses silicicoles\*.

**Figure 69**

Vocabulaire de la renaturation  
(Le Floc'h & Arondon, 1985)



- La **reconquête naturelle** consiste à ne pas intervenir sur un site et à laisser le site être reconquis par des espèces colonisatrices provenant des écosystèmes\* adjacents. On se satisfait de la trajectoire de l'écosystème\* et aucune intervention de réhabilitation, réaffectation ou rajeunissement n'est envisagée.

Il reste possible de prévoir successivement dans le temps plusieurs voies d'intervention sur les mêmes unités de terrain ou sur une mosaïque d'unités spatialement définies. On peut ainsi prévoir, sur une partie de carreau\* de carrière, de procéder à une réaffectation visant à maintenir un caractère « pionnier\* » et sur une autre partie du carreau\*, de laisser une reconquête naturelle se dérouler.

Le vocabulaire reste une question de forme ; sur le fond, il est nécessaire d'intégrer les principes suivants : un aménagement « écologique » est avant tout une façon de privilégier le vivant, dans ses structures, ses fonctions, sa pérennité, sa signification culturelle.

## 4.3. DÉFINITION DES OBJECTIFS DE RÉAMÉNAGEMENT

### 4.3.1 Principes

L'aménagement écologique a pour mission essentielle de **favoriser la « biodiversité »**, terme clé du développement durable. Celle-ci peut l'être à différentes échelles : la carrière peut multiplier les micro-habitats afin d'accueillir beaucoup d'espèces, elle peut aussi offrir un terrain de chasse ou une zone de reproduction pour une seule espèce menacée à plus grande échelle. Améliorer la biodiversité, c'est **favoriser l'installation spontanée\* de communautés** végétales et animales en utilisant au mieux le milieu physique en présence (Donadieu & Rumelhart, 1983).

Il ne s'agit pas d'ouvrir un jardin botanique ou un musée : prudence lors des interventions, plantations... Plutôt que de rechercher une biodiversité maximale, à l'échelle du site de la carrière, il est préconisé de rechercher une référence à l'histoire du secteur, comme par exemple la restauration des pelouses\* à orchidées dans le nord-ouest de la France (Alard, 2000).

### 4.3.2 Nécessité d'un diagnostic

**L'objectif recherché doit être affiché si possible dès la définition du projet** d'exploitation, et par conséquent décrit dans l'étude d'impact. Établi sur la base d'un diagnostic du potentiel écologique, selon une grille reprenant les principaux facteurs mis en évidence au chapitre précédent, il doit prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du site et son contexte environnemental.

Un programme de réaffectation peut être mis en place à différents stades d'évolution d'un site (carrière désaffectée, en cours d'exploitation ou même non encore exploitée). Quel que soit l'état du site, le diagnostic permettra d'identifier ses potentialités écologiques qui constitueront alors les arguments à la justification des objectifs de la réaffectation et des moyens pour les atteindre. Toutefois, plus cette expertise sera établie précocement et en amont de l'activité d'extraction, plus il sera possible d'exploiter au mieux les potentialités du site et d'atteindre efficacement, avec des opérations d'aménagement moins onéreuses, les objectifs désirés. En outre, cet affichage précoce permet d'organiser certaines caractéristiques de l'exploitation et de lutter contre l'idée fausse mais assez répandue qu'un « réaménagement écologique » masque un « ne rien faire, laisser la nature reprendre ses droits ».

Selon les connaissances disponibles sur l'écologie des carrières (voir chapitre consacré à l'écologie des carrières), ce diagnostic doit prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du site telles que les caractéristiques des substrats\*, de la topographie, la qualité de l'eau, etc. Il doit également prendre en compte le contexte paysager (landes\*, haies, cultures...) de la carrière afin notamment d'identifier son potentiel de colonisation par des espèces présentes dans les environs et son potentiel d'insertion dans un réseau d'habitats\* analogues.

Cette expertise fournit les bases nécessaires à la proposition de différentes options de trajectoires de réaffectation et des opérations d'aménagement et de gestion permettant leur réalisation.

Par ailleurs, dans un cadre pouvant aider à la formulation d'hypothèses concrètes et à la mise en oeuvre d'expérimentations relatives à la réaffectation de carrières, certains auteurs proposent des outils de prédiction (Prach et al., 1999) et des outils permettant de comparer entre eux les progrès et les résultats de différents programmes (Aronson et al., 1993a, b ; Aronson & Le Floc'h, 1996).

Ainsi, s'appuyant sur le principe proposé par Luken (1990), selon lequel la connaissance des processus de successions\* spontanées\* peut fournir des bases à la manipulation des successions\*, Prach *et al.* (1999) ont développé un système expert permettant de tenter des prédictions sur l'évolution des successions\* dans les milieux transformés par l'homme (mines, carrières...). Sur les bases de quatre types d'informations :

- (1) localisation géographique,
- (2) nature du milieu (carrière de roches massives, bord de route...),
- (3) disponibilité en eau,
- (4) type de substrat\* (sable, craie, rocher...).

l'utilisateur peut obtenir des données prédictives sur le déroulement des successions\*. La portée géographique de cet outil est restreinte à l'Europe centrale et il doit encore être amélioré. Cependant, c'est une approche prometteuse qui pourra à l'avenir donner des orientations utiles aux aménageurs et gestionnaires.

On pourra également utiliser comme base à l'expertise écologique (ou tout au moins s'en inspirer) les caractéristiques ou attributs vitaux d'un écosystème\* (AVE) et les attributs vitaux d'un paysage (AVP) proposés par Aronson *et al.* (1993a, b) et Aronson & Le Floc'h (1996). Il s'agit de mesurer des indices ou indicateurs reliés à la structure (richesse floristique, stock de graines dans le sol...) et au fonctionnement de l'écosystème\* (productivité de la biomasse, coefficient d'infiltration des pluies...) ainsi que des indices de la structure, de la composition, de la fragmentation du paysage et d'interactions fonctionnelles entre écosystèmes\*.

En raison de la nature des mesures, des outils d'analyses nécessaires... et aussi pertinente et prometteuse soit-elle, cette démarche reste plus du domaine de la recherche scientifique que de celui de l'aménageur. Les modalités de transfert des connaissances scientifiques en outils pouvant être mis en oeuvre par les aménageurs et gestionnaires restent à imaginer. Toutefois, intervenir à l'échelle des systèmes écologiques sera toujours quelque chose d'extrêmement complexe, nécessitant la mise en commun de nombreuses compétences scientifiques, naturalistes, technologiques...

### 4.3.3 Quels objectifs ?

**Un choix doit être fait** à la lumière des expertises du site, réalisées notamment à l'occasion de l'étude d'impact préalable à l'exploitation de la carrière (Lefeuvre *et al.*, 1979). Le choix peut se faire selon trois schémas correspondant à trois niveaux hiérarchiques : les espèces, les habitats\* et le réseau d'habitats\*. Ils sont présentés ci-dessous de façon indépendante pour des raisons de simplicité de présentation, mais ils sont dans la réalité **fortement connectés** et interagissent entre eux de nombreuses manières.

#### ► Création des milieux nécessaire à certaines espèces

Le premier niveau s'attache à fournir, à des espèces particulières, des conditions favorables à la réalisation d'une partie ou de la totalité de leur cycle de vie. Ce peut être par exemple, pour une espèce telle que le Faucon pèlerin, la création de vires pouvant constituer des espaces de nidification, des reposoirs, etc. Il ne s'agit pas de créer tous azimuts des conditions favorables à l'accueil de l'ensemble de la faune et de la flore régionales mais de cibler des aménagements pour favoriser la présence d'espèces particulières qui, par exemple, ne trouvent plus les conditions de quiétude nécessaires à leur reproduction.

On préférera à la création de sites fourre-tout sans identité fonctionnelle la recherche de systèmes écologiquement équilibrés.

Ce type d'orientation doit être raisonné en s'appuyant sur une connaissance approfondie des espèces ciblées et de leur statut régional au risque d'obtenir le résultat contraire à celui qui était espéré (installation d'un couple de faucon puis abandon de la nichée pour cause de dérangement par exemple).

Ces considérations vont à l'encontre de l'idée très répandue d'augmenter la diversité des milieux afin d'optimiser les capacités d'accueil pour la faune et la flore du site. Qu'une espèce s'installe est une chose, mais qu'elle trouve les ressources nécessaires qui lui permettront de s'y reproduire et éventuellement de participer à la constitution d'une population\* en est une autre. Les carrières sont nécessairement de taille restreinte et, si les habitats\* se complètent sur le plan fonctionnel (échanges de nutriments...), il faut qu'ils soient généralement d'une taille et d'une stabilité dans le temps suffisante pour que des populations\* s'y installent de façon viable.

## ► Les habitats

Le second niveau consiste à définir les trajectoires de réaffectation en s'inspirant d'écosystèmes\* ou, à une échelle moindre, d'habitats\* de référence observés dans d'autres zones proches. L'idée n'est pas de chercher à reproduire systématiquement des phases de successions\*, mais de tendre vers la constitution d'associations d'espèces qui ont été observées dans des conditions écologiques analogues. On sait en effet que tout écosystème\* est unique par son contexte environnemental, son histoire, etc. et que lorsqu'un milieu apparaît par régénération naturelle il est objectivement impossible de prévoir parfaitement quelles associations d'espèces vont réellement se mettre en place. Il s'agit, lorsqu'une trajectoire est choisie, que celle-ci soit réellement réalisable en accord avec les caractéristiques locales de la carrière (nature de la roche...) et avec la présence dans les environs du site de colonisateurs potentiels.

## ► Le réseau d'habitats

Enfin, le troisième niveau consiste à prendre en compte dans la définition des objectifs le fonctionnement en réseau d'habitats\* complémentaires, à une échelle régionale. Il est bien établi aujourd'hui, sous des termes tels que « métapopulation » ou « populations\* fragmentées », que les populations\* installées localement ne fonctionnent pas de façon autonome mais en réseau, grâce aux individus qu'elles échangent entre elles. Dans le cadre de programmes de réaffectation de carrières dont l'une des ambitions peut être de jouer un rôle de conservation de la nature et de participer au maintien de la biodiversité, cette échelle de perception doit nécessairement être prise en compte.

Dans un cadre tel que celui de la biologie de la conservation, les stratégies de maintien de la biodiversité doivent s'établir à une échelle régionale. Il s'agit de raisonner le choix des trajectoires des futurs écosystèmes\* et habitats\* en fonction de la distribution spatiale (surface, localisation) de ceux qui sont déjà en place à une échelle régionale. On pourra ainsi chercher à combler un vide ; par exemple, en l'absence dans un territoire de mares oligotrophes\* favorables au maintien d'espèces pionnières\* telles que les crapauds calamite (*Bufo calamita*) et accoucheur (*Alytes obstetricans*), la création de nouvelles mares en carrières pourra fournir des milieux de remplacement satisfaisants. D'un autre côté, cette approche à une échelle régionale peut éviter des erreurs telles que la création d'habitats\* exotiques pour la région, totalement isolés de leurs analogues et inadaptés à un bon développement de la faune et de la flore locales.

Quel qu'il soit, l'objectif retenu reposera sur **un minimum d'interventions** pertinentes. Pour cela, elles laisseront la plus grande part à la nature, miseront sur la cicatrisation naturelle. Car la maîtrise des mécanismes naturels de recolonisation est prétentieuse (Coumoul & Mineau, 2002). Nul écologue ne peut prédire la liste des groupements et espèces présentes dans dix ans. Aussi, **l'objectif retenu sera à formuler plutôt en termes d'« habitats visés » que de présence d'espèces particulières** (Frochot, 2003 et communication orale). L'aménagement écologique vise à donner au site une « capacité d'accueil » pour tel ou tel type d'espèces, il ne peut s'engager à la colonisation effective par ces espèces attendues.

Se fixer un objectif écologique, parfois, ne suffit pas (Sauveterre 1985). Il est nécessaire d'envisager **des intérêts écologiques parfois antagonistes mais souvent juxtaposables** : conservation d'espèces, diversification de la faune, insertion dans le paysage, accueil de migrateurs, production apicole (Thievent, 1993). Le ou les objectifs à retenir seront choisis en confrontant le site à son environnement. Complémentarité ou originalité peuvent être recherchées : autres sites équivalents dans un rayon proche, absence de tel ou tel type de milieu... Ainsi, dans les régions de grande culture, reconstituer dans d'anciennes carrières des zones humides, des pelouses\* sèches, des fruticées d'arbustes épineux ou des boisements... constituent de véritables opérations écologiques, assorties du retour d'espèces rares, voire disparues.

**Les points forts de ce type d'aménagement** de carrière résident dans le fait que :

- l'« aménagement » est généralement peu onéreux si il est prévu en amont (pas de sol à reconstituer, de plantations à entretenir, de structures à construire) ;
- une identité locale et une intégration paysagère sont souvent assurées.



Le **handicap** est le verdissement parfois très lent, qui ne répond pas à l'attente de cicatrisation paysagère rapide de la part du grand public. Une communication autour du projet peut y remédier.

L'objectif d'aménagement écologique favorise une forme de biodiversité, intra-carrière ou intersites. Son choix s'effectue à la lumière d'une **expertise écologique initiale** du site. Il peut être formulé **plutôt en termes d'« habitats » à créer que d'« espèces » à introduire**.

## 4.4. L'INTÉGRATION D'UN PROJET DE RÉAMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DANS SON ENVIRONNEMENT

Il s'agit ici d'aborder les différents points qu'il est nécessaire de garder à l'esprit lors de la mise en place d'un projet de réaménagement écologique. L'objectif est l'intégration d'un site dans son environnement, au sens large du terme : écologique, paysager mais également socio-économique.

### 4.4.1 La place des différents acteurs

Au seul carrier, chargé de la présentation du projet et de l'exploitation des matériaux, incombe la remise en état du site. L'aménagement à objet écologique, même s'il est préparé par le carrier, ne sera rendu pérenne que si l'« **après carrière** » est défini. Rappelons qu'il faut distinguer « remise en état » et « réaménagement » (cf. chapitre II.4). Ainsi, le propriétaire du site après exploitation et le gestionnaire devront s'impliquer dans la poursuite du même objectif écologique. *En effet l'aménagement du site qui consiste à **créer des équipements permettant de lui donner une nouvelle vocation** est une démarche qui dépend beaucoup de la volonté du propriétaire et n'est pas de la seule responsabilité de l'exploitant, contrairement à la remise en état à laquelle il est tenu par son arrêté d'autorisation.*

Il est parfois nécessaire de trouver des compromis. Ainsi, la définition de l'objectif pourra **intégrer d'autres usages** de la carrière (lieu de promenade, d'escalade, de pratique du VTT...). Cela peut être un moyen d'impliquer davantage les riverains ou les collectivités locales dans l'entretien et la surveillance du site ultérieurement, de favoriser une certaine **appropriation du site par les locaux** (Danais & Montfort, à paraître). Lorsque l'objectif est défini, il peut être utile pour faciliter la gestion et l'entretien ultérieur du site de prévoir de **communiquer au public**. Un discours pédagogique aidera le carrier puis le gestionnaire du site à résoudre le dilemme qui apparaît souvent entre une certaine attente sociale d'intégration paysagère, de verdissement rapide du site, et les exigences écologiques. Ainsi, Baudoit (1993) témoigne des difficultés rencontrées pour faire accepter l'aspect abandonné, caillouteux, d'une carrière de la boucle de Moisson, aménagée comme milieu d'accueil de l'OEdicnème criard. L'objectif retenu, pour qu'il soit mieux compris et respecté, peut être présenté comme issu d'une analyse multicritères : plusieurs usages possibles de la carrière, décrits sous forme de scénarios (Fernandez, 1993), ont été confrontés.

### 4.4.2 Composer avec les dynamiques naturelles

Le **temps et la souplesse** sont les paramètres essentiels pour mener à bien ce type d'aménagement. Un programme de « renaturation » ne peut être établi de façon figée. Sa planification doit pouvoir évoluer en fonction du déroulement des processus écologiques observés. En effet, dans le cadre d'une réaffectation à vocation écologique, il est très délicat voire impossible de prédire l'évolution écologique ultérieure du site (Danais & Montfort, à paraître). Il est évident qu'au moment de l'arrêté d'autorisation ni l'exploitant ni les services de l'État ne disposent d'informations prospectives suffisantes pour intégrer toute l'évolution ultérieure du site (en particulier les processus de renaturation spontanée\*) en cours d'exploitation et au fur et à mesure de l'apparition de surfaces délaissées. Seuls des hypothèses et des scénarii sont possibles, grevés d'incertitudes.

Dans ce contexte, Danais & Montfort (à paraître) proposent une interprétation assouplie du dispositif législatif plutôt qu'une application rigide et linéaire des textes. Ces auteurs suggèrent ainsi d'éviter des niveaux de détail excessifs dans les préconisations, voire même d'introduire volontairement non seulement divers scénarii, mais des « zones blanches », au sein desquelles le devenir du site sera affiché ultérieurement en prenant en compte son évolution (renaturation spontanée\*, revendications de voisinage, disponibilité de matériaux, modification dans le rythme et le développement de l'exploitation).

Par ailleurs, la réalisation de **phase d'aménagement à court terme** peut être nécessaire pour motiver les parties prenantes au projet : la colonisation spontanée\* de tel pierrier retravaillé à l'issue de l'exploitation est une satisfaction qui motivera le travail de gestion à accomplir pour voir s'exprimer d'autres potentialités.

Avec le choix de l'objectif, il est possible de prévoir la valorisation de l'intérêt scientifique (écologique + géologique) d'un tel site : aménagements pédagogiques (panneaux d'information, postes d'observation), maîtrise de la fréquentation... Selon l'objectif retenu, l'aménagement écologique pourra être entrepris dès les premières phases d'exploitation et se **mettre en place au fur et à mesure de l'avancée de la carrière**.

#### 4.4.3 La nécessité d'un suivi scientifique

Le suivi scientifique s'effectue à la demande de l'ensemble des acteurs impliqués dans l'aménagement écologique du site, mais n'incombe pas au carrier.

Il est nécessaire parce qu'il s'agit de vérifier que l'objectif fixé est atteint (par exemple : création d'un habitat, installation de l'espèce attendue) et de comparer la valeur écologique du site à un moment donné par rapport à un état initial ou à un état précédent.

Cependant, comme évoqué précédemment, les systèmes écologiques sont par nature dynamiques et changeants. Par conséquent, il est illusoire de vouloir prédire avec certitude l'évolution précise d'un écosystème\*. Les objectifs, même établis sur la base d'expertises écologiques approfondies, conservent une part d'incertitude, ce qui fait d'eux non pas un but à atteindre obligatoirement, mais seulement une orientation à suivre. L'observation d'une dérive de l'évolution de la composition spécifique ou des attributs structurels et fonctionnels du site par rapport à ce qui était envisagé peut alors constituer une alternative satisfaisante qui entraîne un réajustement des objectifs de la réaffectation, ou bien nécessiter la mise en oeuvre d'opérations de gestion dans le but de réorienter la trajectoire du système afin qu'elle se rapproche des objectifs de départ.

Ce type de considération implique donc, une fois le processus de réaffectation enclenché, qu'une pression d'observation soit maintenue afin d'examiner l'évolution des habitats\* et des biocénoses. Cette action d'observation nécessite la mise en place périodique de protocoles de mesure (chimiques, abondances d'espèces...) et donc d'un suivi du site. Les informations recueillies pourront alors être transcrites sous la forme d'un diagnostic de l'impact de la réaffectation (réussite ou échec) et de l'évolution des habitats\* et des biocénoses, et éventuellement justifier un réajustement des objectifs et du programme.

#### 4.4.4 Organisation administrative, économique et foncière

La durée d'évolution des processus écologiques (plusieurs années voire plusieurs dizaines d'année) implique de maintenir l'intervention périodique d'un observatoire scientifique, d'une équipe technique et d'un comité décisionnel. La création d'une telle structure partenariale, qui sort des obligations réglementaires de l'exploitant et du propriétaire (démarche volontaire), doit être mise en place dès l'ébauche du projet dans un cadre ouvert à la concertation de l'ensemble des acteurs locaux (administrations, collectivités territoriales, associations...).

En outre, la mise en oeuvre de cette démarche peut s'effectuer dans le cadre de la mise en place des comités locaux de suivi<sup>9</sup> réunissant propriétaires, élus, associations de riverains, administrations intéressées... Dans le cadre de ces comités, de nouvelles orientations concernant la remise en état du site peuvent être proposées à l'administration de tutelle.

Il faut en effet bien concevoir qu'un projet de réaffectation à orientation écologique ne peut se construire de façon isolée. Il doit d'abord **intégrer des préoccupations qui sont parfois éloignées des considérations purement écologiques ou scientifiques telles que des aspects historiques, culturels, sociaux, économiques ou politiques...** (Higgs, 1997 ; Aronson *et al.*, 1995). En fournissant des garanties de financement à long terme et une stabilité des grandes orientations du projet (indépendantes de la durée des mandats électoraux, des baux...), ce type d'organisation est le seul garant de la réussite de tout programme.

<sup>9</sup> La mise en place de comités locaux de suivi n'est pas imposée par la législation. Elle constitue une démarche volontaire d'une entreprise ou d'un exploitant notamment pour les adhérents à la Charte des producteurs de granulats.

De façon concrète, de telles modalités d'intervention sur le long terme peuvent se concevoir dans le cas d'un **site acquis par le gestionnaire** :

- par une **collectivité locale** (conseil général -dans le cadre de la taxe départementale des espaces naturels sensibles par exemple-, commune -avec gestion et suivi assurés par exemple par une association pilotée par un conseil scientifique- parc naturel régional...);
- ou/et une **association** naturaliste, un **conservatoire** des sites ;
- ou sous la responsabilité d'une administration chargée de faire respecter un classement ou une réglementation de protection (Organisation et Environnement, 1993a et 1993b) ;

#### 4.4.5 La gestion du site

La gestion du site intervient bien sûr pour permettre d'atteindre l'objectif fixé et, dès les premières phases d'exploitation de la carrière, les liaisons du site avec l'extérieur devront être définies, le contrôle de la fréquentation ultérieure prévu, l'information du public également, voire même une protection de type réglementaire. Attention toutefois à la **lourdeur** et parfois l'inefficacité, voire l'inutilité de certaines de ces mesures ; il est souvent préférable de viser une appropriation du site par les riverains ou divers utilisateurs. Comme il est évoqué précédemment, le suivi des populations\*, le contrôle de leur évolution et la régénération des biotopes\* constituent les orientations principales de la gestion du site. Cette conception préside à la gestion ultérieure des sites, il peut s'agir de :

- préserver une espèce ou un groupement pionnier\* : les stades initiaux de la succession\* écologique devront être entretenus en les rajeunissant régulièrement. Cette voie permet de ramener, volontairement, un écosystème\* ayant atteint son état de maturité (ou y tendant) vers un état plus jeune marqué. Cet état n'est pas forcément plus riche ou plus divers, mais il abrite souvent des espèces absentes ailleurs ; il est donc plus **original** et, même avec une faible diversité, il peut augmenter la diversité globale à l'échelle du paysage environnant.. À ce titre, différentes interventions peuvent être entreprises : grattage ou décapage de sol en formation, nettoyage des mares en cours de comblement, arrachage d'espèces invasives (Cuénot, communication orale), pâturage, fauche...; l'élimination de bétulaies\* peut par exemple être une intervention à envisager afin de permettre le maintien de pelouses silicoles\* ;
- *a contrario*, les stades forestiers peuvent être espérés pour leur degré de stabilité élevée et le réservoir d'espèces qu'ils constituent. Ces écosystèmes tendent souvent à se banaliser (ex : envahissement par les pins) (Sauveterre, 1985). L'entretien du site consistera à limiter cette invasion.

Ainsi, dans le dessin de conserver les milieux fragiles comme par exemple garder un milieu « jeune », si l'objectif retenu le commande, il peut être nécessaire de :

- rajeunir les éboulis ;
- reprendre occasionnellement l'exploitation des fronts de taille ;
- décapier le carreau ;
- d'instaurer un pâturage ou un fauchage régulier. Leur intensité sera maîtrisée et raisonnée pour augmenter la richesse floristique. Ainsi, l'animal domestique, en pâturant, gère la formation végétale\* en place : selon l'intensité du broutage, la saison ou le système d'exploitation (fréquence de retour, charge d'animaux), il modifie de façon plus ou moins irréversible la composition du tapis végétal (Decocq, 1994).

Au contraire pour favoriser la colonisation du site, des interventions humaines peuvent faciliter la réalisation des processus nécessaires. Bradshaw (2000) identifie dans le tableau suivant (Tableau 18) un certain nombre de problèmes et propose des solutions.

**Tableau 18**

Les éléments principaux des successions primaires sur terrain dégradé et les différentes façons de les assister

| (Bradshaw, 2000)                                                                        |                                           |                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Processus                                                                               | Problème                                  | Solution                                                                                                                             |
| 1. Immigration des espèces végétales appropriées                                        | Pas suffisamment d'espèces adaptées       | Semis ou plantation, favoriser les oiseaux (ornithochorie)                                                                           |
| 2. Implantation des espèces appropriées                                                 | Altération des roches limitée             | Dégrossir et pailler les surfaces                                                                                                    |
| 3. Stabilisation et accumulation de matériel minéral fin                                | Érosion des particules fines              | Apport de particules fines, épandage de boues, paillage                                                                              |
| 4. Accumulation de nutriments                                                           | Manque de nutriments                      | Aider les plantes tolérantes par apport de fumure                                                                                    |
| 5. Accumulation d'azote                                                                 | Manque d'azote                            | Aider les espèces fixatrices d'azote par épandage de boues                                                                           |
| 6. Immigration de la flore et de la faune du sol                                        | Immigration de certaines espèces ralentie | Introduction de mycorhizes, vers de terre et autres invertébrés                                                                      |
| 7. Modification des propriétés du sol sous l'action des végétaux, des organismes du sol | Évolution ralentie                        | Aider les plantes vigoureuses qui favorisent l'activité racinaire et les substrats organiques                                        |
| 8. Réduction de toxicité                                                                | Excès d'acidité<br>Excès de métaux        | Introduire des espèces tolérantes, apport de chaux<br>Introduire des espèces tolérantes, apport de phosphore et de matière organique |
| 9. Amélioration de la texture et de la structure du sol                                 | Excès de compaction                       | Décompactage, sous-solage                                                                                                            |
|                                                                                         | Manque de structure du sol                | Répéter les points 1 à 8 à toutes les étendues                                                                                       |
| 10. Lessivage                                                                           | Excès de salinité, acidité, métaux        | Casser la surface du sol, drainer                                                                                                    |

Plusieurs partis pris dans ce tableau ne paraissent pas pertinents dans le cadre d'un réaménagement écologique. Les interventions ne doivent être envisagées qu'après avoir dressé un diagnostic des potentialités écologiques du site. Ce potentiel peut être limité, inutile alors de recourir à des interventions lourdes et coûteuses (apport de sol, épandage de boues, mycorhization...) pour bâtir un site artificiel, dont la pérennité n'est pas assurée. La « pauvreté » ou le handicap relatif d'un site, dans un objectif de production sylvicole ou agricole, peut être intéressant d'un point de vue plus écologique (intérêt patrimonial des espèces de milieux pauvres et rupestres\*).

Dans la plupart des cas, il sera nécessaire de :

- limiter la fréquentation du site par la mise en place d'obstacles physiques (clôtures, haies d'épineux...) ;
- interdire l'épandage de fertilisants en bordure, par concertation avec les riverains ou classement du site ;
- assurer la protection légale de ce milieu fragile, tout en informant le public des raisons de la limitation d'usages de cet espace. La diversité des mesures envisageables permet non seulement de s'adapter à de nombreuses situations, mais aussi de saisir des opportunités ou de répondre à des besoins locaux (Lévy-Bruhl & Coquillart, 1998). Certaines mesures favorisent des protections d'espaces limités comme les parcs nationaux, les réserves naturelles (réserve naturelle volontaire (Peresson & Grangé, 2000) réserve biologique gérée par l'ONF (Thomas, 1992)...), les arrêtés de biotope... D'autres correspondent plus à la mise en œuvre d'une politique foncière (actions des conservatoires, politique des espaces naturels sensibles des départements...) ; d'autres encore explicitent plutôt le contenu des prescriptions de protection découlant de la loi (loi montagne, loi littoral...). Enfin, les ZNIEFF<sup>10</sup> et les ZICO<sup>11</sup> ne sont pas de véritables mesures de protection mais des «porter à connaissance», alors que les zones «spéciales» (ZPS, ZSC)<sup>12</sup> définies par les Directives européennes «Oiseaux» et «Habitats» et devant aboutir à la construction du réseau NATURA 2000 peuvent se traduire dans certaines situations par des clauses réglementaires et contractuelles.

<sup>10</sup> Les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) délimitent des secteurs du territoire national identifiés pour l'intérêt de leur faune, de leur flore ou des associations qu'ils portent.

<sup>11</sup> Les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) délimitent des sites d'intérêt majeur qui hébergent des effectifs d'oiseaux sauvages jugés d'importance communautaire ou européenne.

<sup>12</sup> La Directive «Oiseaux» et la Directive «Habitats» sont des instruments communautaires qui définissent un cadre commun pour le maintien de la diversité biologique par la conservation des habitats naturels, ainsi que la faune et la flore sauvages. Elles prévoient la mise sur pied d'un réseau de zones de protection spéciale (ZPS) et de zones spéciales de conservation (ZSC), appelé NATURA 2000.



Peuvent être évoquées à titre d'exemple les carrières de Villepail (Figure 70) ou du massif de l'Estaque près de Marseille pour la présence de plantes rares. Lecointe (1993) montre également comment l'arrêté de biotope pris très tôt pendant l'exploitation des matériaux, pour préserver le potentiel écologique de la carrière, n'a pas empêché l'activité d'extraction, tout en préparant la réaffectation naturelle. Duval (1993) évoque l'acquisition d'anciennes carrières par le Conservatoire des sites Lorrains, leur mise en réserve naturelle volontaire ou la définition de périmètre ZNIEFF sur tout ou partie de carrières. Autre exemple : la carrière La Parisienne dans le Parc naturel régional des Caps et Marais d'Opale (Blancher & Paquet, 1999) est intégrée à un vaste projet de « Plan de paysage d'un bassin carrier » à vocation pédagogique, pour ses espèces remarquables de plantes et d'oiseaux nicheurs.

**Figure 70** Rossolis à feuilles rondes  
(Photo ENCEM)



G. Pallat

L'ancienne carrière à flanc de relief de Villepail (Mayenne) est inscrite en arrêté de biotope depuis 1986. Située en amont du village de Villepail, une tourbière\* s'est mise en place sur le carreau\* de cette carrière. La présence remarquable de quatre plantes protégées : le Rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*), le Lycopode des tourbières\* (*Lycopodiella inundata*), le Narthécie des marais (*Narthecium ossifragum*), la Grassette du Portugal (*Pinguicula lusitanica*) et de nombreuses espèces typiques de tourbières\* ont justifié cette mesure de protection.

Dans tous les cas rappelons qu'il est recommandé de :

- réaliser un suivi scientifique ;
- entretenir de façon à répondre aux résultats du suivi, analysés en fonction de l'objectif ;
- d'informer le public de ces résultats et d'en donner une interprétation en termes de pratiques de gestion.

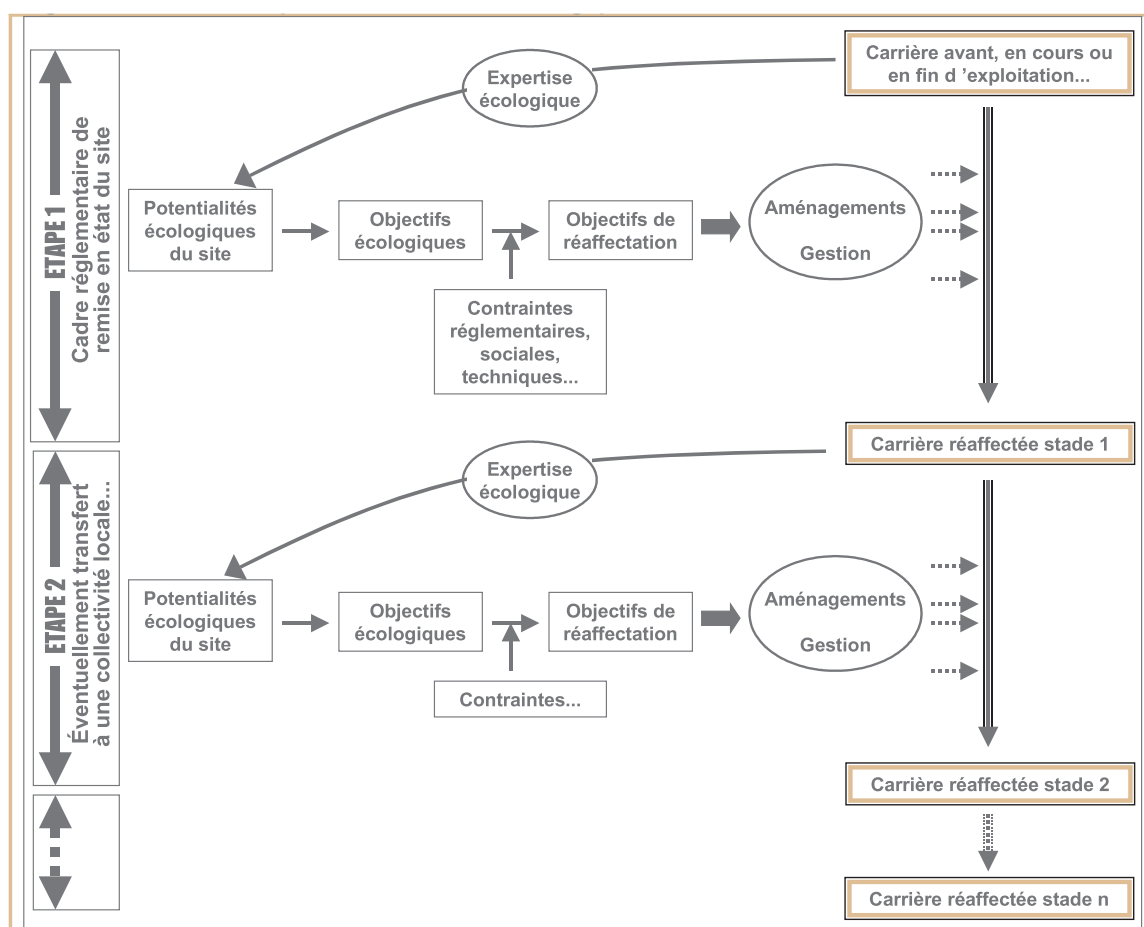
#### 4.4.6 Un modèle pour la réaffectation écologique des carrières

Sur la base des observations qui précèdent, ENCEM (2001) propose un modèle de conduite d'un programme de réaffectation « idéal » (Figure 71).

Ce modèle reprend successivement les différents éléments abordés dans les paragraphes précédents : l'expertise écologique, la définition des objectifs écologiques puis de réaffectation une fois intégrés dans le contexte local et réglementaire, et enfin les opérations d'aménagement et de gestion. Il met l'accent sur la nécessité de souplesse permettant la remise en cause des objectifs de réaffectation selon l'évolution des processus naturels (successions\* écologiques, perturbations\*...). Il s'appuie également sur une procédure à long terme adaptée à l'échelle de temps des processus écologiques. Il faut noter que le pas de temps de réalisation des différentes étapes du programme n'est volontairement pas indiqué ; il doit d'une part être défini au cas par cas et d'autre part pouvoir être modifié tout au long du programme (par exemple : annuel à son lancement, quinquennal par la suite...).

Enfin on pourra rajouter à ce modèle une étape non indispensable, mais essentielle pour la maturation de l'écologie de la réaffectation, à savoir le **transfert des acquis**. Chaque étape pourra donner lieu à un bilan du programme qui sera mis à disposition de l'ensemble des acteurs environnementaux. Il est en effet nécessaire de dépasser les simples intuitions et les seules expériences individuelles, en intégrant les connaissances et la logique scientifiques garantes d'une analyse correcte de la situation et d'une innovation dans les réponses apportées. (Bradshaw, 1993).

**Figure 71** Un modèle pour la réaffectation écologique



## 4.5 LES PRINCIPES D'INTERVENTIONS

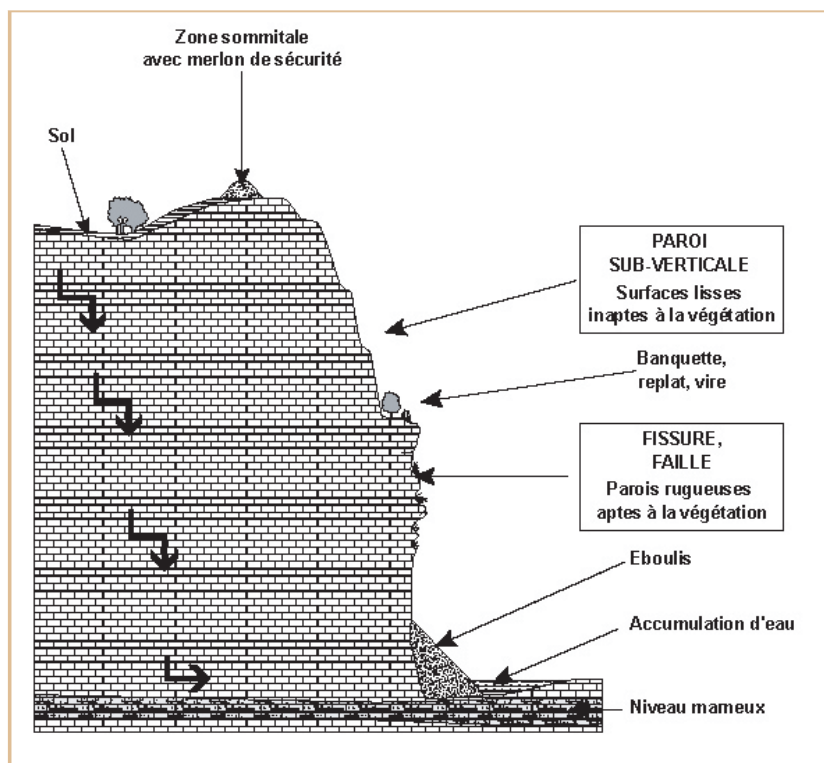
Il n'existe **pas de recettes miracles** qu'il suffirait d'appliquer pour réhabiliter un site d'exploitation de carrière, mais pour chaque situation, pour chaque objectif retenu, des orientations peuvent être données. Les recommandations figurant ci-après ne sont pas des « recettes », car les exemples de renaturation réussie ne sont pas des modèles totalement reproductibles, néanmoins elles s'inspirent de l'analyse de ces expériences et des connaissances acquises en écologie de la restauration afin de donner des pistes favorisant la biodiversité. Les représentations schématiques (source partielle : Danais & Montfort, à paraître) par type de milieu permettent de souligner des principes issus directement des notions d'écologie présentées précédemment.

### 4.5.1 Le traitement des fronts de taille

Pour des raisons de sécurité, le front de taille est souvent remodelé de façon à réduire la hauteur des aplombs à moins de 15 m, séparés par de larges banquettes en marches d'escalier (Figure 72). Les pentes entre banquettes peuvent être variées. Des verticales conservées constituent des habitats de type falaises.

Le « remodelage » du front de taille (écrêtement, reprise des pentes) est souvent présenté comme principe de base du réaménagement écologique (Brunet, 1983). Les grands rapaces nécessitent pourtant des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres...

**Figure 72** Exemple de traitement des fronts de taille



#### 4.5.2 Le traitement des carreaux

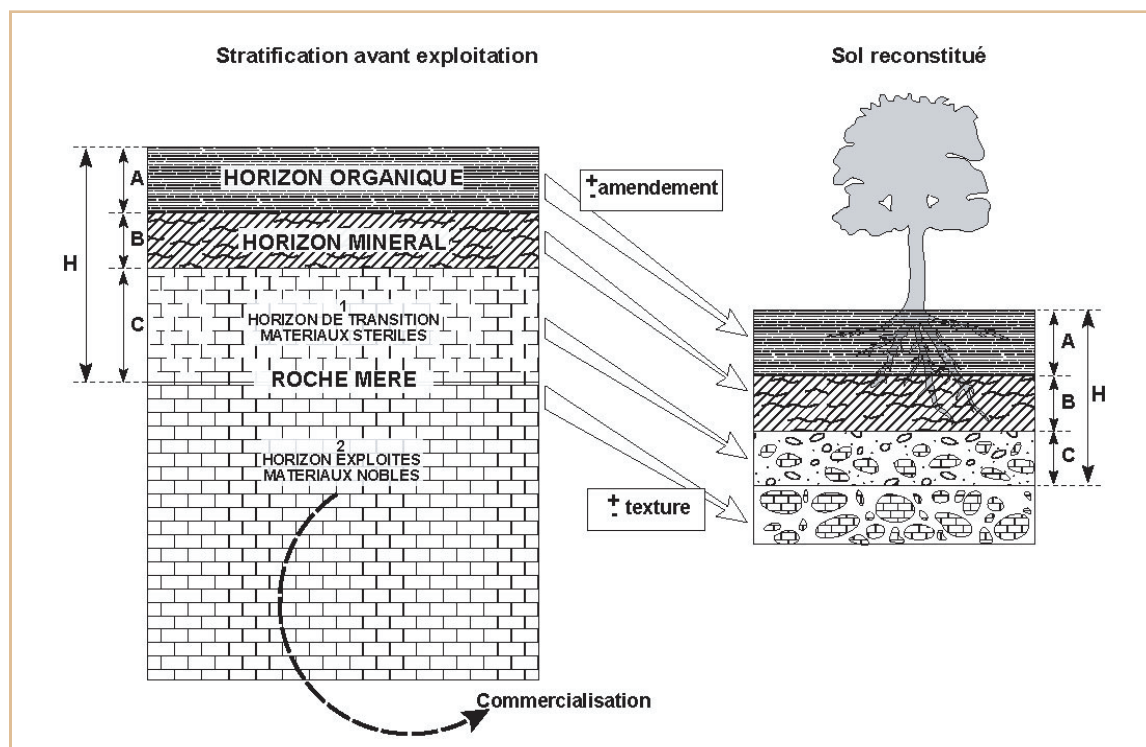
Plusieurs auteurs (Sauveterre, 1985 ; Thievent, 1993...) préconisent, dans le cadre de l'aménagement écologique d'un site de carrière, la réutilisation des terres de découverte du gisement exploité pour rétablir un « sol » meuble sur la surface du site (Figure 73), après exploitation, pour en favoriser la recolonisation. Ils suggèrent également de multiplier les types de pentes, d'expositions, de granulométrie, d'épaisseur de sol... pour augmenter la biodiversité générale (Chambaud, 1993 ; Sionneau, 1993).

Pourtant, comme évoqué dans l'analyse des facteurs, la reconstitution d'un sol peut se traduire à terme par une banalisation du site : les ligneux s'installent plus rapidement, les espèces rudérales\* se multiplient sur merlons et dépôts de terre, des espèces exogènes peuvent même envahir le site (Cuénot, communication orale). Certes, le reverdissement du site est réussi mais la richesse spécifique n'est pas obtenue, l'objectif écologique n'est pas atteint. C'est ce constat que fait Maubert (Maubert, à paraître) dans les anciennes carrières du Loir-et-Cher. **L'originalité et la richesse floristiques sont relevées dans les sites dépourvus de tout apport de terre, là où les conditions écologiques sont les plus contraignantes et les plus sélectives** (sols superficiels, squelettique, sec...).

La multiplication des types d'habitats réduit, sur un site donné, la surface accordée à chacun. Or le facteur superficie du milieu est limitant pour un grand nombre d'espèces.

**Figure 73**

Reconstitution d'un sol pour un objectif productif (sylvicole)  
(D'après Bouffort, 1996 ; CEMAGREF, 1984)



La découverte de la roche exploitée permet de différencier la **terre végétale** (à décaper et stocker avec précaution pour une réutilisation éventuelle en sol fertile) et les matériaux stériles. Le régalage des terrains peut être effectué soit pour reconstituer un sol par enfouissement des stériles et mise en place de terre arable, soit pour créer un milieu pauvre original en conservant en surface la couche de stériles. Mais, attention, **la banque de graines** contenue dans le sol ne correspond pas forcément au dernier peuplement végétal connu. Ainsi Allion (1993) montre comment, pour des pelouses\* à Orchidées de la région Centre détruites par des carrières, la mise en germination expérimentale des sols n'a produit qu'adventices des cultures (Coquelicot, Moutarde des champs, Séneçon commun, des chénopodes, des amarantes...) et très peu de plantes caractéristiques de la pelouse (quelques graminées, plus rarement d'autres plantes). Cette surprise s'explique probablement par le fait que des graines, fertiles et au fort pouvoir de germination, étaient enfouies depuis une période plus ou moins lointaine durant laquelle ces terrains pauvres devaient être cultivés.

**Le recours à des plantations, des semis** peut pourtant être nécessaire pour :

- améliorer la capacité d'accueil du site pour la faune : nourriture fournie par des arbustes fructifères comme le groseillier, le merisier, le troène, le sorbier, le cornouiller, l'aubépine, l'alisier... (Thievent, 1993 ; Le Roux, 2002) ;
- prolonger la trame végétale d'un paysage ;
- constituer des abris (buissons d'épineux) et écrans protecteurs (haies brise-vent, ombrage) ;
- accélérer la reconstitution du sol, par recours aux espèces fixatrices d'azote, par exemple (Dinger, 1997 ; Malaval 1997) ;
- limiter l'érosion, en fixant des talus par les réseaux racinaires.



Ces plantes peuvent être introduites sous forme de graines ou de jeunes plants selon trois origines (Bouffort, 1996) : terre végétale du site contenant graines et rhizomes, graines récoltées puis semées, boutures ou jeunes plants mis en culture en dehors du site et réimplantés.

Les références en langue anglaise (Jochimsen, 2001 ; Bell, 2001 ; Strong, 2000 ; Prach & Pysek, 2001) témoignent de cette pratique. Cette dernière présente un plus grand intérêt biologique que l'installation d'une monoculture (pauvreté spécifique), à condition que le choix des espèces et leur développement soient maîtrisés par un entretien adapté (Arnal & Lamade, 1987). Le pâturage extensif peut offrir une bonne solution en la matière (Decocq, 1994).

Le coup de pouce donné à la reconquête naturelle par des plantations ne doit recourir qu'à **des espèces à la fois régionales et compatibles** avec le stade d'évolution dans lequel se trouve le milieu lors de l'intervention (Arnal & Lamade, 1987).

Des expériences de plantations ont été mises en oeuvre pour créer des merlons végétalisés (Brun, 1987) ou habiller un front de taille de plantes grimpantes et retombantes (Guichardon, 1988). La plantation est accompagnée d'amendement du sol, d'apport d'engrais organique, voire même d'irrigation. Cette intervention est coûteuse, notamment en entretien et suivi de jeunes plants, et est rarement favorable à l'expression d'une biodiversité naturelle.

Cette expérience, menée sur la carrière de Marchaux (25) (Brun & Guichardon, 1991), montre que les plantations suivies de façon horticole (amendement, désherbage, protection...) permettent un verdissement rapide des banquettes. Mais des échantillons de référence, non amendés, voire même non plantés, se distinguent par leur richesse floristique après quelques années des premiers échantillons « soignés ». Leur végétalisation est plus lente, mais leur composition floristique beaucoup plus intéressante relativement à la valeur écologique. Les banquettes plantées se trouvent même parfois bloquées dans leur évolution par un envahissement de ronces...

Les semis sur bernes routières ou autoroutières de mélanges de graines de ray-grass et trèfles, classiquement utilisés en aménagement routier, ne se maintiennent pas dans le temps : au bout d'une dizaine d'années, ces talus présentent une composition végétale équivalente à ceux non semés initialement et colonisés spontanément (Dasnias, 1996 ; Coumoul & Mineau, 2002). Ils pourront être pratiqués dans le but de :

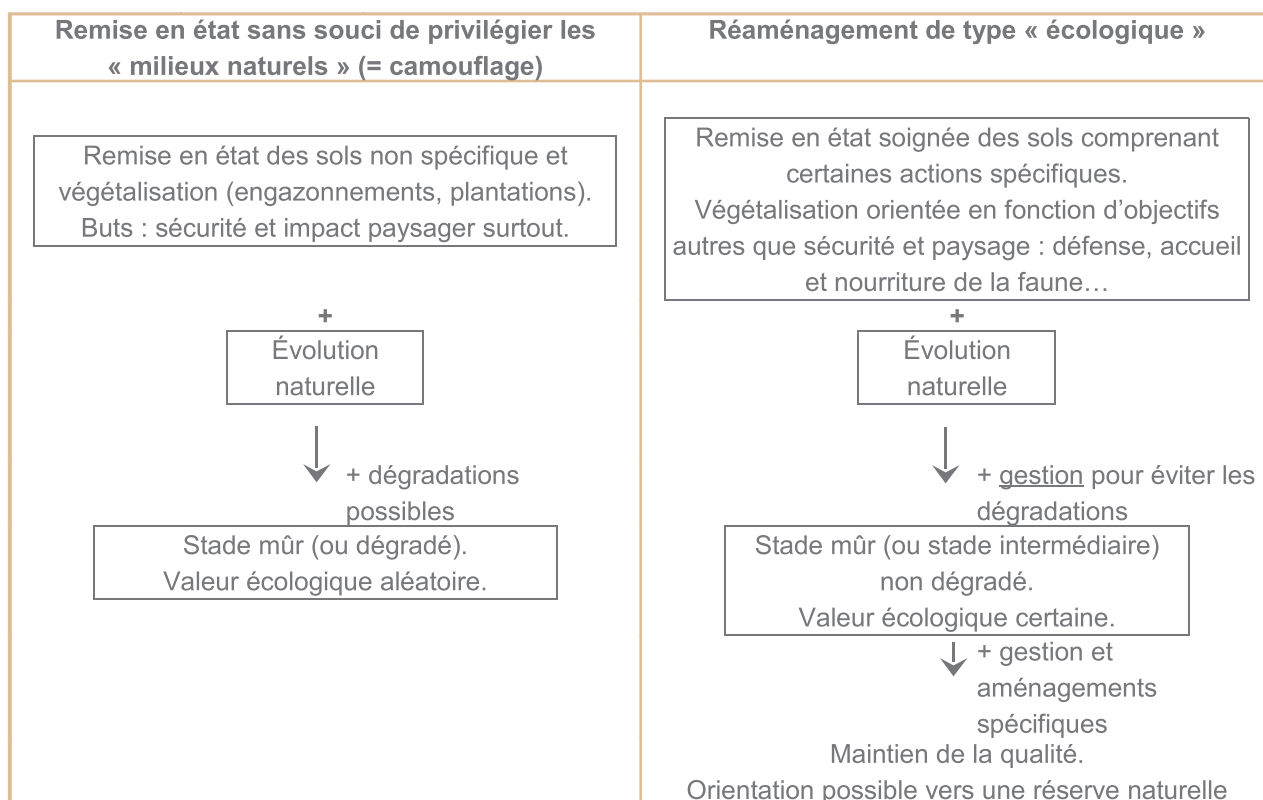
- limiter l'érosion de pentes fortes ou très exposées aux vents et précipitations ;
- imiter le risque d'installation d'espèces invasives (en créant rapidement un tapis herbacé freinant le développement de ces espèces) sur des sols généralement profonds.

Le **semis de mélanges « adaptés »**, même lorsqu'il s'agit d'espèces indigènes, ne doit pas être encouragé (Amicale européenne de floristique, 2003), car les conséquences à long terme de ces introductions sont mal connues. Il peut conduire à l'extension incontrôlée de génotypes exotiques au détriment d'éléments moins compétitifs de la flore spontanée\* (pollution génétique des populations\* de plantes natives) et perturbe le travail des phytogéographes. « Laisser la nature reprendre ses droits » reste le mot d'ordre des plus récents rapports écologiques.

En conclusion, le schéma proposé par Arnal et al. (1985) oppose, en termes d'intérêt écologique, l'opération de verdissement accéléré et l'aménagement écologique, plus respectueux du rythme naturel de colonisation (Figure 74). Les interventions visant à accélérer le processus de colonisation naturelle devront s'entourer de précautions et être particulièrement suivies. Elles seront l'application d'une « **ingénierie écologique** » (Lecomte *et al.*, 1995). Cette science en développement a encore beaucoup à apprendre et de leçons à tirer d'expériences encore peu nombreuses. L'ingénieur écologue, qui exploite la capacité de la nature à se restaurer elle-même, s'oppose à l'agronome ou au forestier, notamment par le moindre coût d'investissement et de maintenance de ses interventions.

**Figure 74**

Comparaison d'un aménagement « camouflage » et d'un aménagement écologique (Arnal *et al.*, 1985)



L'implantation d'espèces mycorhizées ou pourvues de nodules capables **de fixer l'azote contenu dans l'air pour enrichir le sol** entre dans ces techniques de « forçage ». Elles accélèrent le processus de formation d'un sol fertile.

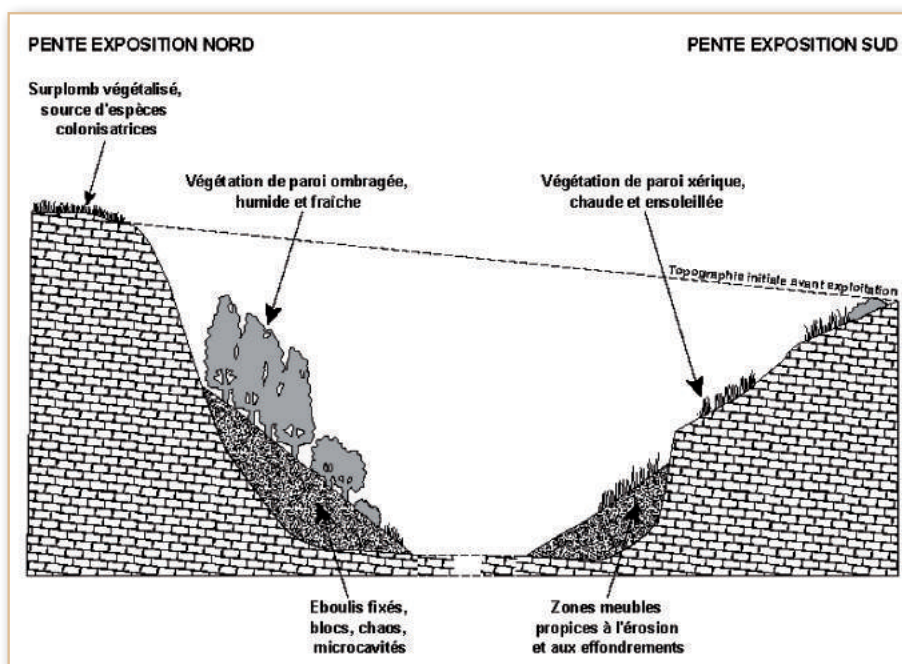
Une symbiose fixatrice d'azote, entre les bactéries de la famille des Rhizobiacées et certaines légumineuses (genêts, trèfles, luzernes...), est connue et exploitée depuis longtemps (Malaval, 1997). D'autres espèces actinorhiziennes (plantes fixatrices d'azote par leur association avec des bactéries du groupe des Actinomycètes) sont capables de s'associer à des bactéries symbiotiques. Le docteur A. Moiroud de l'université de Lyon I a expérimenté ce type d'espèce dans le cadre d'expérience de revégétalisation de carrières. Des essais ainsi menés sur Marchaux (25), Gourdon (26), Jablines (77), Millery (69), Chambéry (73) ont permis de dresser une liste des espèces capables de se développer sur substrat brut de carrière, sans apport de terre végétale :

- légumineuses : Robinier faux-acacia, Baguenaudier, Genêt d'Espagne, Cytise faux-ébénier ;
- actinorhiziennes : Aulne blanc, Aulne de Corse, Argousier, Corroyère, Olivier de Bohème.

On notera que certaines de ces plantes ne sont pas locales (Robinier faux-acacia, Olivier de Bohème) ou possèdent une aire géographique limitée (Aulne de Corse, arbre endémique de Corse ; Corroyère, Genêt d'Espagne..., arbustes du sud de la France uniquement). Leur emploi dans un but écologique ne peut donc se justifier. Comme pour l'apport de sol sur substrat nu, **ces interventions gommant le caractère rupestre\* de la carrière et font « vieillir » le site** : les étapes de colonisation progressive par des espèces pionnières sont très raccourcies, voire supprimées.

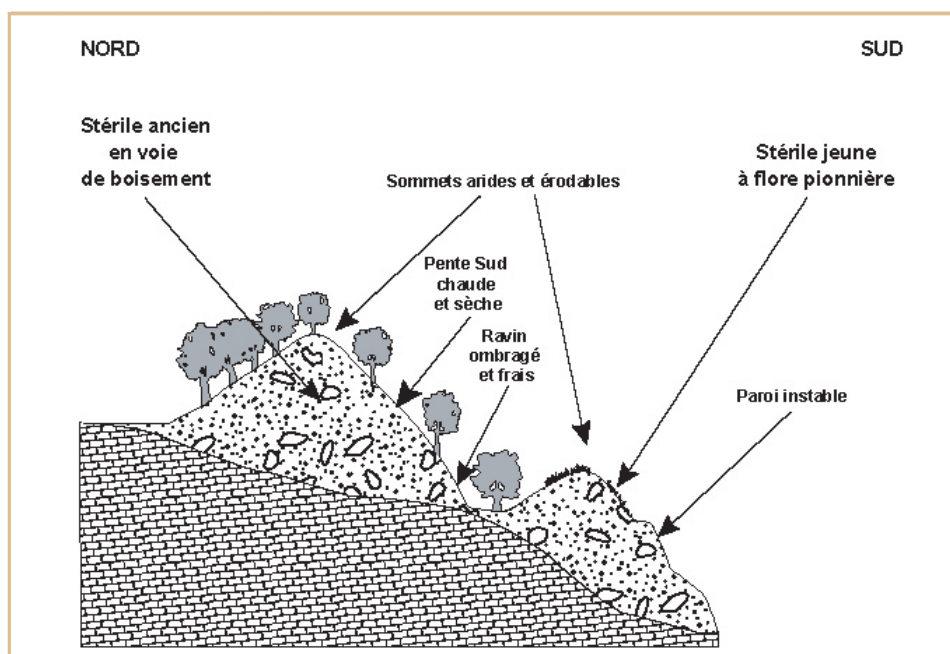
### 4.5.3 Le traitement des talus et merlons

**Figure 75** Exemple de traitement des pentes selon leur exposition



Une orientation au sud est à privilégier dans les régions peu arides. Ce microclimat chaud et sec facilitera l'implantation spontanée\* d'espèces thermophiles\* peu communes dans ces régions (Figure 75 et Figure 76). En zone méditerranéenne néanmoins, l'orientation sud accentue à tel point l'aridité que la colonisation naturelle est retardée. Une orientation est y est préférable selon les travaux de Thinin.

**Figure 76** Exemple de valorisation des terrils, merlons et éboulis



#### 4.5.4 Le traitement des puits

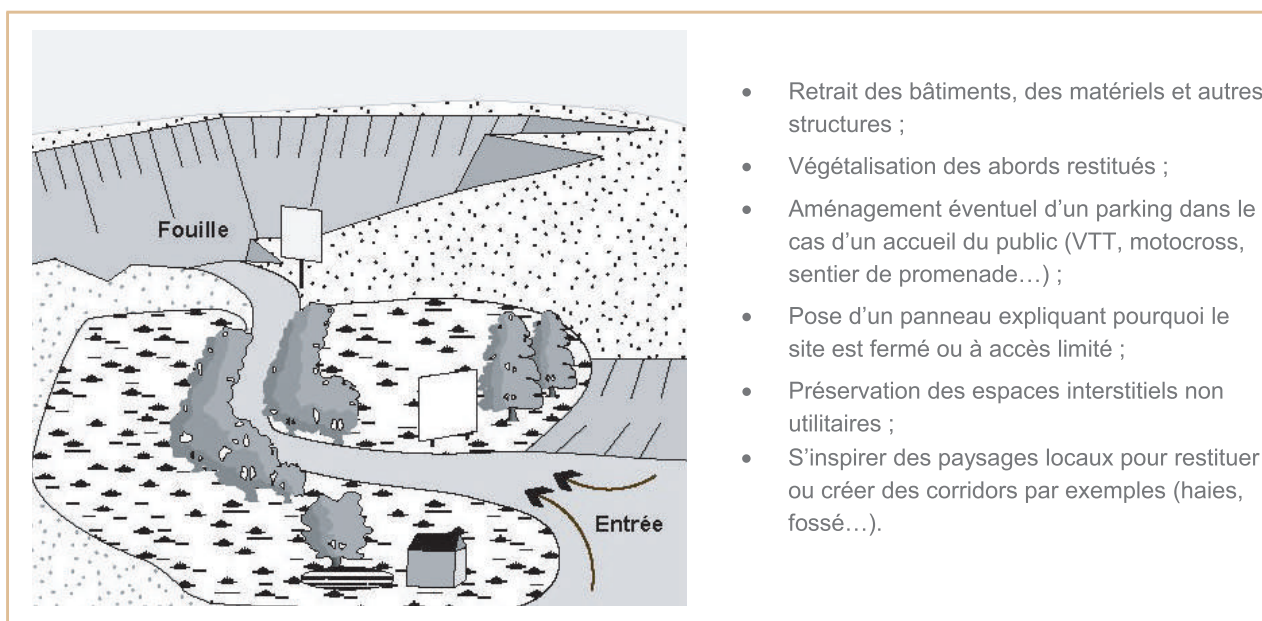
La mise en sécurité des abords de ces cavités propres aux carrières souterraines respectera la capacité d'accueil de ces milieux pour les espèces cavernicoles telles que les chauves-souris, mammifères protégés et menacés : pas d'engrillagement ou mise en place de barreaux sélectifs, maintien des aspérités des parois, obstacles à la fréquentation du public...

#### 4.5.5 L'accès au site

Compte tenu des aspects réglementaires, mais également des risques de conflit au cours de l'activité, l'entrée du site ne trouvera sa fonctionnalité qu'au terme de l'exploitation. Faisant la liaison entre l'environnement de la carrière et le site « écologique », elle jouera son rôle de transition si elle préserve des corridors verts (haies, fossés, plantations, accotements enherbés...), prolongeant des éléments paysagers existants aux alentours de la carrière (Figure 77).

Il peut être nécessaire de prévoir des obstacles à l'accès au site pour en limiter la fréquentation et la dégradation. Ceux-ci pourront être physiques (fossé, haie, blocs, barrière...) ou réglementaires (protection du site). Dans la plupart des cas, une information à l'attention du public sous forme de panneau doit être mise en place.

**Figure 77** Exemple d'aménagement d'une entrée de site



### 4.6. EXEMPLE DE LA CHALANDRUE

L'analyse critique de la bibliographie souligne le peu d'études relatant des expériences d'aménagement écologique réfléchies en amont, suivies dans le temps et objets de bilans. L'exemple de la carrière de La Chalandrue sur l'autoroute A31 au nord de Dijon constitue l'un de ces rares cas.

La carrière de la Chalandrue, en massif calcaire jurassique (Oxfordien), fut exploitée pour la construction de l'autoroute A31 entre Dijon et Nancy. Elle se situe en Côte-d'Or sur la commune de Til-Châtel. Sa surface de 15 ha est coupée en deux par l'axe nord-sud de l'autoroute. Elle présente trois unités morphologiques : carreau, falaises et plate-forme périphérique. À la fin de l'exploitation, en 1990, le site présentait une mosaïque de biotopes\* et un microclimat attirant déjà la faune, qui ont inspiré un projet de valorisation du potentiel écologique (Figure 78).



Une étude spécifique et un programme de travaux d'aménagement ont été demandés à un bureau d'étude spécialisé. L'intervention avait pour but de favoriser le processus de dynamique naturelle en maintenant une forte diversité écologique. Ses objectifs se déclinaient en (Thievent, 1993) :

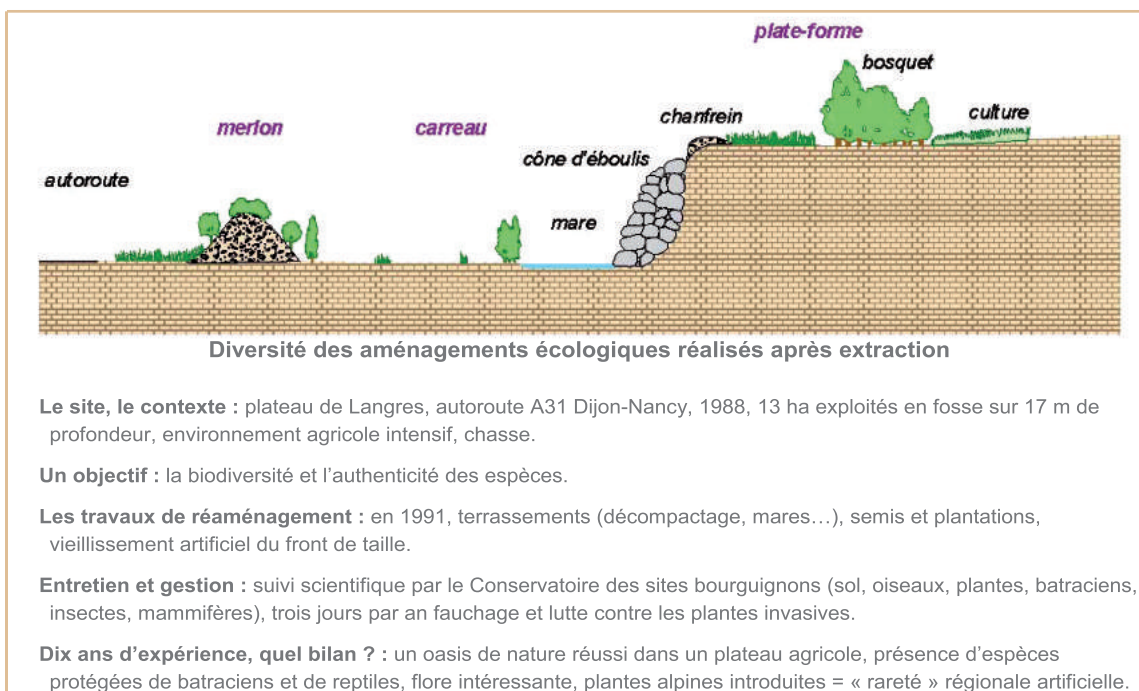
- préserver des zones de substrat compacté par l'activité d'exploitation, devant garder un aspect nu et minéral pour des espèces pionnières ;
- décompacter d'autres zones afin de favoriser l'enracinement ;
- former quelques reliefs avec des stériles afin de casser la planéité du carreau ;
- exploiter les bas fonds humides pour créer (surcreuser) des mares ;
- créer des pierriers et préserver des éboulis bruts de gros blocs favorables aux reptiles.

Les travaux d'aménagement ont été orientés par la physionomie du site (substrats superficiels secs et chauds, merlons artificiels, milieux humides). Ils ont consisté en :

- un nettoyage général du site, enlèvement des déchets de chantier ;
- un terrassement autour de la mare existante et constitution de merlons ;
- une décompaction du carreau par griffage ;
- des plantations avec des espèces arbustives locales ;
- des semis herbacés par projection hydraulique ;
- un vieillissement accéléré du front de taille ;
- un engrillagement périphérique.

**Figure 78**

Un réaménagement exemplaire ? La Chalandrue, autoroute A31 (Côte-d'Or)  
(Thievent, 1993 ; Cuénot, communication orale)



Dès les premières années, le suivi scientifique de la carrière, confié au Conservatoire des sites naturels bourguignons, soulignait une recolonisation rapide et une grande richesse spécifique, avec notamment la présence d'espèces rares : amphibiens protégés (Pélodyte ponctué) et Arabette des Alpes (introduite mais bien adaptée au site). Le bilan dressé par le gestionnaire, après dix ans, fait ressortir l'intérêt écologique réel de cet îlot de nature dans un contexte à forte emprise agricole. Un regret est toutefois émis sur la présence d'espèces invasives, Baldingère et Robinier faux-acacia, qui nécessitent un entretien annuel de plusieurs journées. Par ailleurs, l'authenticité (caractère naturel, local) des espèces installées souffre de la présence de l'Arabette des Alpes, introduite lors du réaménagement du site au titre d'espèce patrimoniale de milieu rupestre\* (Cuénot, communication orale).

## 4.7 L'ÉVALUATION DES COÛTS

Sur le plan financier, une démarche de réaménagement d'un site à vocation écologique peut sembler se positionner au rang des orientations à faible valeur économique (Harris *et al.*, 1996), mais il ne faut pourtant pas accepter trop précipitamment cette idée d'investissement à perte lorsque l'on s'engage dans un véritable plan de restauration écologique. Une étude comparée du coût de certains aménagements mis en oeuvre (parfois spectaculaires mais sans véritable intérêt écologique) et du coût d'un plan de restauration raisonné sur le long terme et impliquant l'ensemble des acteurs environnementaux (plus efficace et mieux intégré dans le tissu socio-économique local) permettrait certainement de relativiser cette idée et de placer sur d'autres plans la valeur des carrières : meilleure perception par la société, intérêts pédagogique et scientifique...

Les coûts du réaménagement écologique restent difficiles à évaluer et ne sont pas isolés des travaux de remise en état de la carrière. Dans certains cas, des aménagements ont été pratiqués après abandon de celle-ci. Ainsi sur l'exemple de la carrière de la Chalandrue cité précédemment, deux ans après la fin de l'exploitation des matériaux, des remblaiements, la scarification du carreau, le creusement de mares ont été réalisés au titre de cet objectif écologique pour un montant d'environ 250 000 €. La plupart de ces opérations auraient pu être intégrées aux modes d'exploitation, sans constituer un surcoût significatif. Ainsi comme évoqué, la réflexion et l'organisation relatives au projet de valorisation écologique permettront, si elles sont effectuées très en amont, de réaliser d'importantes économies.

On notera que Sthal (2000, in Frochot *et al.*, 2000) conclut d'une évaluation financière *a posteriori* des réaménagements écologiques de carrières en eau, que ceux-ci représentent un coût faible à négligeable à deux conditions :

1. qu'ils **tiennent compte raisonnablement des potentialités du site**, c'est-à-dire aussi bien des contraintes naturelles (hydrologie\*, paysage environnant...) que des modalités et contraintes de l'extraction ;
2. qu'ils soient **prévus très en amont** dans la vie de la carrière, de manière à ce que les travaux se déroulent au fur et à mesure des phases de succession\* de l'extraction.

Ces auteurs observent d'ailleurs des réaménagements qui, réduisant l'originalité des écosystèmes\* et le nombre d'espèces rares, abaissent la biodiversité (au moins à une certaine échelle) : les apports de terre végétale, l'introduction d'espèces exotiques... peuvent, dans certains contextes, constituer des coûts non seulement superflus mais parfois aux effets écologiques négatifs.

Les coûts seront également plus faibles si l'objectif de réaménagement n'est pas trop rigide, inspiré d'un « laisser faire la nature », accompagné de mesures de gestion adaptées.

Bouffort (1996) et Brun (1987) dressent une estimation des travaux de plantations sur la base d'une grille de prix de type horticole : coûts unitaires des travaux de préparation du sol, de mise en place puis d'entretien des jeunes plants. Mais les interventions décrites s'inspirent plus d'une approche de type jardinage que d'une approche à des fins de réaménagement écologique.

Le coût de la valorisation écologique tient plutôt à l'effort de gestion et de suivi à poursuivre dans le temps qu'aux travaux d'aménagement immédiats en fin d'exploitation. Pour la gestion ultérieure du site, l'entretien du site de la Chalandrue nécessite quatre jours d'ouvrier par an (50-80 €/jour) + une journée ingénieur par an pour validation (150- 300 €/jour).

Des coûts de suivis scientifiques peuvent s'avérer nécessaires pour valider les options retenues. Ils s'expriment alors en journée d'études (observations scientifiques et analyses) et peuvent être approchés à environ 500 €/jour (Cuénot, communication orale). Selon l'intensité de suivi, l'effort financier peut être conséquent.

Le coût d'un aménagement écologique est difficile à évaluer ; la plupart des interventions peuvent s'intégrer aux travaux d'exploitation (orientation des pentes, inclinaisons, réalisation de pierriers...).

Des frais de terrassements et plantations, de type aménagement paysager, peuvent s'ajouter. Enfin, l'entretien du site et le suivi scientifique se chiffrent en journées d'intervention, très variables d'un site à l'autre.



## Conclusion





## IV - CONCLUSION

Ces cinquante dernières années, nos paysages ont connu une artificialisation croissante sous l'impulsion du développement économique. De nombreux milieux jugés peu productifs ont été valorisés sur le plan agricole ou forestier. C'est ainsi qu'en Champagne 100 000 ha de pelouses\* calcicoles\* ont été mis en cultures ou plantés au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Plus récemment, les données de l'IFEN (Institut français de l'environnement) montrent qu'entre 1993 et 2002 ce sont près de 550 000 ha qui ont été artificialisés en France. Au bilan, ce sont les milieux naturels qui pâtissent de cette évolution.

Dans cette conjoncture, l'activité d'extraction est souvent perçue comme une atteinte supplémentaire des milieux naturels. Elle peut pourtant se révéler d'un grand intérêt pour la sauvegarde de nombreuses espèces, dont certaines menacées. Après exploitation des matériaux, les carrières présentent un biotope\* singulier par rapport à leur environnement et libéré de toute pression humaine tant qu'elles ne sont pas réaffectées à un autre usage. La rupture qu'elles induisent dans le paysage et les conditions écologiques généralement plus contraignantes qui y règnent permettent l'expression de processus écologiques originaux. Les stades pionniers\*, devenus peu courants en milieu naturel, en sont un exemple caractéristique. Le bilan de l'étude bibliographique a ainsi montré le caractère insolite et remarquable de certains sites, constituant des stations parfois uniques pour des plantes ou des animaux rares ou menacés. Cette originalité tient notamment à la pauvreté en nutriments des carrières au sein de terres agricoles fortement amendées. Dès que ces milieux vieillissent, leurs sols s'enrichissent et leur écologie évolue en général vers celle de milieux plus banals.

S'il n'est pas envisageable, dans la majorité des cas, de restituer après exploitation une occupation des sols similaire à celle d'origine, il est possible en revanche de retrouver un nouvel équilibre sur un plan qualitatif : un espace dégradé qui à l'origine faisait partie d'un écosystème\* « banal » pourrait, au prix d'interventions judicieusement choisies et grâce à un diagnostic mis en oeuvre en amont, pendant et au terme de l'exploitation du site, devenir potentiellement de grand intérêt (écologique, scientifique, pédagogique...). Ce choix de réaffectation écologique consiste d'ailleurs bien souvent en un principe d'intervention minimum mais accompagné.

Le potentiel écologique des carrières apparaît donc comme particulièrement précieux dans la conjoncture actuelle de perte générale de biodiversité. Nombre de naturalistes s'y intéressent, mettant en avant la richesse spécifique qu'elles recèlent, au moins au cours des premières années du processus de colonisation.

Dans ce contexte, à l'image des propos d'Aronson et Le Floc'h (1996) au sujet du Conservatoire des jardins et des paysages, on pourrait imaginer la création d'un observatoire et d'un conservatoire des carrières qui suivraient l'excellent exemple du Conservatoire du littoral. Ces structures ne chercheraient pas seulement à promouvoir ou à protéger et conserver les sites de valeur patrimoniale, mais pourraient également, en liaison avec les professionnels, les administrations de tutelle, les associations, promouvoir des expérimentations qui permettraient de développer des outils d'évaluation et d'autres techniques pratiques pour réaffecter et réintégrer les sites d'extraction de matériaux.

À l'image des études entreprises par l'UNPG\* pour les carrières alluviales, le programme de recherche sur les carrières de roches massives s'inscrit dans un cadre d'amélioration des connaissances du fonctionnement écologique des carrières. Ainsi, la bibliographie analysée a permis de conseiller et mettre en garde vis-à-vis de certaines pratiques d'aménagement écologique. Mais, en raison du faible retour d'expériences, ni mode d'emploi ni cahier de recettes ne peuvent être définis. Dans tous les cas la nécessité de s'adapter au(x) potentiel(s) écologique(s) de chaque site doit primer. Malheureusement, l'influence des facteurs agissant sur la diversité et le potentiel écologiques, les interactions entre ces facteurs et leur importance intrinsèque sont rarement analysées, voire méconnues.

Bien que ce document de synthèse d'avis scientifiques multiples et généralement convergents révèle des lacunes dans la connaissance des potentiels des carrières, il permettra peut-être de stimuler la curiosité de tous en la matière et d'engager de nombreuses et nouvelles expériences de « renaturation », afin de faire progresser le génie écologique. La « réaffectation écologique » comme nouvel « usage » du site de carrière est encore peu reconnue par les aménageurs du territoire et les décideurs. Cela se traduit par un nombre très limité d'expériences mises en oeuvre, organisées et suivies dans ce sens.

Pour définir plus précisément ce(s) potentiel(s) écologique(s), la phase bibliographique du programme lancé par la profession a été suivie d'une phase d'observation de terrain. Celle-ci a abouti à une troisième et dernière phase, la rédaction d'un rapport de synthèse et d'un guide technique pour la réaffectation des carrières à destination de la profession et des partenaires.



# Annexes



- > *Annexe I : la démarche bibliographique*
- > *Annexe II : liste bibliographique*
- > *Annexe III : glossaire*

Le présent document constitue une synthèse des deux ouvrages « *Carrières de roche éruptive - Potentialités écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions* » (ENCCEM, 2001) et « *Les potentialités écologiques des carrières calcaires – Étude bibliographique* » (ENCCEM, 2004). Ce chapitre récapitule les démarches suivies par les auteurs pour l'élaboration de leur ouvrage respectif.

### 5.1 SOURCES EXPLORÉES ET OBTENTIONS DES DONNÉES

#### 5.1.1 Étude « Carrière de roches éruptives »

Le travail de recherche documentaire et de données d'inventaires pour ce travail a duré sept mois (février à septembre 2001). C'est un délai relativement court, mais satisfaisant pour obtenir l'ensemble des sources au plan régional, national et international<sup>13</sup>. En revanche l'auteur estime qu'il ne permet pas d'approfondir pleinement des sources documentaires connexes au sujet et pouvant apporter de précieux enseignements (recherche dans le domaine des mines...).

Ce travail de recherche documentaire et de données d'inventaires a comporté différentes voies largement imbriquées les unes aux autres (récapitulé dans le Tableau 19).

#### ► Les courriers, les emails...

Environ 350 courriers ont été adressés :

- à un certain nombre de scientifiques français et étrangers susceptibles d'être intéressés au sujet de l'écologie des carrières ; quelques réponses sous forme d'envoi de rapports et de tirés à part ou de conseils en terme d'orientation de la recherche bibliographique ont été obtenues et, suite à des relances téléphoniques, quelques rencontres avec des universitaires rennais ont pu se réaliser ;
- aux syndicats professionnels allemands, britanniques et suisses ; aucune réponse ;
- aux services gouvernementaux auxquels se rattache l'industrie extractive de différents pays d'Europe et des autres continents (Australie, Canada...) ; les quelques réponses reçues étaient négatives ;
- à toutes les DIREN (directions régionales de l'environnement), DRIRE (direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement), DDE (direction départementale de l'équipement), DDAF (direction départementale de l'agriculture et de la forêt), Préfectures, Conseils Généraux et Régionaux des quatre régions et des treize départements concernés par le Massif armoricain ; la plupart des administrations ont répondu positivement en soulignant l'intérêt qu'elles portaient à cette étude, des rencontres avec les responsables des services concernés ont permis de préciser leurs attentes ;
- à toutes les associations «environnementalistes» géographiquement implantées dans le Massif armoricain : parcs naturels régionaux, conservatoires régionaux des espaces naturels... (185 courriers) ; cette voie de recherche fut la plus décevante car contrairement aux attentes de l'auteur, elle n'a pas permis d'obtenir de données d'inventaires (à trois exceptions près). En revanche elle a permis de mettre en place un réseau de partenaires potentiels pour des approches de terrain.

<sup>13</sup> Dans le cadre du programme «Carrières et zones humides», la recherche documentaire s'est déroulée sur une période de quinze mois, qualifiée par les auteurs de «délai un peu court» pour obtenir des sources satisfaisantes au plan international (Écosphère, 2001).



### ► La recherche sur serveurs télématiques

Une recherche par mots-clés a été mise en oeuvre sur différents serveurs télématiques : le serveur du CNRS (INIST) consultable via l'internet, les serveurs disponibles à l'Université de Rennes 1 (Pascal, Current Contents). La librairie en ligne du Natural History Book Service (NHBS) a également été consultée de la même façon que les services télématiques, ce qui a permis de lister les récents ouvrages du monde entier portant sur l'écologie de la restauration.

Le serveur Myriade-Thèse, qui recense toutes les thèses françaises, nous a permis de dresser une liste des doctorats réalisés sur le thème des carrières.

### ► La recherche sur l'internet

La recherche de documents sur l'internet n'a pas été très fructueuse. Elle a permis d'obtenir quelques articles de revues scientifiques en ligne, mais n'a pas permis d'obtenir de références fondamentales. Finalement, l'internet (à l'époque de cette recherche) a été coûteux en temps et n'a donné qu'un résultat médiocre.

### ► Le travail avec la bibliothèque universitaire de Nantes

Après qu'une première liste de références a été établie, les documents qui ne pouvaient être obtenus directement auprès des auteurs ou à l'aide de l'internet ont été consultés via le service du prêt interuniversitaire de la bibliothèque de Nantes. Les photocopies des articles ont été achetées, alors que les thèses et ouvrages ont été prêtés par d'autres universités ou par la bibliothèque du Muséum national d'histoire naturelle à Paris et par la British Library.

### ► Les services de documentation

Des ouvrages français et non référencés par les bases télématiques et les articles scientifiques ont également pu être accessibles grâce aux services de documentation des DIREN.

## 5.1.2 Étude des potentialités écologiques des carrières de roches calcaires

La collecte bibliographique a eu lieu d'avril à novembre 2003, soit huit mois, délai qui a paru suffisant aux auteurs compte tenu de la richesse des études précédentes. La recherche bibliographique s'est déroulée en deux temps :

- le premier a consisté en l'exploitation des bibliographies déjà constituées à l'occasion des étapes de travail précédentes en matière de carrière (alluvionnaires, Kovacs et al., 2001 ; Massif armoricain, ENCEM, 2001), de réhabilitation écologique (Dasnias, 2002), d'aménagement agricole (Vanpeene-Bruhier, 2002a) et d'aménagement forestier (Vanpeene-Bruhier, 2003).
- le second a eu pour objectif une mise à jour de ces sources et un élargissement des recherches ciblées sur le thème étudié.

Ce travail complémentaire de recherche documentaire a été mené auprès de diverses instances administratives, universitaires, associatives... (Tableau 19) :

1. syndicats professionnels : profitant de l'expérience infructueuse de nos prédécesseurs pour leur étude bibliographique, cette démarche n'a pas été renouvelée ;
2. DIREN (direction régionale de l'environnement) : elles ont été contactées par téléphone et certaines d'entre elles ont fait l'objet de rendez-vous. Les bases de données communales en ligne sur le patrimoine naturel ont été consultées. Elles ont permis de faire une recherche par mots clés « carrière » et « calcaire » afin d'y déceler des informations relatives à d'éventuels carrières inscrites en ZNIEFF ou faisant l'objet d'une mesure de classement. Une centaine de fiches ont retenu l'attention. Mais les informations relatives à chaque site sont très inégales et la notion « d'intérêt écologique » très subjective, attachée à chaque auteur de description selon sa sensibilité (ornithologique, botanique, mammalogique...). Des contacts approfondis sur les régions déficitaires en information (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes en particulier) ont été entrepris sans résultat notable pour l'obtention de nouvelles données ;

3. internet : des recherches sous mots clés (carrière, environnement, réhabilitation) ont été réalisées sur le serveur Myriade-Thèse, qui recense les thèses nationales, et le service de documentation universitaire en ligne SUDOC. La librairie en ligne du **Natural History Book Service** et le site anglais de la **Society for Ecological Restoration Science** ont également été consultés. Au bilan peu de données récentes ont été collectées ;
4. universités : quelques contacts auprès d'universités (Caen, Toulouse, Montpellier, Aix-Marseille, Lille) ont donné peu de résultats ;
5. scientifiques français : un certain nombre de scientifiques dans des disciplines variées (botanistes, bryologues et mycologues, malacologues, ornithologues) ont été contactés par courrier, mail ou téléphone. Si la plupart des contacts sont restés infructueux, cette démarche a permis de recueillir malgré tout quelques données bibliographiques complémentaires auprès par exemple de conservatoires botaniques nationaux ;
6. gestionnaires du territoire : tous les parcs naturels régionaux ainsi que quelques conservatoires des sites ont été approchés. Sauf cas particulier comme le Conservatoire des sites naturels bourguignons, très peu de données sur le thème des carrières sont en général compilées au niveau de ces structures ;
7. associations naturalistes, naturalistes indépendants : compte tenu de l'échec de cette démarche lors de l'étude sur le Massif armoricain, le parti retenu a été de contacter au cas par cas, par relations interposées, des naturalistes susceptibles de détenir des informations afin d'accéder à des données plus diffuses (opinions, repérage de sites à étudier, expériences en cours). Des informations précieuses de terrain, diffusées parfois dans les bulletins de ces associations, ont été ainsi collectées. La plupart sont cependant des données inédites et non publiées, communiquées oralement ;
8. organismes de recherche et écoles : BRGM, CEMAGREF, CNRS, École des Mines, ENGREF, ENSH ont été approchés. Les résultats ont surtout été obtenus avec le CEMAGREF avec ses travaux sur la restauration des terrains en montagne et l'aménagement agricole et forestier des carrières ;
9. les aménageurs autres que carriers : pour élargir le champ des recherches, des contacts ont été pris auprès d'aménageurs du territoire tels que la DDE, la SAPRR (Société des autoroutes Paris Rhin Rhône) et la SNCF, afin de bénéficier de leur expérience en matière d'aménagement et de gestion de carrières et de milieux apparentés comme les talus de remblais et de déblais.



Pour cette étude, les références ont été utilisées de la façon suivante : entièrement lues, elles ont fait l'objet de fiches de synthèse, inscrites dans un tableau récapitulatif, et exploitées pour les nouvelles pistes de recherche qu'elles ouvrent (bibliographie, organismes intervenants, interlocuteurs...). Ces fiches de lecture sont conservées à la documentation de l'UNICEM\* Paris.

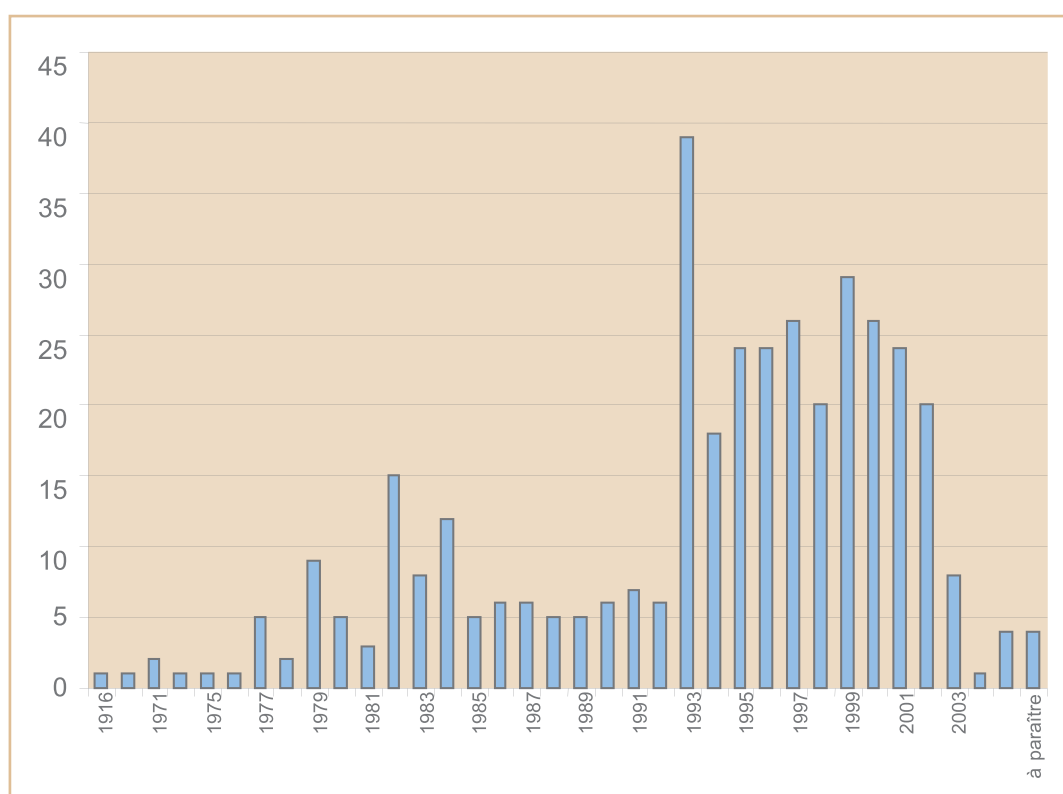
| Tableau 19 Récapitulatif des sources explorées et des résultats obtenus                                                                               |                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sources                                                                                                                                               | Résultats                                                                                                                               |
| <b>Sources explorées pour l'étude d'ENCEM (2001)</b>                                                                                                  |                                                                                                                                         |
| Scientifiques français et étrangers                                                                                                                   | Rapports et tirés à part<br>Conseils<br>Rencontres avec des universitaires rennais                                                      |
| Syndicats professionnels allemands, britanniques et suisses                                                                                           | Néant                                                                                                                                   |
| Services gouvernementaux étrangers                                                                                                                    | Néant                                                                                                                                   |
| DIREN, DRIRE, DDE, DDAF, préfectures, conseils généraux et régionaux des quatre régions et des treize départements concernés par le Massif armoricain | Rencontres, précision des attentes                                                                                                      |
| parcs naturels régionaux, conservatoires régionaux des espaces naturels... (185 courriers)                                                            | Uniquement mise en place d'un réseau pour la phase d'inventaire                                                                         |
| Serveurs télématiques                                                                                                                                 | Liste des ouvrages du monde entier portant sur l'écologie de la restauration<br>Liste des doctorats réalisés sur le thème des carrières |
| Internet                                                                                                                                              | Quelques articles                                                                                                                       |
| Bibliothèques universitaires<br>Bibliothèque du muséum national d'histoire naturel Paris<br>British Library.                                          | Obtentions d'articles et d'ouvrages                                                                                                     |
| Services de documentation des DIREN                                                                                                                   | Ouvrages et articles non référencés ailleurs                                                                                            |
| <b>Sources explorées pour l'étude d'ENCEM (2004)</b>                                                                                                  |                                                                                                                                         |
| DIREN                                                                                                                                                 | Rencontre                                                                                                                               |
| Bases de données communales en ligne sur le patrimoine naturel                                                                                        | Fiches ZNIEFF                                                                                                                           |
| Librairie en ligne du <i>Natural History Book Service</i><br>Site anglais de la <i>Society for Ecological Restoration Science</i>                     | Peu de données récentes                                                                                                                 |
| Serveurs télématiques                                                                                                                                 | Peu de données récentes                                                                                                                 |
| Universités (Caen, Toulouse, Montpellier, Aix-Marseille, Lille)                                                                                       | Peu de résultats                                                                                                                        |
| Scientifiques français<br>Conservatoires botaniques nationaux                                                                                         | Données bibliographiques complémentaires                                                                                                |
| Parcs naturels régionaux et quelques conservatoires des sites                                                                                         | Sauf cas particulier comme le Conservatoire des sites naturels bourguignons, très peu de données                                        |
| Associations naturalistes, naturalistes indépendants                                                                                                  | Informations précieuses de terrain                                                                                                      |
| Organismes de recherche et écoles : BRGM, CEMAGREF, CNRS, École des Mines, ENGREF, ENSH                                                               | Obtention essentiellement de résultats avec le CEMAGREF                                                                                 |
| DDE, SAPRR et SNCF                                                                                                                                    | Expérience en matière d'aménagement et de gestion de carrières et de milieux apparentés comme les talus de remblais et de déblais.      |

## 5.2 PRÉSENTATION DES DOCUMENTS

Malgré la spécificité des thèmes «carrière de roches massives éruptives» et «carrières de roches massives calcaires», les études ont élargi la recherche bibliographique aux domaines plus ou moins éloignés de l'écologie et de la restauration des mines de charbon, des sites dégradés en général... et finalement 380 références de toutes natures sont présentées ici. Elles ne sont pas toutes citées dans le texte mais sont connexes au sujet. Au bout du compte, les documents exploités ont des origines très diverses :

- quelques manuels généraux ;
- documents provenant d'universités ou d'organismes de recherches (articles, synthèses, colloques, symposium...);
- documents technico-scientifiques comme ceux par exemple des DIREN, du CEMAGREF ;
- documents professionnels ;
- documents naturalistes régionaux.

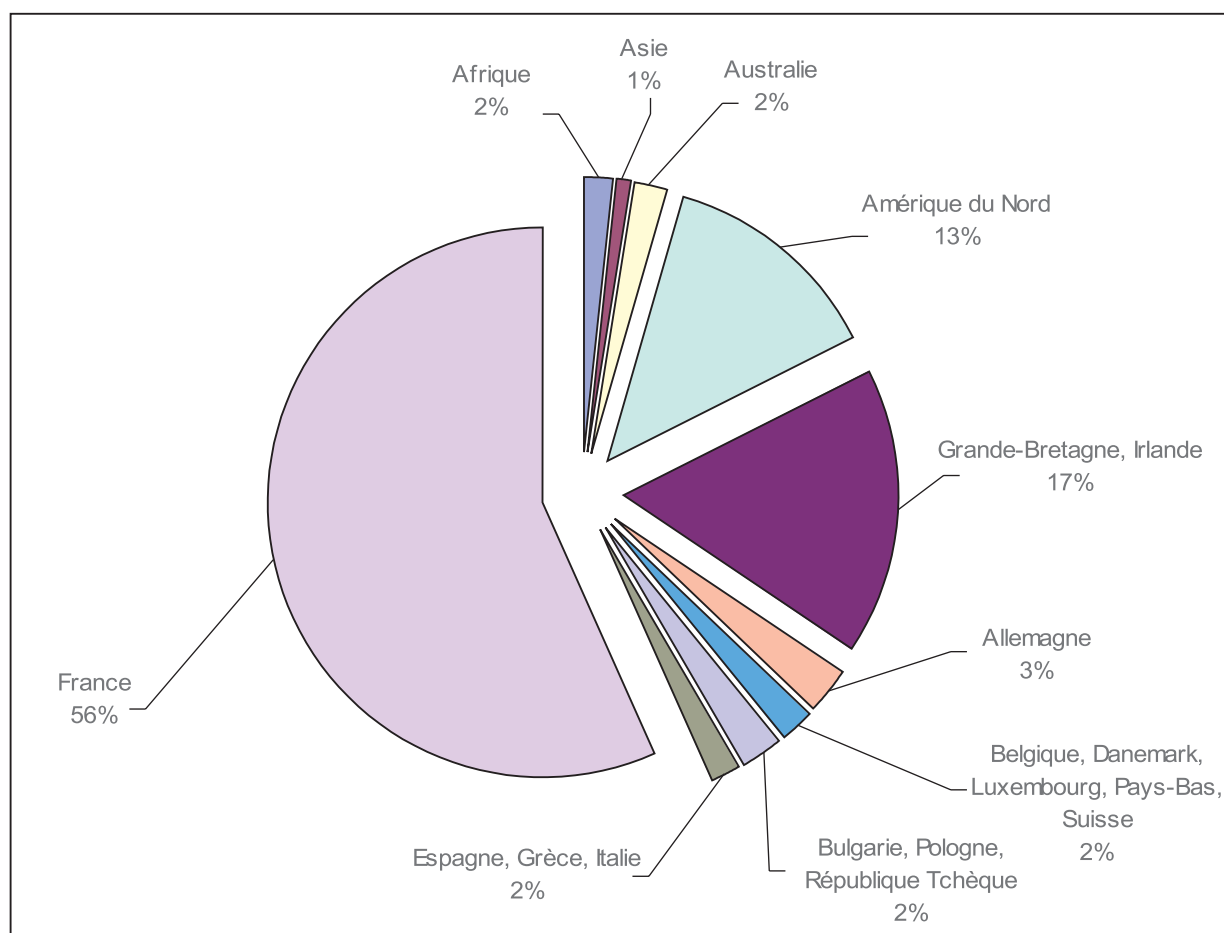
**Figure 79** Répartition chronologique des documents



Comme le montre l'histogramme de répartition chronologique de ces références (Figure 79), la majorité d'entre elles date de moins de dix ans. Quelques anciennes références ont été consultées. Il s'agit de documents relevant de théories écologiques reprises par des auteurs plus récents ou cités pour leur intérêt général ou historique.

La répartition géographique des références est pour plus de la moitié française (). Cela paraît normal dans la mesure où elle se compose pour une grande part d'études de cas et d'expériences de terrain qu'il est exceptionnel de rencontrer dans des publications à caractère international. Près d'un tiers des références étrangères sont d'origine anglo-saxonne (Grande-Bretagne, Amérique du Nord et Australie). Ceci tient à la vitalité de ces pays en termes de recherche, d'études et de publications, contribuant de manière significative à la circulation mondiale de l'information scientifique. Pour les pays européens, toutes les références citées sont diffusées en langue anglaise, par des publications essentiellement anglo-saxonnes. La barrière de la langue est un frein à l'accès de données de terrain propres à ces différents pays. Il peut être noté ici que les Britanniques, les Allemands et les Tchèques sont très avancés en matière d'écologie appliquée et c'est de leurs travaux que l'on peut tirer les enseignements les plus complets et exhaustifs.

**Figure 80** Répartition géographique des références



Trois grandes rubriques thématiques se détachent, au sein desquelles les documents rassemblés ont été regroupés :

- des réflexions relatives aux généralités et aux expériences en carrières ;
- des réflexions relatives à l'écologie de la restauration (nombreuses références anglo-saxonnes) ;
- des généralités sur l'environnement utiles (par exemple l'écologie des bermes routières ou ferroviaires, des terrils, mais aussi des atlas...).

Ce classement thématique des données bibliographiques figure en annexe du présent document.

Les références étrangères proches (Belgique, Grande-Bretagne) ou plus lointaines (Canada, Australie), sont pour leur grande majorité des travaux d'écologie fondamentale (la renaturation, l'écologie de la restauration) et plus rarement descriptives d'expériences pratiques ou similaires (objectif, interventions, gestion) à celles menées en France.

### 5.3 ANALYSE CRITIQUE DE LA BIBLIOGRAPHIE

Les études relatives à l'écologie des carrières portent toutes, sauf de rares exceptions, sur des carrières abandonnées depuis longtemps (trente ans en moyenne) et non aménagées avec un objectif écologique affiché dès le début du projet. L'écologie des carrières en exploitation n'est pas décrite, sauf au cours de certains entretiens avec des gestionnaires. Quelques études d'impact, décrivant le milieu initial avant exploitation, complètent la bibliographie.

Les facteurs déterminant le fonctionnement écologique des anciennes carrières ne sont pas étudiés avec la même intensité : si le climat, la topographie ou l'environnement sont souvent traités, d'autres facteurs, pourtant cités comme intuitivement déterminants, ne sont pas analysés. C'est le cas de :

- la couleur de la roche et des phénomènes thermiques associés ;
- les structures et textures de la roche ;
- les modalités d'exploitation et leurs conséquences : l'émission de poussières, le phasage d'exploitation, les travaux de remise en état...

Les annexes de la carrière telles que pistes, surface périphérique, bassins décanteurs... ne sont pas analysées dans les études écologiques en tant que tels, elles sont omises ou bien assimilées à la surface de la carrière. Leurs caractéristiques les différencient pourtant : périphérie non décapée, sols tassés, bassins apparentés à des zones humides...

Beaucoup de documents préconisent telle ou telle « recette » d'aménagement écologique, mais bien peu de rapports dressent le bilan d'interventions à vocation écologique effectives. Il est difficile de fournir un ordre de grandeur des coûts de ces interventions à vocation écologique.

Enfin, de nombreux naturalistes et aménageurs du territoire ont fourni, par oral, d'utiles avis, voire des réflexions construites, sur le sujet mais ceux-ci n'ont pas fait l'objet d'écrits. Certains des entretiens sont rapportés sous forme de fiche de synthèse, rassemblées avec les autres fiches de lecture réalisées à l'occasion de l'étude sur les roches calcaires. Ces références sont spécifiées dans le texte sous la forme « communication orale ».

Environ 380 références bibliographiques ont été analysées. Elles sont classées selon trois thèmes :

- . écologie de la restauration,
- . carrières,
- . environnement,

et sont complétées de communications orales.

Leur analyse laisse apparaître les lacunes suivantes:

- . les carrières décrites ne couvrent pas l'ensemble des zones de gisement français ;
- . les préconisations théoriques d'aménagement « écologique » sont nombreuses, mais les mises en pratiques et les bilans d'expériences sont rares ;
- . des facteurs déterminants de l'écologie des carrières sont pressentis, mais leur influence n'est pas démontrée ;
- . les annexes de la carrière (pistes...) ne sont pas étudiées ;
- . le « coût d'aménagement écologique » n'est pas précisé.



## ANNEXE II - LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

Trois thèmes ont été distingués, ils sont identifiables par le surlignage suivant :

Carrières

Généralités sur l'environnement

Écologie de la restauration

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abbayes H. des, Claustres G., Corillion R., Dupont P., 1971. Flore et végétation du Massif armoricain. Tome 1, Flore vasculaire. Presses Universitaires de Bretagne. 1-1226.                                                                                                                                                 |
| AEE - Agence Européenne de l'Environnement, 1999. L'environnement à l'aube du XXIème siècle.                                                                                                                                                                                                                                 |
| AFIE - Association Française des Ingénieurs Ecologues, 1993. Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct. 1993.                                                                                                           |
| AFIE - Association Française des Ingénieurs Ecologues, 1999. L'approvisionnement en espèces végétales locales dans les aménagements : quel(s) enjeu(x) pour la diversité végétale ? Actes de la journée technique du 16 mars 1999, 102 p.                                                                                    |
| Alard D., 2000. Déterminisme et restauration de la biodiversité des écosystèmes calcicoles dans la moitié nord de la France (Normandie et Lorraine). Programme national de recherche «Recréer la Nature». Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Université de Rouen, Laboratoire d'Ecologie, 44 p. |
| Alard D., 2002. La restauration des écosystèmes calcicoles de la basse vallée de la Seine : l'importance des échelles spatio-temporelles pour définir un écosystème de référence. Rev. Ecol. (Terre Vie), supplément 9.                                                                                                      |
| Allion Y., 1985. Etude de reconstitution de groupements végétaux calcicoles après extraction de calcaire : le site d'Ymonville (Eure-et-Loir). IEA, Conseil général d'Eure et Loir, DRAE Centre, Taxe parafiscale sur les granulats.                                                                                         |
| Allion Y., 1989. Etude de reconstitution de groupements végétaux calcicoles après extraction de calcaire. Propositions. IEA, Conseil général d'Eure-et-Loir, DRAE Centre, Taxe parafiscale sur les granulats.                                                                                                                |
| Allion Y., 1993. Etude de la recolonisation de la végétation calcicole après exploitation de carrières en région centre. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 55-70.                                |
| Ames M., 1993. Sequential sampling of surface-mined land to assess reclamation. Journal of Range Management, 46 : 498-500.                                                                                                                                                                                                   |
| Amicale Européenne de Floristique, à paraître. La restauration de la flore indigène : jusqu'où peut-on aller ? Actes du colloque du 19 sept. 2003 à Louvain-la-Neuve (Belgique).                                                                                                                                             |
| Anderson P., 1995. Ecological restoration and creation - a review. Biol. J. Lin. Soc., 56 (suppl. A) : 197-211.                                                                                                                                                                                                              |
| Annezo N., Magnanon, S. & Malengreau, D., 1999. Bilan régional de la flore bretonne. Conservatoire Botanique National de Brest. 138 pp.                                                                                                                                                                                      |
| Anonyme, 2003. La carrière Chéret : un site qui renferme tous les stades de l'évolution naturelle. L'Echo la Marseillaise, 11 septembre 2003 : 17-19.                                                                                                                                                                        |
| ANTEA, 1996. Carrière d'éboulis des Clapes du Lasseron (commune de Cervières) : renouvellement d'exploitation. Guérin Etablissements.                                                                                                                                                                                        |
| Armstrong K.N. & Nichols O.G., 2000. Long-term trends in avifaunal recolonisation of rehabilitated bauxite mines in the Jarrah forest of south-western Australia. Forest Ecology and Management, 126 : 213-225.                                                                                                              |
| Arnal G. & Lamade E., 1987. La reconquête par la végétation spontanée des anciennes carrières sèches de sables de Fontainebleau. Application à la replantation de ces carrières. Bull. liaison Labo. P. et Ch., 152 : 9-16.                                                                                                  |
| Arnal G., 1984. La restitution des carrières au milieu naturel et la création de zones écologiques. LROP Trappes, Ministère de l'Environnement et de l'Urbanisme.                                                                                                                                                            |
| Arnal G., Griveaux B. & Robert J., 1985. Restitution des carrières en milieu naturel et création de zones écologiques. Mines et Carrières : 398-403.                                                                                                                                                                         |
| Arnold E.N., Burton J.A., 1978. Tous les reptiles et amphibiens d'Europe. Bordas.                                                                                                                                                                                                                                            |
| Aronson J. & Le Floch E., 1996a. Hierarchies and landscape history : dialoguing with Hobbs and Norton. Restoration Ecology, 4 : 327-333.                                                                                                                                                                                     |
| Aronson J. & Le Floch E., 1996b. Vital landscape attributes : missing tools for restoration ecology. Restoration Ecology, 4 : 377-387.                                                                                                                                                                                       |
| Aronson J. & Le Floch E., 1996c. Que faire de tant de notions du paysage ? Natures-Sciences-Sociétés, 4 : 264-266.                                                                                                                                                                                                           |
| Aronson J., Dhillon S. & Le Floch E., 1995. On the need to select an ecosystem of reference, however imperfect: a reply to Pickett and Parker. Restoration Ecology, 3 (1) : 1-3.                                                                                                                                             |
| Aronson J., Dhillon S. & Le Floch E., 1999. Dryland restoration and rehabilitation. Arid Soil Research and Rehabilitation, 13: 315-317.                                                                                                                                                                                      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1993a. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semiarid lands. I. A view from the south. <i>Restoration Ecology</i> , 1 : 8-17.                                                                                                    |
| Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1993b. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semiarid lands. II. Case studies from southern Tunisia, central Chile and northern Cameroon. <i>Restoration Ecology</i> , 1 : 168-187.                                              |
| Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1995. Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides. Le vocabulaire et les concepts. In : Pontanier R., M'Hiri A., Akrimi N., Aronson J., Le Floc'h E. (Eds.) «L'Homme peut-il refaire ce qu'il a défait», : 11-29. |
| Ash H.J., Gemmell R.P. & Bradshaw A.D., 1994. The introduction of native plant species on industrial waste heaps: a test of immigration and other factors affecting primary succession. <i>Journal of Applied Ecology</i> , 31 : 74-84.                                                                                     |
| Barbault R., 1995. Biodiversity dynamics: from population and community ecology approaches to a landscape ecology point of view. <i>Landscape and Urban Planning</i> , 31 : 89-98.                                                                                                                                          |
| Barnaud G. & Chapuis J.L. . Recréer la nature programme national de recherche. Muséum National d'Histoire Naturelle. Plaque 8 p.                                                                                                                                                                                            |
| Barnaud G., 1980a. Inventaire des anciennes carrières de granulats – Département des Côtes du Nord. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats & DRAE Bretagne.                                                                                                                                             |
| Barnaud G., 1980b. Inventaire des anciennes carrières de granulats – Département du Morbihan. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats & DRAE Bretagne.                                                                                                                                                   |
| Barnaud G., 1995. A l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration. <i>Natures-Sciences-Sociétés</i> , 3 - hors série : 36-50.                                                                                                                                                                 |
| Barnaud G., 1998. Conservation des zones humides : concepts et méthodes appliqués à leur caractérisation. Thèse de doctorat, Université de Rennes I, Coll. Patrimoines Naturels, volume 34, Service du Patrimoine Naturel / IEGB / MNHN, Paris, 451 p.                                                                      |
| Baudoit G., 1993. Inventaire botanique et ornithologique des carrières sèches de la boucle de Moisson. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993 «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 101-116.                                                |
| Beebee T.J.C., 1983. The Natterjack toad. Oxford University Press.                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Beebee T.J.C., Denton J.S. & Buckley J., 1996. Factors affecting population densities of adult Natterjack toads <i>Bufo calamita</i> in Britain. <i>Journal of Applied Ecology</i> , 33 : 263-268.                                                                                                                          |
| Bell L.C., 2001. Establishment of native ecosystems after mining - Australian experience across diverse biogeographic zones. <i>Ecological Engineering</i> , 17 : 179-186.                                                                                                                                                  |
| Bell S.S., Fonseca M.S. & Motten L.B., 1997. Linking restoration and landscape ecology. <i>Restoration Ecology</i> , 5 : 318-323.                                                                                                                                                                                           |
| Bertrand A., 1997. Endémisme et biodiversité : l'exemple des mollusques dans les Pyrénées françaises. <i>Vertigo</i> , 7 : 45-57.                                                                                                                                                                                           |
| Berube M.E. & Lavoie C., 2000. The natural revegetation of a vacuum-mined peatland: Eight years of monitoring. <i>Can. Field Nat.</i> , 114 : 279-286.                                                                                                                                                                      |
| Béton et Granulats Sylvestre, 1999. Demande d'autorisation au titre des installations classées, rubrique n°2510, exploitation de carrière, rubrique n°2525, unité de concassage-criblage, commune de Cabrières d'Avignon, lieu-dit «Les Vignarès».                                                                          |
| Biggs J., Corfield A., Walker D., Whitfield M. & Williams P., 1994. New approaches to the management of ponds. <i>British Wildlife</i> , 5 : 273-287.                                                                                                                                                                       |
| Billeter R., Hooftman D.A.P. & Diemer M., 2003. Differential and reversible responses of common fen meadow species to abandonment. <i>Applied Vegetation Science</i> , 6 : 3-12.                                                                                                                                            |
| Bioret F. coord., 1994. Catalogue des espèces de la Directive Habitats présents en Bretagne. Préfecture Bretagne - DIREN Bretagne.                                                                                                                                                                                          |
| BIOTOPE, 2002. Guide sur la prise en compte des milieux naturels dans les études d'impact. DIREN Midi-Pyrénées, 76 p.                                                                                                                                                                                                       |
| Blamey M. & Grey-Wilson C. 1991. La flore d'Europe occidentale. Arthaud.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Blanc V., 1993. Sensibilité de l'espace aux carrières - Cartographie. Parc Naturel Régional du Vercors, 9 p.                                                                                                                                                                                                                |
| Blancher P. & Paquet P., 1999. Le plan de paysage d'un bassin carrier à l'horizon de 30 ans. Parc Naturel Régional des Caps et marais d'Opale, ADEME, 19 p.                                                                                                                                                                 |
| Block W.M., Brennan L.A. & Gutierrez R.J., 1987. Evaluation of guild-indicator species for use in resource management. <i>Envir. Management</i> , 11 : 265-269.                                                                                                                                                             |
| Blondel J., 1976. Stratégies démographiques et successions écologiques. <i>Bull. Soc. Zool. France</i> , 101 : 695-718.                                                                                                                                                                                                     |
| Blondel J., 1986. Biogéographie évolutive. 2ème édition Masson, 221 p.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Bonnet E., Vilks A., Lenain J.F. & Petit D., 1997. Analyse temporelle et structurale de la relation Orthoptères - Végétation. <i>Ecologie</i> , 28 (3) : 209-216.                                                                                                                                                           |

|                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Booth D.T., Gores J.K., Schuman G.E. & Olson R.A., 1999. Shrub densities on pre-1985 reclaimed mine lands in Wyoming. <i>Restoration Ecology</i> , 7 : 24-32.                                                                       |
| Bouchet P., Falkner G. & Seddon M.B., 1999. Lists of protected land and freshwater molluscs in the Bern Convention and European Habitats Directive: are they relevant to conservation? <i>Biological Conservation</i> , 90 : 21-31. |
| Bouffort J.M., 1996. La végétalisation en carrières. Principes généraux applicables aux plantations. CEFICEM, 15 p.                                                                                                                 |
| Boulet L., 1996. Approche phytoécologique de la dynamique des végétations primaires dans les carrières de roches massives. Thèse, Université Rennes I, 567 p. + annexes.                                                            |
| Boulet L., 1999. Description synfloristique, synécologique et synsystématique de quelques pelouses acidiphiles remarquables des carrières sèches de la Basse-Normandie Armoricaïne. <i>E.R.I.C.A.</i> , 11 : 9-25.                  |
| Box E.O., 1996. Plant functional types and climate at the global scale. <i>Journal of Vegetation Science</i> , 7 : 309-320.                                                                                                         |
| Box J., 1993. Conserving or greening ? The challenge of post-industrial landscapes. <i>British Wildlife</i> , 4 : 273-279.                                                                                                          |
| Box J., 1996. Setting objectives and defining outputs for ecological restoration and habitat creation. <i>Restoration Ecology</i> , 4 (4) : 427-432.                                                                                |
| Bradshaw A.D. & Chadwick M.J., 1980. The restoration of land : the ecology and reclamation of derelict and degraded land. Blackwell, Oxford.                                                                                        |
| Bradshaw A.D. & Huttli R.F., 2001. Future minesite restoration involves a broader approach. <i>Ecological Engineering</i> , 17 : 87-90.                                                                                             |
| Bradshaw A.D., 1983. The reconstruction of ecosystems. <i>Journal of Applied Ecology</i> , 20 : 1-17.                                                                                                                               |
| Bradshaw A.D., 1984. Land restoration, now and in the future. <i>Proc. Royal Soc. B.</i> , 223 : 1-23.                                                                                                                              |
| Bradshaw A.D., 1993. Restoration ecology as a science. <i>Restoration Ecology</i> , 1 : 71-73.                                                                                                                                      |
| Bradshaw A.D., 1997. Restoration of mined lands - using natural processes. <i>Ecological Engineering</i> , 8 : 255-269.                                                                                                             |
| Bradshaw A.D., 2000. The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties. <i>Landscape and Urban Planning</i> , 51 : 89-100.                                                                                  |
| Bradshaw A.D., Marrs R.H. & Roberts R.D., 1982. Succession. <i>Ecology of Quarries</i> . Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 47-52.                                                                                       |
| BRGM Orléans, 1990. Catalogue des rapports d'opération. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats.                                                                                                                 |
| BRGM, 1994. Schéma départemental des carrières des Bouches-du-Rhône. BRGM, Ministère de l'Industrie, DIREN, UNICEM, 113 p.                                                                                                          |
| BRGM-SGR Ile-de-France, 1985. Réaménagement des carrières du Blésois (Loir-et-Cher). Compte-rendu des travaux. Taxe parafiscale sur les Granulats, 48 p + pl. hors texte.                                                           |
| Brofas G. & Karetos G., 2002. Revegetation of mining spoils by seeding of woody species on Ghiona Mountain, Central Greece. <i>Land Degradation and Development</i> , 13 : 461-467.                                                 |
| Brofas G. & Varelides C., 1999. Hydro-seeding and mulching for establishing vegetation on mining spoils in Greece. <i>Land Degradation and Development</i> , 11 : 375-382.                                                          |
| Brown V.K. & Gange A.C., 1992. Secondary plant succession : how is it modified by insect herbivory ? <i>Vegetatio</i> , 101 : 3-13.                                                                                                 |
| Brown V.K., 1982. Size and shape as ecological discriminants in successional communities of Heteroptera. <i>Biol. J. Lin. Soc.</i> , 18 : 279-290.                                                                                  |
| Brown V.K., 1984. Secondary succession : insect - plant relationships. <i>BioScience</i> , 34 (11) : 710-716.                                                                                                                       |
| Bruhier S., 1992. Méthodologie de réaménagement des carrières. ENGREF, 47 p. + Annexes.                                                                                                                                             |
| Brun J.J. & Guichardon P., 1991. Ecrans paysagés et revégétalisation des carrières, bilan des essais réalisés à Marchaux, CEMAGREF Grenoble, 8 p.                                                                                   |
| Brun J.J., 1987. Revégétalisation de carrières de roches massives (Marchaux). CEMAGREF Grenoble, Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats, 41 p.                                                                  |
| Brunaud A., Cervaux P. & Bert G.D., 1988. La végétation des milieux handicapés : cas des gravières en eau et des talus routiers. <i>Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle d'Autun</i> , 125 : 1-39.                           |
| Brunaud E., 1997a. Dynamique de la recolonisation végétale des carrières sèches abandonnées. Stage DESS «Espace rural et environnement», Université Bourgogne, Labo. Ecol., 38 p + annexes.                                         |
| Brunaud E., 1997b. Dynamique de la recolonisation végétale des carrières sèches abandonnées - Résumé. Stage DESS «Espace rural et environnement», Université Bourgogne, Labo. Ecol., 12 p.                                          |
| Brunet Y., 1983. Principaux aspects du réaménagement des carrières. CEMAGREF, 12 p.                                                                                                                                                 |
| Burel F. & Baudry J., 1999. Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications. Tec & Doc.                                                                                                                                    |
| Cairns J., 1998. Eco-societal restoration : rehabilitating human society's life support system. In : Rana B.C. (Eds.), <i>Damaged ecosystems and restoration</i> . World Scientific : 1-23.                                         |
| Cairns J., 2000. Setting ecological restoration goals for technical feasibility and scientific validity. <i>Ecological Engineering</i> , 15 : 171-180.                                                                              |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caparroy P., 1989. Possibilités de remise en état naturel des carrières, constat de situation et éléments de réflexion. Mémoire de DUT Génie de l'Environnement, Université de Tours. CETE Normandie-Centre (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois), CDPNE Loir-et-Cher, 194 p.                                                                                      |
| Cassan S., Cambecèdes J. & Largier G., 2001. Revégétaliser autrement en montagne pyrénéenne. Communication au colloque de botanique pyrénéo-cantabrique, Vall de Boi, 4-6 juillet 2001. Acta Bot. Barc., 48.                                                                                                                                                                        |
| Cauderon A., 1996. Les enjeux de la protection de la biodiversité. Acta Bot. Gallica, 143 : 225-231.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| CEMAGREF, 1983. Les carrières de roches massives - Aménagements paysagers. Min. du redéploiement industriel et du commerce extérieur, Ministère de l'environnement & Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats, 48 p.                                                                                                                                              |
| CEMAGREF, 1984. Revégétalisation des carrières : principes généraux applicables aux reboisements. Ministère de l'Industrie et de la Recherche, Ministère de l'Agriculture, 49 p.                                                                                                                                                                                                    |
| Chambaud F., 1993. Proposition d'aménagements orientés de terrils et actions en faveur de la cicatrisation de petite carrière de Comblanchien. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993 «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 87-91.                                                                  |
| Chapin III F.S., 1993. Physiological controls over plants establishment in primary succession. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), Primary succession on land. Blackwell Scientific Publications : 161-178.                                                                                                                                                                       |
| Chassany J.P., Crossenier C., Cohen M., Lardon S., Lhuillier C. & Osty P.L., 2002. Réhabilitation et restauration de pelouses sèches en voie de fermeture sur le causse Méjean. Quels enjeux pour une recherche en partenariat ? Rev. Ecol. (Terre vie), supplément 9.                                                                                                              |
| Chépeau C., 1981. Les anciennes carrières en Loire-Atlantique : inventaire, intérêt biologique, intérêt paysager. CETE Ouest                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Chinery M. 1988. Insectes d'Europe occidentale. Arthaud.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Choi Y.D. & Wali M.K., 1995. The role of <i>Panicum virgatum</i> (Switch grass) in the revegetation of iron-mine tailings in northern New York. Restoration Ecology, 3 (2) : 123-132.                                                                                                                                                                                               |
| Clements F.E., 1916. Plant succession : an analysis of the development of vegetation. Carnegie Inst. Washington. Publ., 242 : 1-512.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Clewell A., Rieger J. & Munro J., 2000. Guidelines for developing and managing ecological restoration projects. Society for Ecological Restoration.                                                                                                                                                                                                                                 |
| CNC-UNPG, 1998. Paysage et aménagement de carrières. Comité National de la Charte de l'U.N.P.G.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Collectif, 1996. Extraction de matériaux et protection des milieux aquatiques. SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse, Note technique, 50 p.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Collette J., 2003. Les oiseaux sauvages des carrières de Normandie. Editions du Cormoran, UNICEM Normandie. 60 p.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Comité national de la charte, 1999. Bilan des actions entreprises. Industries des granulats.                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Connell J.H. & Slatyer R.O., 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. Am. Nat., 111 : 1119-1144.                                                                                                                                                                                                               |
| Conservatoire des sites du Nord et du Pas-de-Calais, 2003. Recueil sur la renaturation d'espaces. Conservatoire des Sites, 80 p.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Coppe J.L. & Noiret C., 1995. Réaménagement biologique des carrières après exploitation. Les Bocages A.S.B.L. - Broch. Tech. N°2. Ministère de la région Wallonne - DGRNE.                                                                                                                                                                                                          |
| Coppin N.J. & Box J., 1998. Sustainable rehabilitation and revegetation: the identification of after-use options for mines and quarries using a land suitability classification involving nature conservation. In : Fox H.R., Moore H.M. & McIntosh A.D. (Eds.), Land reclamation : achieving sustainable benefits. Proc 4th Int. Conf., Nottingham, UK, 7-11 Sept. 1998 : 229-241. |
| Coppin N.J. & Bradshaw A.D., 1982. Quarry reclamation. Mining Journals Book, London.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Coppin N.J., 1982. A reclamation strategy for quarrying. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 67-71.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Cordoleani M. & Cordoleani C., 1979. Problématique des carrières face à leur environnement en région provençale. Thèse Univ. Aix Marseille III.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Corillon R., 1971. Notice détaillée des feuilles armoricaines. Phytogéographie et végétation du Massif armoricain. Carte de végétation de la France au 200 000e. CNRS, 197 pp.                                                                                                                                                                                                      |
| Coumoul H. & Mineau H., 2002. Jardins de l'autoroute. Histoire de graines, d'herbes et de rocailles. Actes Sud, 187 p.                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CPIE Pays de l'Oise, 2003. Découverte d'une explosion de biodiversité. Granulo, n° 5, 4 p.                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Croix A. & Veillard J.Y., 2000. Dictionnaire du patrimoine breton. Apogée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Cuénot E., 1993. La Chalandrue, réhabilitation écologique d'une carrière. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 145-147.                                                                                                                                    |
| Cullen W.R., Wheather C.P. & Dunleavy P.J., 1998. Establishment of species-rich vegetation on reclaimed limestone quarry faces in Derbyshire, UK. Biological Conservation, 84 : 25-33.                                                                                                                                                                                              |



|                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dale V.H., Brown S., Haeuber R.A., Hobbs N.T., Huntly N., Naiman R.J., Riebsame W.E., Turner M.G. & Valone T.J., 2000. Ecological principles and guidelines for managing the use of land. <i>Ecological Applications</i> , 10 (3) : 639-670.            |
| Danais M. & Montfort D., à paraître. Pour une remise en état plus écologique des carrières de roches massives : principes et guide technique. DIREN Basse-Normandie.                                                                                    |
| Danton Ph. & Baffray M., 1995. Inventaire des plantes protégées en France. Nathan & AFCVE.                                                                                                                                                              |
| Dasnias P., 1996. Rôles écologiques des dépendances vertes autoroutières. Recherche bibliographique sur la biodiversité végétale. USAP, SCETAUROUTE, ECOSPHERE, 120 p.                                                                                  |
| Dasnias P., 2002. Aménagement écologique des carrières en eau : Guide pratique. Ecosphère, Charte UNPG, Paris, 208 p.                                                                                                                                   |
| Dasnias P., Gaultier C. & Le Bloch F., 1997. Rôles écologiques des dépendances vertes autoroutières. Résultats et analyse des inventaires floristiques. ASFA, SCETAUROUTE, ECOSPHERE, 120 p.                                                            |
| Davis B.N.K., 1982. Regional variation in quarries. <i>Ecology of Quarries</i> . Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 12-19.                                                                                                                   |
| Davis B.N.K., 1986. Colonization of newly created habitats by plants and animals. <i>Journal of Environmental Management</i> , 22 : 361-371.                                                                                                            |
| Davis M.A. & Slobodkin L.B., sous presse. The science and values of restoration ecology. <i>Restoration Ecology</i> , 8 p.                                                                                                                              |
| De Foucault B., 1979. Observations sur la végétation des rochers arides de la Basse-Normandie armoricaine. <i>Doc. Phytosoc.</i> , N.S., Lille, 4 : 267-277.                                                                                            |
| De Foucault B., 1981. Cartographie chorologique et étude complémentaire de quelques associations végétales des pointements de roches précambriennes et primaires de Basse-Normandie continentale. <i>Bull. Soc. Linn. Normandie</i> , 108 : 61-70.      |
| Debout G., 2001. Le Grand Corbeau <i>Corvus corax</i> et le Faucon Pèlerin <i>Falco peregrinus</i> nicheurs en Normandie. <i>Alauda</i> , 69 : 13-17.                                                                                                   |
| Decocq G., 1994. Flore et végétation des anciennes carrières de phosphates du nord de la France ; importance, menaces et conservation. Thèse de Pharmacie, Université de Picardie, 124 p + bibliographie.                                               |
| Decocq G., 1999. The dynamics of the vegetal recolonization in phosphated chalk quarries abandoned in northern France : a phytosociological and systemic analysis. <i>Belgian J. Bot.</i> , 132 : 77-94.                                                |
| Delarze R., 1994. Dynamique de la végétation sur les pistes ensemencées de Crans-Montana (Valais, Suisse). Effets de l'altitude. <i>Botanica Helvetica</i> , 104 : 3-16.                                                                                |
| Devaux A., 2001. Evolution de la qualité chimique des eaux acides de carrières au contact de terrils humides. Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers.                                                                                            |
| Dinger F., 1997. Végétalisation des espaces dégradés en altitude. CEMAGREF-Editions, Antony, 144 p.                                                                                                                                                     |
| DIREN & Conseil Régional Bretagne, 1995. Curieux de Nature – Patrimoine naturel de Bretagne.                                                                                                                                                            |
| DIREN Bretagne, 1999. Atlas de l'environnement en Bretagne - Faits, chiffres et repères cartographiques.                                                                                                                                                |
| Donadieu P. & Rumelhart M., 1983. Ecologie et paysage - La cicatrisation des «plaies paysagères» - Le cas de la cicatrisation végétale naturelle. ENSP Versailles, 36 p.                                                                                |
| Donadieu P., 2002. Les références en écologie de la restauration. <i>Rev. Ecol. (Terre Vie)</i> , supplément 9 : 109-119.                                                                                                                               |
| Donnez D., 1995. Les études d'impact carrière. Ministère de l'environnement.                                                                                                                                                                            |
| Down C.G., 1982. The re-creation of conservation value in mineral workings. <i>Ecology of Quarries</i> . Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 62-66.                                                                                           |
| Dragovich D. & Patterson J., 1995. Condition of rehabilitated coal mines in the hunter valley, Australia. <i>Land Degradation and Development</i> , 6 : 29-39.                                                                                          |
| Dubois P.J., Le Maréchal P., Oliosio G. & Yésou P., 2000. Inventaire des oiseaux de France – Avifaune de la France métropolitaine. Nathan.                                                                                                              |
| Duhautois L., 1998. L'état des milieux et les territoires : Le patrimoine naturel. In : IFEN (Eds.), L'environnement en France. La Découverte : 109-130.                                                                                                |
| Dunger W., 1989. The return of soil fauna to coal mined areas in the German Democratic Republic. In : Majer J.D. (Eds.), <i>Animals in primary succession - the role of fauna in reclaimed lands</i> . Cambridge University Press, Cambridge : 307-337. |
| Dupont P., 1990. Atlas partiel de la flore de France. M.N.H.N., Paris. 142 pp.                                                                                                                                                                          |
| Dupont P., 1992. La végétation du site de l'ancienne carrière de Cheffois. Département de la Vendée - Groupe d'études des milieux naturels - Université de Nantes.                                                                                      |
| Dupont P., 2001. Atlas floristique de la Loire-Atlantique et de la Vendée – Etat et avenir d'un patrimoine. SSNOF. Siloë.                                                                                                                               |
| Duret J.L. & Chiffaut A., 2000. Etude de la faune de la carrière de la Chalandrue, Til-Châtel (Côte d'Or). <i>Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons</i> , 27 p + annexes.                                                                       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dutoit T., 1996. Dynamique et gestion des pelouses calcaires de Haute-Normandie. PUR, Publ. Univ. Rouen. Thèse Doct. Eur. Biol., Lab. Ecol. Univ. Rouen.                                                                                                                                                                  |
| Duval T., 1993. Stratégie et protection des pelouses calcaires. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 125-133.                                                                                    |
| ECCB (European Committee for the Conservation of Bryophytes), 1995. Red Data Book of European Bryophytes.                                                                                                                                                                                                                 |
| Ecosphère, 2001. Carrières et zones humides – Le patrimoine écologique des zones humides issues des carrières. CNC-UNPG.                                                                                                                                                                                                  |
| ENCEM, 1996. Demande d'autorisation au titre des installations classées, rubrique 2510, exploitation d'une carrière de roche calcaire, commune de St Crépin, lieu-dit «Barrachin», Hautes Alpes. Ets Charles Queyras SRGD, ENCEM, 4 fasc.                                                                                 |
| ENCEM, 1997. Expertise écologique de la carrière de Kerhoual - Commune de Plouay (Morbihan). 139 pp.                                                                                                                                                                                                                      |
| ENCEM, 2001a. Demande d'autorisation au titre des installations classées, commune de Chamesson (21). SOGEPIERRE, ENCEM, dossier n° 04-21-3566.                                                                                                                                                                            |
| ENCEM, 2001b. Demande d'autorisation au titre des installations classées, commune de Montois-la-Montagne (57). SOCOMAN-PROCATRA, ENCEM, dossier n° 09-57-3462.                                                                                                                                                            |
| ENCEM, 2001c. Carrières de roche éruptive - Potentialité écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions. ENCEM et CNC-UNPG.                                                                                                                                                                         |
| ENCEM, 2002. Demande d'autorisation au titre des installations classées, commune de Moulézan (30). OMYA, ENCEM, dossier n° 18-30-3695.                                                                                                                                                                                    |
| ENCEM, 2004. Les potentialités écologiques des carrières calcaires – Étude bibliographique. ENCEM et CNC-UNPG.                                                                                                                                                                                                            |
| English Nature, Quarry products Association and Silica & Moulding Sands Association, 1999. Biodiversity and - Minerals - Extracting the benefits for wildlife. Entec UK Ltd., 14 p.                                                                                                                                       |
| Etienne M., Aronson J. & Le Floc'h E., 1998. Abandoned lands and land use conflicts in southern France. Rundel & al. (eds.) : Landscape Degradation and Biodiversity in Mediterranean-Type Ecosystems. Ecological Studies, vol. 136. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.                                                   |
| Etude environnement, 1998. Commune de Lambesc, carrière Les Taillades, demande d'autorisation de poursuite de l'exploitation avec extension. Midi Concassage.                                                                                                                                                             |
| EUR15, 1999. Manuel d'interprétation des habitats de l'union européenne. Commission Européenne DG Environnement, 132 pp.                                                                                                                                                                                                  |
| Evangelou V.P., 2001. Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential fields application. Ecological Engineering, 17 : 165-178.                                                                                                                                                                          |
| Felinks B., Pilarski M. & Wiegler G., 1998. Vegetation survey in the former brown coal mining area of eastern Germany by integrating remote sensing and ground based methods. Appl. Veg. Sci., 1 : 233-240.                                                                                                               |
| Fernandez T., 1993. Approche méthodologique et descriptions de scénarios de réaménagement d'une carrière de basalte près de Saint-Thibéry (34). Université Montpellier II, 150 p.                                                                                                                                         |
| Finegan B.G. & Harvey H., 1982. The dynamics of chalk quarry vegetation. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 41-46.                                                                                                                                                                        |
| Floraine, 2003. Willemetia, n° 35, 6 p.                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Folgarait P.J., 1998. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning : a review. Biodiversity and Conservation, 7 : 1221-1244.                                                                                                                                                                            |
| Fouillet P., 1996. Les insectes de la Directive Habitats en Bretagne. Bilan des connaissances sur les espèces dans la région : Biologie, Ecologie, répartition et niveau de vulnérabilité. Préfecture Bretagne - DIREN Bretagne.                                                                                          |
| Frain H., Loiseau P. & Merle G., 1986a. Dix années d'observations sur le reverdissement d'une piste de ski dans le massif central I. Rasen-Turf-Gazon, 1 : 15-23.                                                                                                                                                         |
| Frain H., Loiseau P. & Merle G., 1986b. Dix années d'observations sur le reverdissement d'une piste de ski dans le massif central II. Rasen-Turf-Gazon, 2 : 43-49.                                                                                                                                                        |
| Frain M., 1984. Evaluations des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique : Romanet, Reignefort et Pagnac du secteur Ouest de Limoges. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats, C.E.S.A. - G.R.P.E., Université de Tours, 94 p. |
| Frain M., 1991. Approche phytosociologique de la dynamique des végétations primaires sur roches artificiellement dénudées en Auvergne, Velay et Limousin. Thèse de l'Université de Clermont-Ferrand II, 151 p + tableaux.                                                                                                 |
| Franklin J.F., 1993. Preserving biodiversity : species, ecosystems, or landscapes ? Ecological Applications, 3 (2) : 202-205.                                                                                                                                                                                             |
| Friday L.E., 1987. The diversity of macroinvertebrate and macrophyte communities in ponds. Freshwater Biology, 18 : 87-104.                                                                                                                                                                                               |
| Frochot B. & al., 2000. Intérêt écologique et implications économiques des réaménagements de carrières. Méthodes d'évaluation et étude des trajectoires et vitesses d'évolution. Rapport du Programme «Recréer la Nature». Université de Bourgogne, Dijon, 57 p.                                                          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frochot B. & Godreau V., 1995. Intérêt écologique des carrières, terrils et mines. Natures-Sciences-Sociétés, Hors-série : 66-76.                                                                                                                                                                     |
| Frochot B., Graf F., Sthal M., Terrel N., 2006. Le crustacé <i>Chirocephalus diaphanus</i> en Bourgogne in Bourgogne nature Novembre 2006, p25-28.                                                                                                                                                    |
| Frochot B., 1993. Intérêt ornithologique des carrières sèches, objectifs et conditions de réaménagements. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 45-51.                        |
| Frochot B., 2002. Comment évaluer l'intérêt écologique des réaménagements de carrières ? Rev. Ecol. (Terre Vie), supplément 9 : 251-261.                                                                                                                                                              |
| Frouz J., Keplin B., Pizl V., Tajovsky K., Stary J., Lukesova A., Novakova A., Balik V., Hanel L., Materna J., Düker C., Chalupsky J., Rusek J. & Heinkel T., 2001. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. Ecological Engineering, 17 : 275-284. |
| Galan P., 1997. Colonization of spoil benches of an opencast lignite mine in northwest Spain by amphibians and reptiles. Biological Conservation, 79 : 187-195.                                                                                                                                       |
| Gauthie C., 1998. Carrière de Bestouan, commune de Cassis, dossier de demande d'autorisation d'exploitation. ANTEA, 82 p.                                                                                                                                                                             |
| Gawn P.E., 1982. Restoration schemes : an industrial viewpoint. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 72-74.                                                                                                                                                             |
| Geist C. & Galatowitsch S.M., 1999. Reciprocal model for meeting ecological and human needs in restoration projects. Conservation Biology, 13 (5) : 970-979.                                                                                                                                          |
| Ghio C., 1978. Evaluation quantitative de la valeur écologique et esthétique des terrils de Charbonnages. Bulletin de la Société Royale de Botanique en Belgique, 40 p.                                                                                                                               |
| Godron M., 1984. A guideline for ecological research. In : Cooley J.H. & Golley F.B. (Eds.), Trends in ecological research for the 1980s., Plenum N.Y. : 289-297.                                                                                                                                     |
| Granulats et matériaux de la Cote, 1987. Commune de Callas (83), carrière de calcaire, dossier de demande d'autorisation d'ouverture de carrière. 89 p.                                                                                                                                               |
| Gray H., 1982. Plant dispersal and colonisation. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 27-31.                                                                                                                                                                            |
| Guichardon P., 1988. Les végétaux grimpants dans les carrières. CEMAGREF Grenoble, 50 p.                                                                                                                                                                                                              |
| Häge K., Drebenstedt C. & Angelov E., 1996. Landscaping and ecology in the lignite mining area of Maritza-east, Bulgaria. Water, Air & Soil Pollution, 91 : 135-144.                                                                                                                                  |
| Haila Y. & Kouki J., 1994. The phenomenon of biodiversity in conservation biodiversity in conservation biology. Ann. Zool. Fenn., 31 : 5-18.                                                                                                                                                          |
| Halle S., 1993. Wood mice ( <i>Apodemus sylvaticus</i> ) as pioneers of recolonization in a reclaimed area. Oecologia, 94 : 120-127.                                                                                                                                                                  |
| Hannes G.P. & Hannes S.M., 1984. Plant succession and species diversity in the Marblehead quarry, Ohio (USA). Bull. Southern California Acad. Sci., 83 (2) : 90-98.                                                                                                                                   |
| Harris J.A., Birch P. & Palmer J.P., 1996. Land restoration and reclamation : principles and practice. Addison Wesley Longman, 227 p.                                                                                                                                                                 |
| Harvey H.J., 1982. Discussion. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 53-54.                                                                                                                                                                                              |
| Heckman J.R. & Cairns J., 1998. Ecosystem restoration : a new perspective for sustainable use of the planet. In : Rana B.C. (Eds.), Damaged ecosystems and restoration. World Scientific : 69-76.                                                                                                     |
| Hidvegi F., Les escarpements rocheux. Broch. Tech. N°5, Ministère de la région Wallonne.                                                                                                                                                                                                              |
| Higgs E.S., 1997. What is good ecological restoration ? Conservation Biology, 11 : 338-348.                                                                                                                                                                                                           |
| Hobbs R.J. & Norton D.A., 1996. Towards a conceptual framework for restoration ecology. Restoration Ecology, 4 : 93-110.                                                                                                                                                                              |
| Hodgson J.G., 1982. The botanical interest and value of quarries. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 3-11.                                                                                                                                                            |
| Holl K.D. & Cairns J., 1994. Vegetational community development on reclaimed coal surface mines in Virginia. Bull. Torrey Bot. Club, 121 (4) : 327-337.                                                                                                                                               |
| Holl, K.D., 1995. Nectar resources and their influence on butterfly communities on reclaimed coal surface mines. Restoration Ecology, 3 (2) : 76-85.                                                                                                                                                  |
| Humphrey C.L., Faith D.P. & Dostine P.L., 1995. Baseline requirements for assessment of mining impact using biological monitoring. Australian Journal of Ecology, 20 : 150-166.                                                                                                                       |
| Humphries R.N., 1979. Landscaping hard rock quarry faces. Landscape Design, 127 : 34-37.                                                                                                                                                                                                              |
| Humphries R.N., 1982. The establishment of vegetation on quarry materials : physical and chemical constraints. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 55-61.                                                                                                              |
| Huxel G.R. & Hastings A., 1999. Habitat loss, fragmentation and restoration. Restoration Ecology, 7 (3) : 309-315.                                                                                                                                                                                    |
| INRA Châlons-sur-Marne, 1984. Taxe parafiscale sur les granulats 33-13-26 : réintroduction paysagère sur un gradin de la carrière de St Tronc et sur un gradin et trois fronts de taille de la carrière du Redon (Marseille). UNICEM-PACA-COR, Délégation régionale aux actions granulats, 8 p.       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inventaire de la faune menacée de France (Livre rouge). WWF, MNHN, Nathan.                                                                                                                                                                                                                             |
| Ireland T.T., Wolters G.L. & Schemnitz S.D., 1994. Recolonization of wildlife on a coal strip-mine in northwestern New Mexico. <i>Southwestern Naturalist</i> , 39 (1) : 53-57.                                                                                                                        |
| Jacamon M., 1979. Guide de Dendrologie. ENGREF.                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Jahns, H.M. & Masselink A.K., 1996. Guide des fougères mousses et lichens d'Europe. Delachaux et Niestlé.                                                                                                                                                                                              |
| Jefferson R.G. & Usher M.B., 1986. Ecological succession and the evaluation of non-climax communities. In : Usher M.B. (Eds.), <i>Wildlife Conservation Evaluation</i> , Chapman and Hall Ltd, London : 69-91.                                                                                         |
| Jefferson R.G., 1984. Quarries and wildlife conservation in the Yorkshire Wolds, England. <i>Biological Conservation</i> , 29 : 363-380.                                                                                                                                                               |
| Jochimsen M.E.A., 1996. Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession. <i>Water, Air &amp; Soil Pollution</i> , 91 : 99-108.                                                                                                                                                        |
| Jochimsen M.E.A., 2001. Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil. <i>Ecological Engineering</i> , 17 : 187-198.                                                                                                                                 |
| Johnson C.D. & Skousen J.G., 1995. Minesoil properties of 15 abandoned mine land sites in west Virginia. <i>J. Env. Quality</i> , 24 : 635-643.                                                                                                                                                        |
| Johnson D.B., 1998. Biodiversity and ecology of acidophilic microorganisms. <i>Fems Microbiology Ecology</i> , 27 : 307-317.                                                                                                                                                                           |
| Juffard I., 1997. Les potentialités écologiques des carrières sèches (revue bibliographique). Rapport d'option. DESS «Espace Rural et Environnement», université de Bourgogne, 23 p. + annexes.                                                                                                        |
| Khan A.G., Kuek C. Chaudhry T.M. Khoo C.S. & Hayes W.J., 2000. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. <i>Chemosphere</i> , 41 : 197-207.                                                                                                         |
| Khater C., 1999. La végétation des talus autoroutiers : un passé pour quel futur ? Bilan d'une recolonisation en milieu méditerranéen. Univ. Aix-Marseille III, DEA Biosciences de l'Environnement et Santé, option milieux continentaux, 42 p. + annexes.                                             |
| Khater C., à paraître. Etude phytoécologique des carrières du Liban, analyse, typologie, proposition d'aménagement. Thèse de IIIème cycle, Laboratoire de botanique, Université de Montpellier.                                                                                                        |
| Kirmer A. & Mahn E.G., 2001. Spontaneous and initiated succession on unvegetated slopes in the abandoned lignite-mining area of Goitsche, Germany. <i>Applied Vegetation Science</i> , 4 : 19-27.                                                                                                      |
| Kjoss V.A. & Litvaitis J. A., 2001. Comparison of 2 methods to sample snake communities in early successional habitats. <i>Wildlife Society Bulletin</i> , 29 : 153-157.                                                                                                                               |
| Kovacs J.C., Dasnias P., Barande S. & Le Bloch F., 2001. Carrières et zones humides – Le patrimoine écologique des zones humides issues de l'exploitation des carrières. <i>Ecosphère</i> , Charte UNPG, MNHN, CNRS, Paris, 5 volumes.                                                                 |
| Kryuchkov V.V., 1993. Extreme anthropogenic loads and the northern ecosystem condition. <i>Ecological Applications</i> , 3 : 622-630.                                                                                                                                                                  |
| Ladet A. & Bauvet C., 2002. Le patrimoine naturel de la carrière Lafarge de Cruas. FRAPNA, Lafarge Ciments, 62 p.                                                                                                                                                                                      |
| Landres P.B., Verner J. & Thomas R.W., 1988. Ecological uses of vertebrate indicator species : a critique. <i>Conservation Biology</i> , 2 : 316-328.                                                                                                                                                  |
| Lanka V., Vit Z., Knotek J. & Knotek L., 1985. Reptiles et amphibiens. Gründ.                                                                                                                                                                                                                          |
| Lazard S.A., 2001. Commune de Manosque, lieu dit «Les Laurons» : dossier de demande d'exploitation de carrière. Lazard S.A., 60 p.                                                                                                                                                                     |
| Le Floc'h E. & Aronson J., 1995. Ecologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. <i>Natures-Sciences-Sociétés</i> , Hors-série 3 : 29-35.                                                                                                                                        |
| Le Floc'h E., Neffati M., Chaieb M., Floret C. & Pontanier R., 1999. Rehabilitation experiment at Menzel Habib, Southern Tunisia. <i>Arid Soil Research and Rehabilitation</i> , 13 : 357-368.                                                                                                         |
| Le Houérou H.N., 2000. Restoration and rehabilitation of arid and semi-arid mediterranean ecosystems in north Africa and west Asia : a review. <i>Arid Soil Research and Rehabilitation</i> , 14 : 3-14.                                                                                               |
| Le Roux C., 2002. La réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert. <i>Bois et forêts des tropiques</i> , 272 (2) : 5-20.                                                                                                                                                                        |
| Lebahy C., 1983. La réinsertion paysagère des carrières de roches massives par la revégétalisation. CEMAGREF, 100 p.                                                                                                                                                                                   |
| Lecointe A., 1979. <i>Southbya nigrella</i> (De Not.) Spruce, <i>Cephaloziella baumgartneri</i> Schiffn. et <i>Tortella inflexa</i> (Bruch) Broth., bryophytes nouvelles pour la Basse-Normandie, aux carrières d'Orival, près de Creully (Calvados). <i>Bull. Soc. Linn. Normandie</i> , 107 : 47-60. |
| Lecointe A., 1993. Exemple d'un arrêté de biotope sur les anciennes carrières d'Orival (Creully- Calvados). Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 83-86.                       |
| Lecointe A., Boudier P. & Hunault G., 1991. Première session bryologique de la Société Botanique du Centre Ouest : La Sarthe (9 au 13 juillet 1990). <i>Bull. Soc. Bot. Centre Ouest</i> , nouvelle série, tome 22 : 507-518.                                                                          |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lecomte J., Legay J.M., Barre V. & Berlan-Darqué M., 1995. Natures, Sciences, Sociétés. Recréer la nature. Colloque Natures Sciences et Sociétés. Services de la recherche du ministère de l'environnement, 92 p.                                                                                                       |
| Lecomte P., 2002. Aménagement du territoire et répartition de l'avifaune : l'exemple des carrières. <i>Alauda</i> , 70 (1) : 33-36.                                                                                                                                                                                     |
| Leduc J.P., 1979. Les carrières : potentiel de création et de reconquête des milieux naturels. <i>Le Granulat</i> , 14 : 1-12.                                                                                                                                                                                          |
| Lefeuvre J.C. & Barnaud G., 1988. Ecologie du paysage : mythe ou réalité ? <i>Bull. Ecologie</i> , 19 : 493-522.                                                                                                                                                                                                        |
| Lefeuvre J.C. & Leduc J.P., 1981. La reconquête des milieux naturels : faire revivre des carrières. <i>Annales des Mines</i> , Mars/Avril : 135-142.                                                                                                                                                                    |
| Lefeuvre J.C., 1990. De la protection de la nature à la gestion du patrimoine naturel. In : Jeudy H.P. (Eds.), <i>Patrimoine en folie</i> . Min. Cult. Comm., Coll. Ethnologie de la France, 5, Maisons des Sciences de l'Homme, 29-75.                                                                                 |
| Lefeuvre J.C., Derain J.M.N. & Horgnies M., 1979. Les carrières : potentiel de création et de reconquête des milieux naturels. <i>Le Granulat</i> , 14, 12 p.                                                                                                                                                           |
| Legrand A., 1994. La gestion des dépendances vertes routières, intérêts écologiques, paysagers et économiques. Ministère de l'Environnement, Direction de la Nature et des Paysages, Ministère de l'Equipeement des Transports et du Tourisme, Services d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 119 p.            |
| Lemoine G., 1999. Prise en compte des Calamites dans la requalification de friches industrielles dans le Nord-Pas-de-Calais. <i>Bull. Soc. Herp. France</i> , supplément, 91 : 6-7.                                                                                                                                     |
| Lemoine G., 2000. Les carrières des Plombs et des Peupliers: un écosystème spécifique, objet d'un aménagement adapté. <i>L'Orchidophile</i> , 144 : 244-248.                                                                                                                                                            |
| Lemoine G., 2002. Problématique de gestion et préservation des populations de crapauds calamites, et espèces associées, dans le département du Nord. Journée technique AFIE «Gestion et protection des amphibiens : de la connaissance à la prise en compte dans les aménagements», le 5 octobre 2001 à Grenoble, 12 p. |
| Lepart J. & Escarre J., 1983. Les successions végétales, mécanismes et modèles : analyse bibliographique. <i>Bull. Ecologie</i> , 14 (3) : 133-178.                                                                                                                                                                     |
| Lévy-Bruhl V. & Coquillard H., 1998. La gestion et la protection de l'espace en 36 fiches juridiques. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.                                                                                                                                                   |
| Livory A., 1999. L'ancienne carrière de Donville-les-Bains : Approche naturaliste. <i>L'Argiope</i> , 25 : 7-15.                                                                                                                                                                                                        |
| Livory A., Lepertel N., Brunet L., Guérard P. & Quinette J.-P., 2000. Carrière de Donville : nouvelles plantes et nouveaux insectes de valeur patrimoniale. <i>L'Argiope</i> , 30 : 13-15.                                                                                                                              |
| Loppi S. & Pirintsos S.A., 2000. Effect of dust on epiphytic lichen vegetation in the mediterranean area (Italy and Greece). <i>Israel Journal of Plant Sciences</i> , 48 : 91-95.                                                                                                                                      |
| Luken J., 1990. Directing ecological succession. Chapman & Hall, 251 p.                                                                                                                                                                                                                                                 |
| MacKay W.P., 1993. Succession of ant species (Hymenoptera : Formicidae) on low-level nuclear waste sites in northern New Mexico. <i>Sociobiology</i> , 23 (1) : 1-11.                                                                                                                                                   |
| Magnanon S. 1993. Liste rouge des espèces végétales rares et menacées du Massif armoricain. <i>E.R.I.C.A.</i> , 4 : 1-22.                                                                                                                                                                                               |
| Majer J.D., 1989. Animals in primary succession - The role of fauna in reclaimed lands. Cambridge University Press, Cambridge, 449 p.                                                                                                                                                                                   |
| Malaval C., 1997. Problématique de réaménagement des carrières de roches massives. UNPG, UNICEM, ENCEM, DESS de Génie Géologique Université Paris Sud, 80 p.                                                                                                                                                            |
| Marrs R.H. & Bradshaw A.D., 1993. Primary succession on man-made wastes : the importance of resource acquisition. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), <i>Primary succession on land</i> . Blackwell Scientific Publications : 221-248.                                                                                |
| Massé L., 1964. Recherches phytosociologiques et écologiques sur les lichens des schistes rouges cambriens des environs de Rennes (I.-et-V.). <i>Vegetatio</i> , 12 : 103-222.                                                                                                                                          |
| Matheson J.D. & Larson D.W., 1998. Influence of cliffs on bird community diversity. <i>Can. J. Zool.</i> , 76 : 278-287.                                                                                                                                                                                                |
| Maubert P., à paraître. L'intérêt floristique des anciennes carrières non réaménagées en Loir-et-Cher. In actes du colloques Jean-Marie Lorrain «Patrimoine en Loir-et-Cher». CDPA 41.                                                                                                                                  |
| Mazzolini S. & Ricciardi M., 1993. Primary succession on the cone of Vesuvius. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), <i>Primary succession on land</i> . Blackwell Scientific Publications : 101-112.                                                                                                                   |
| Mentis M.T., 1999. Diagnosis of the rehabilitation of opencast coal mines on the Highveld of South Africa. <i>South African Journal of Science</i> , 95 (5) : 210-215.                                                                                                                                                  |
| Meyer B., 1982. Permanence du <i>Cytisanthus horridus</i> (Vahl) Gams (= <i>Genista horrida</i> D.C.) à Couzon-au-Mont-d'Or. <i>Bull. Soc. Linn. de Lyon</i> , 51 (7) : 233.                                                                                                                                            |
| Miao Z. & Marrs R., 2000. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. <i>Journal of Environmental Management</i> , 59 : 205-215.                                                                                                                                          |
| Michener W., 1997. Quantitatively evaluating restoration «experiments». <i>Restoration Ecology</i> , 5 : 324-337.                                                                                                                                                                                                       |
| Miles J. & Walton D.W.H., 1993. <i>Primary succession on land</i> . Blackwell Science. 309 p.                                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Millarakis P. & Parent G.H., 1995. L'intérêt ptéridologique de la forêt de Morley (Meuse). Bulletin de la Société de Sciences Naturelles et d'Archéologie de Haute-Marne, 16 : 389-403.                                                                                                                                              |
| Montfort D., 2001. Signalement de Niphargus ladmiraulti Chevreux 1901 à Mauves-sur-Loire (Loire-Atlantique). Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France, 23 : 23-28.                                                                                                                                                                     |
| Mooney H., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E. & Schulze E.D., 1996. What we have learning about the ecosystem functioning of biodiversity. In : Mooney H., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E. & Schulze E.D. (Eds.), Functional role of biodiversity - A global perspective. SCOPE 55. SCOPE-ICSU-UNEP. John Wiley & Sons : 474-484. |
| Moore N.P., Kelly P.F., Lang F.A., Lynch J.M. & Langton S.D., 1997. The Peregrine Falco peregrinus in quarries : current status and factors influencing occupancy in the Republic of Ireland. Bird Study, 44 : 176-181.                                                                                                              |
| Morhain E., 1992. Carrière de la Chalandrue (Til-Châtel; Côte d'Or) : état initial de la faune et de la flore, propositions d'aménagement. Rapport DESS «Espace rural et environnement», Université de Bourgogne, 61 p + annexes.                                                                                                    |
| Morin E., 1993. La Chalandrue, réhabilitation d'une carrière. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 151-161.                                                                                                 |
| Moysan G., 1980. Nidification du Grand Corbeau (Corvus corax) dans l'intérieur du Léon. Ar Vran, 9 : 49-57.                                                                                                                                                                                                                          |
| Mulligan D.R., 1996. Environmental Management in the Australian Minerals and Energy Industries : Principles and Practices. University of New South Wales Press, Sidney.                                                                                                                                                              |
| Naveh Z., 1994. From biodiversity to ecodiversity : a landscape-ecology approach to conservation and restoration. Restoration Ecology, 2 : 180-189.                                                                                                                                                                                  |
| Nicolis G., 1991. Non linear dynamics, self-organisation and biological complexity. In : Solbrig, O.T. & Nicolis G. (Eds.), Perspectives on biological complexity. IUBS Monograph, No 6, Paris, IUBS : 7-50.                                                                                                                         |
| Noss R.F., 1990. Indicator of monitoring biodiversity : a hierarchical approach. Conservation Biology, 4 : 355-364.                                                                                                                                                                                                                  |
| Odent B. & Lansiair M., 1999. Remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation. Min. de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques.                                                                |
| Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 2002. Inventaire des milieux rupestres. ONCFS Lot, 247 p.                                                                                                                                                                                                                       |
| ONF (83) & BEPA, 1997. Carrière du Pont du Duc, étude d'impact, réorganisation de l'exploitation - Compléments à l'étude d'impact sur les principes de remise en état et du réaménagement du site. Morillon Corvol.                                                                                                                  |
| Organisation et Environnement, 1993a. Guide méthodologique d'aménagement des carrières calcaires en Lorraine. UNICEM-URPG Lorraine, 64 p.                                                                                                                                                                                            |
| Organisation et Environnement, 1993b. Guide prospectif, aménagement des carrières calcaires en Lorraine. UNICEM-URPG Lorraine, 51 p.                                                                                                                                                                                                 |
| ENCENM, 2001. Carrières de roche éruptive, Potentialités écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions, ENCENM & CNC - UNPG, 112 p.                                                                                                                                                                           |
| Palik B.J., Goebel P.C., Kirkman L.K. & West L., 2000. Using landscape hierarchies to guide restoration of disturbed ecosystems. Ecological Applications, 10 : 189-202.                                                                                                                                                              |
| Park D.G., 1982. Seedling demography in quarry habitats. Ecology of Quarries. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 32-40.                                                                                                                                                                                                   |
| Peresson J.P. & Grangé P., 2000. Réserve Naturelle Volontaire du Bois en Val, dossier scientifique. Ville de Charleville-Mézières (08000), CLIP de Haybes-sur-Meuse, 33 p.                                                                                                                                                           |
| Petit D., 1977. Les pelouses à Hieracium pilosella L. des terrils du nord de la France. Coll. Phytosoc. VI, Les pelouses sèches, Lille : 201-212.                                                                                                                                                                                    |
| Petit D., 1980. La végétation des terrils du nord de la France. Ecologie, phytosociologie, dynamisme. Thèse Doct. Etat, Univ. Sci. Tech. Lille, 250 p.                                                                                                                                                                               |
| Picaud F. & Petit D., 1998. Dynamique de recolonisation des anciennes haldes de mines d'uranium par les orthoptères. In : «Les insectes, bio-indicateurs de la qualité des milieux. Apport de l'entomologie à une politique de développement durable», Cahier n° 36 de l'AIDEC : 113-126.                                            |
| Picaud F., 1998. Succession écologique chez les insectes orthoptères : application aux haldes de mines. Thèse de l'Université de Limoges.                                                                                                                                                                                            |
| Pickett A., Kolasa J. & Jones C.G., 1994. Ecological understanding. The nature of theory and the theory of nature. Academic press, San Diego. 206 p.                                                                                                                                                                                 |
| Pickett S.T.A. & Parker V.T., 1994. Avoiding the old pitfalls : opportunities in a new discipline. Restoration Ecology, 2 : 75-79.                                                                                                                                                                                                   |
| Pietsch W.H.O., 1996. Recolonization and development of vegetation on mine spoils following brown coal mining in Lusatia. Water, Air and Soil Pollution, 91 : 1-15.                                                                                                                                                                  |
| Potentialités écologiques des carrières. Min. du redéploiement industriel et du commerce extérieur, Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats & Ministère de l'environnement, 28 pp.                                                                                                                                |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prach K. & Pysek P., 1994a. Clonal plants - What is their role in succession ? <i>Folia Geobot. Phytotax.</i> , Praha, 29 : 307-320.                                                                                                                                                                     |
| Prach K. & Pysek P., 1994b. Spontaneous establishment of woody plants in central european derelict sites and their potential for reclamation. <i>Restoration Ecology</i> , 2 : 190-197.                                                                                                                  |
| Prach K. & Pysek P., 2001. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats : experience from central Europe. <i>Ecological Engineering</i> , 17 : 55-62.                                                                                                                        |
| Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1993. On the rate of succession. <i>Oikos</i> , 66 (2) : 343-346.                                                                                                                                                                                                      |
| Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1997. Changes in species traits during succession : a search for pattern. <i>Oikos</i> , 79 (1) : 201-205.                                                                                                                                                             |
| Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1999. Prediction of vegetation succession in human disturbed habitats using an expert system. <i>Restoration Ecology</i> , 7 : 15-23.                                                                                                                                  |
| Provost M., 1993. Atlas de répartition des plantes vasculaires de Basse-Normandie. Presse Univ. Caen, 90 pp.                                                                                                                                                                                             |
| Quélennec T., 1998. Le Grand Corbeau en Bretagne. SEPNEB.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Quélennec T., 2001. Le Grand Corbeau <i>Corvus corax</i> en Bretagne. <i>Alauda</i> , 69 : 19-24.                                                                                                                                                                                                        |
| Ranson C.E. & Doody J.P., 1982. Quarries and nature conservation - Objectives and management. <i>Ecology of Quarries</i> . Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 20-26.                                                                                                                          |
| Ratcliffe D.A., 1974. Ecological effects of mineral exploitation in the United Kingdom and their significance to nature conservation. <i>Proceeding of the Royal Society of London, A</i> , 339 : 355-372.                                                                                               |
| Reading C.J., 1997. A proposed standard method for surveying reptiles on dry lowland heath. <i>Journal of Applied Ecology</i> , 34 : 1057-1069.                                                                                                                                                          |
| Repérages, 1997. Le paysage dans les projets de carrières - Guide méthodologique. DIREN Midi-Pyrénées.                                                                                                                                                                                                   |
| Riout J.P., Riout M. & Champion M.N., 2002. Compte-rendu de l'excursion de la Société Linnéenne de Normandie dans le Bessin, le 16 juin 2001. <i>Bull. Soc. Linn. Normandie</i> , 118 : 77-81.                                                                                                           |
| Robert J.C., Cretin J.Y. & Prouteau C., 1991. Typologie des carrières hors eau de Franche-Comté. Etude et recherche en Ecologie Comtoise. Les cahiers de l'environnement, 10, 86 p.                                                                                                                      |
| Robert J.C., Cretin J.Y. & Prouteau C., 1993. Proposition d'une écotypologie des carrières hors eau. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, «Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches» : 17-24.                                |
| Rocamora G. & Yeatman-Berthelot D, 1999. Oiseaux menacés et à surveiller en France. Listes rouges et recherche de priorités. Populations. Tendances. Menaces. Conservation. Société d'Etudes Ornithologiques de France / Ligue pour la Protection des Oiseaux. Paris. 560 pp.                            |
| Rocamora G. 1993. Les zones importantes pour la conservation des oiseaux en France. Min. Env., LPO.                                                                                                                                                                                                      |
| Rocheft L., 2000. New frontiers in bryology and lichenology - <i>Sphagnum</i> - A keystone genus in habitat restoration. <i>Bryologist</i> , 103 : 503-508.                                                                                                                                              |
| Royer J.M., 1977. Les pelouses sèches à thérophytes de Bourgogne et de Champagne méridionale. <i>Coll. Phytosoc.</i> VI, Les pelouses sèches, Lille : 133-145.                                                                                                                                           |
| Russell W.B. & La Roi G.H., 1986. Natural vegetation and ecology of abandoned coal-mined land, Rocky Mountain Foothills, Alberta, Canada. <i>Can. J. Bot.</i> , 64 : 1286-1298.                                                                                                                          |
| Sänger H., 1995. Flora and vegetation on dumps of uranium mining in the southern part of the former GDR. <i>Acta Soc. Bot. Pol.</i> , 64 : 409-418.                                                                                                                                                      |
| Saout M. & Tréhen P., 1984. Evaluation des potentialités écologiques des sites de carrières abandonnées en Bretagne. Station Biologique de Paimpont, Université de Rennes I, 63 p.                                                                                                                       |
| Sauveterre, 1985. Evaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique. Ministère de l'environnement, Ministère du redéploiement industriel et du commerce extérieur & Comité de la taxe parafiscale sur les granulats, 73 p. |
| Schneider N. & Wahis R., 1998. Contribution à la connaissance des Vespiformes des carrières du Grès de Luxembourg et notes additionnelles sur quelques Pompilides (Hymenoptera, Aculeata). <i>Archs Inst. G.-D. Luxemb. Sect. Sci. Nat. Phys. Math.</i> , NS 42 : 11-37.                                 |
| Schulz F. & Wiegand G., 2000. Development options of natural habitats in a post-mining landscape. <i>Land Degradation and Development</i> , 11 : 99-110.                                                                                                                                                 |
| Sengupta M., 1993. Environmental impacts of mining - Monitoring, restoration and control. Lewis, USA.                                                                                                                                                                                                    |
| SERAVERT, 1991. Société SCREG, carrière du Mas de Bonniol - La Boissière (34). Etude phyto-écologique et recommandations techniques de revégétalisation. SCREG, SERAVERT, 22 p.                                                                                                                          |
| Serryn, P., 1977. Atlas universel. Bordas.                                                                                                                                                                                                                                                               |
| SIEE, 1997. Extension d'une carrière de roches colluvionnaires et renouvellement d'autorisation, commune d'Eyguières, lieu-dit «Le Moulon de Blé», commune de Sénas, lieu dit «Bel Air» et «le Grand vallon». <i>Redland granulats</i> , 4 fasc.                                                         |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Silva B., Prieto B., Rivas T., Sanchez-Biezma M.J., Paz G. & Carballal R., 1997. Rapid biological colonization of a granitic building by lichens. <i>Int. Biodeterioration and Biodegradation</i> , 40 (2-4) : 263-267.                                                                                         |
| Sionneau J.M., 1987. Les potentialités écologiques des carrières. <i>Industries minérales, Mines et Carrières</i> , Avril : 2-10.                                                                                                                                                                               |
| Sionneau J.M., 1993. Les potentialités écologiques des carrières sèches. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, « Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches » : 25-34.                                                                 |
| Skotte Moller H., 1995. Nature restoration in the European Union. Proceedings of a seminar. Denmark 29-31 May 1995. Min. Environment and Energy. Copenhagen. 130 p.                                                                                                                                             |
| Skousen J.G., Johnson C.D. & Garbutt K., 1994. Natural revegetation of 15 abandoned mine land sites in west Virginia. <i>J. Env. Quality</i> , 23 : 1224-1230.                                                                                                                                                  |
| Smith R.I.L., 1993. The role of bryophyte propagule banks in primary succession : case study of an antartic fellfield soil. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), <i>Primary succession on land</i> . Blackwell Scientific Publications : 55-78.                                                                |
| Snazell R. & Clarke R., 2000. The restoration of an area of restored chalk downland by spiders (Araneae) <i>Ekological Bratislava</i> , 19 Suppl. 3 : 263-271.                                                                                                                                                  |
| Société Méridionale de Carrières, 1997. Demande d'autorisation au titre des installations classées avec étude d'impact, exploitation de carrières et installation de traitement, commune de Brignoles et Le Var (83), carrière «Tour Couroun». SOMECA.                                                          |
| Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group, 2002. The SER primer on ecological restoration, 9 p.                                                                                                                                                                                         |
| Somson P., 1984. Dynamique des pierriers et réponse adaptative des végétaux particulièrement dans les Pyrénées. <i>Ecologie des milieux montagnards et de haute altitude</i> , document d'écologie pyrénéenne, II-IV : 165-170.                                                                                 |
| Steffan-Dewenter I. & Tscharnkte T., 2001. Succession of bee communities on fallows. <i>Ecography</i> , 24 : 83-93.                                                                                                                                                                                             |
| Stott P.A., 1975. Sur l'importance phytogéographique de la flore microendémique des éboulis crayeux et calcaires dans le Nord de la France. <i>Documents phytosociologiques</i> , (9-14) : 245-246.                                                                                                             |
| Strong W.L., 2000. Vegetation development on reclaimed lands in the Coal Valley Mine of western Alberta, Canada. <i>Can. J. Bot.</i> , 78 : 110-118.                                                                                                                                                            |
| Sud Aménagement Agronomie, 1999. Carrière de Marseille, lieu-dit «Vallon de Toulouse» : demande d'autorisation d'exploitation. Ent. Perasso.                                                                                                                                                                    |
| Thievent P., 1993a. Aménagement écologique de la carrière de la Chalandrue (Til-Châtel) - Zone d'emprunt de l'autoroute A31. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, « Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches » : 135-141.           |
| Thievent P., 1993b. Un plan de carrière pour les abeilles : essai de typologie des carrières sèches à des fins de réaménagement apicole. Actes des journées techniques AFIE, 7-8 oct. 1993, « Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches » : 73-79. |
| Thinon M., 1984. Evaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique en région méditerranéenne calcaire. Université de Marseille, Laboratoire de Botanique et d'Ecologie Méditerranéenne, 120 p.                                    |
| Thomas H., 1992. Le réaménagement des carrières au travers de l'histoire de la société GSM. ENGREF, 280 p.                                                                                                                                                                                                      |
| Topp W., Simon M., Kautz G., Dworschak U., Nicolini F. & Prückner S., 2001. Soil fauna of a reclaimed lignite open-cast mine of the Rhineland : improvement of soil quality by surface pattern. <i>Ecological Engineering</i> , 17 : 307-322.                                                                   |
| TP Para Lucien, 1995. Commune de La Cluse en Dévoluy, lieu-dit «Dessous le Rocher», demande d'autorisation d'exploitation de carrière, étude d'impact.                                                                                                                                                          |
| Tucker G.M. & Heath M.F., 1994. Birds in Europe : their conservation status. BirdLife International. Cambridge. UK.                                                                                                                                                                                             |
| UEF & AIDEC, 1997. Les insectes bio-indicateurs de la qualité des milieux - Apport de l'entomologie à une politique de développement durable. Cahier n° 36 de l'AIDEC, 239 p.                                                                                                                                   |
| Union Européenne des Producteurs de Granulats, 2002. Remise des prix du troisième concours européen de réaménagement de carrières de granulats. Parlement européen, Bruxelles, mercredi 29 mai 2002. 48 p.                                                                                                      |
| Union Nationale des Producteurs de Granulats, 1979. Les carrières : Potentiel de création et de reconquête des milieux naturels. Journée d'études du 18 sept. 1979, UNPG.                                                                                                                                       |
| Urbanek R.P., 1989. The influence of fauna on plant productivity. In Majer J.D. (Eds.) : <i>Animals in primary succession - The role of fauna in reclaimed lands</i> . Cambridge University Press, Cambridge : 71-106.                                                                                          |
| Urbanska K.M., Webb N.R. & Edwards P.J., 1997. Restoration ecology and sustainable development. Cambridge University Press.                                                                                                                                                                                     |
| Ursic K.A., Kenkel N.C. & Larson D.W., 1997. Revegetation dynamics of cliff faces in abandoned limestone quarries. <i>Journal of Applied Ecology</i> , 34 : 289-303.                                                                                                                                            |
| Usher M.B. & Jefferson R.G., 1990. The concepts of colonisation and succession : their role in nature reserve management. <i>Biological Conservation</i> , 48 : 153-159.                                                                                                                                        |
| Usher M.B., 1979. Natural communities of plants and animals in disused quarries. <i>Journal of Environmental Management</i> , 8 : 223-236.                                                                                                                                                                      |



|                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Usher M.B., 1993. Primary succession on land : community development and wildlife conservation. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), Primary succession on land. Blackwell Scientific Publications : 283-293.                                                    |
| Van Andel J., Bakker J.P. & Grootjans A.P., 1993. Mechanisms of vegetation succession : a review of concepts and perspective. Acta Bot. Neerl., 42 : 413-433.                                                                                                     |
| Vanpeene-Bruhier S. & Delory I., 2000. Réaménagement agricole des carrières de granulats : proposition d'amélioration de leur qualité pour une utilisation agricole durable. Ingénieries EAT, 24 : 33-44.                                                         |
| Vanpeene-Bruhier S., 2002a. Réaménagement agricole des carrières de granulats. CEMAGREF Editions, Antony, 160 p.                                                                                                                                                  |
| Vanpeene-Bruhier S., 2002b. Recommandations pour un réaménagement forestier durable des carrières de granulats. Ingénieries EAT, 31 : 37-48.                                                                                                                      |
| Vanpeene-Bruhier S., 2003. Réaménagement forestier des carrières de granulats. CEMAGREF Editions, Antony, 319 p.                                                                                                                                                  |
| VICAT, 1998. Demande d'autorisation d'exploitation de carrière et d'implantation d'une installation de premier traitement, commune de Peille, lieux-dits «Santa Augusta» et «La Verna», Alpes-Maritimes. Société Vicat, 4 fasc.                                   |
| Vigne J.P., 1980. Etude de suivi écologique et paysager d'ouvrages soumis à étude d'impact : l'aménagement végétal de carrières à flanc de relief. Ministère de l'environnement et du cadre de la vie.                                                            |
| Vinay T., 1983. Evaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique. «Présentation des sites». Rapport MST «Aménagement et mise en valeur des régions», Université de Rennes I, 43 p. |
| Voeltzel D. & Paillat G., 2003. Carrières de roche éruptive - Potentialités écologiques et réaffectations. Typologie des habitats naturels. ENCEM & CNC - UNPG, 41 p.                                                                                             |
| Wali M.K., 1999. Ecological succession and the rehabilitation of disturbed terrestrial ecosystems. Plant and Soil, 213 : 195-220.                                                                                                                                 |
| Walton D.W.H., 1993. The effects of cryptogams on minerals substrates. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), Primary succession on land. Blackwell Scientific Publications : 33-53.                                                                               |
| Ward S.C., Koch J.M. & Ainsworth G.L., 1996. The effect of timing of rehabilitation procedures on the establishment of a Jarrah forest after bauxite mining. Restoration Ecology, 4 : 19-24.                                                                      |
| Wattez J.R., 1977. Groupements sabulicoles pionniers des carrières de la partie occidentale du nord de la France. Coll. Phytosoc. VI, Les pelouses sèches, Lille : 283-318.                                                                                       |
| Webb J.K. & Shine R., 2000. Paving the way for habitat restoration : can artificial rocks restore degraded habitats of endangered reptiles ? Biological Conservation, 92 : 93-99.                                                                                 |
| Western D., 1992. The biodiversity crisis : a challenge for biology. Oikos, 63 : 29-38.                                                                                                                                                                           |
| Wheater C.P., Cullen W.R. & Bell J.R., 2000. Spider communities as tools in monitoring reclaimed limestone quarry landforms. Landscape Ecology, 15 : 401-406.                                                                                                     |
| Whisenant S.G., 1999. Repairing damaged wildlands. A process-orientated, landscape-scale approach. Cambridge University Press.                                                                                                                                    |
| Wiegleb G. & Felinks B., 2001a. Predictability of early stages of primary succession in post-mining landscapes of lower Lusatia, Germany. Applied Vegetation Science, 4 : 5-18.                                                                                   |
| Wiegleb G. & Felinks B., 2001b. Primary succession in post-mining landscapes of Lower Lusatia - Chance or necessity. Ecological Engineering, 17 : 199-217.                                                                                                        |
| Williams D.D., Tavares-Cromar A., Coleman J.R., Kushner D.J. & Happey-Wood C.M., 1994. Colonization dynamics of algae in small artificial ponds. Can. J. Bot., 72 : 1654-1665.                                                                                    |
| Williams P., Biggs J., Corfield A., Fox G., Walker D. & Whitfield M., 1997. Designing new ponds for wildlife. British Wildlife, 8 : 137-150.                                                                                                                      |
| Young T.P., Chase J.M. & Huddleston R.T., 2001. Community succession and assembly. Comparing, contrasting and combining paradigms in the context of ecological restoration. Ecological Restoration, 19 : 5-18.                                                    |

## ANNEXE III - GLOSSAIRE

Ce glossaire a été établi d'après :

- 🌿 Delpech R., Dumé G. & Galmiche P., 1985. Typologie des stations forestières – Vocabulaire. IDF.
- 🌿 Encyclopedia Universalis – Dictionnaire de l'écologie, 2001. Albin Michel.
- 🌿 Le Petit Robert 2003 – Dictionnaire de la langue française.
- 🌿 Le dictionnaire Larousse 2003
- 🌿 Rameau J.C., Mansion D. & Dumé G., 1993. Flore forestière française, tome 2 : montagnes. IDF.
- 🌿 Touffet J., 1982. Dictionnaire essentiel d'écologie. Ouest-France.

### TERMES D'ÉCOLOGIE

|                                   |                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Accrue</b>                     | Événement dont l'occurrence se fait par vagues successives.                                                                                            |
| <b>Acidiphile</b>                 | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles acides (sols et eaux).                 |
| <b>Alliance</b>                   | Unité dans la classification des groupements* végétaux en phytosociologie*                                                                             |
| <b>Anémochore (plante)</b>        | Plante dont les semences sont disséminées par le vent.                                                                                                 |
| <b>Annuelle (plante - espèce)</b> | Plante dont la totalité du cycle de végétation dure moins d'un an et qui est donc invisible une partie de l'année.                                     |
| <b>Anthropique</b>                | Qualifie les phénomènes qui sont provoqués ou entretenus par l'action consciente ou inconsciente de l'homme.                                           |
| <b>Aulnaie</b>                    | Bois d'aulnes ou riche en aulnes.                                                                                                                      |
| <b>Avifaune</b>                   | Ensemble des espèces d'oiseaux dans un espace donné.                                                                                                   |
| <b>Bétulaie</b>                   | Bois de Bouleaux ou riche en Bouleau.                                                                                                                  |
| <b>Biocénose</b>                  | Ensemble des organismes vivants occupants un biotope* donné ; une biocénose et son biotope* constituent un écosystème*.                                |
| <b>Biogéographie</b>              | Etude de la répartition géographique des organismes vivants.                                                                                           |
| <b>Biotope</b>                    | Ensemble théorique des conditions physico-chimiques définissant un écosystème* donné.                                                                  |
| <b>Bryophytes</b>                 | Groupe de végétaux cryptogames chlorophylliens comprenant les mousses, les hépatiques et les sphaignes.                                                |
| <b>Calcicole</b>                  | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en calcium.                             |
| <b>Climax</b>                     | Etat d'un écosystème* (d'une succession*) ayant un stade d'équilibre relativement stable en dehors de toute intervention humaine. Notion controversée. |
| <b>Cortège (floristique...)</b>   | ensemble des espèces (végétales...) d'une station*, d'un site, d'une région géographique, etc.... suivant le contexte.                                 |
| <b>Diachronique (approche)</b>    | Qui consiste à suivre l'évolution de la végétation des carrières sur plusieurs années, voire décennies.                                                |
| <b>Ecologie (d'une espèce)</b>    | Rapports d'une espèce avec son milieu ; ensemble des conditions préférentielles de ce milieu dans lequel se rencontre cette espèce.                    |
| <b>Ecologie (sens large)</b>      | Science étudiant les interactions qui déterminent la distribution et l'abondance des organismes vivants.                                               |

|                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ecosystème</b>                                   | Système ouvert défini approximativement dans l'espace et dans le temps et modélisant l'ensemble des relations des êtres vivants (biocénose*) entre eux et des êtres vivants avec l'environnement physico-chimique (biotope*) ; le concept est opérationnel à des échelles très variables (e.g. forêt tropicale, mare temporaire, souche en décomposition...). |
| <b>Edaphique</b>                                    | Qui concerne les relations entre les êtres vivants et leur substrat* (sol principalement, vase, roche).                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Eutrophe</b>                                     | Riche en éléments nutritifs, généralement non ou faiblement acide, et permettant une forte activité biologique.                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Eutrophisation</b>                               | Processus d'enrichissement excessif d'un sol ou d'une eau par apport, en quantité importante, de substances (azote surtout, phosphore, potassium, etc.) modifiant profondément la nature des biocénoses* et le fonctionnement des écosystèmes*.                                                                                                               |
| <b>Formation végétale</b>                           | Type de végétation défini plus par sa physionomie que sa composition floristique (e.g. prairie*, roselière*, friche, lande*, etc....).                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Fourré</b>                                       | Jeune peuplement forestier composé de brins de moins de 2,50 m de haut, dense et difficilement pénétrable.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Frênaie</b>                                      | Bois de frênes ou riche en frênes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Friche</b>                                       | Formation végétale* se développant spontanément sur un terrain perturbé puis abandonné                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Granulométrie</b>                                | Description de la composition minérale d'un sol selon les classes de taille des particules.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Groupelement (végétal)<br/>Syn. phytocénose.</b> | Ensemble des végétaux différents qui constituent une unité de végétation relativement homogène en colonisant un même milieu.                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Habitat</b>                                      | Environnement physico-chimique et biologique dans lequel vit et se reproduit une espèce.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Héliophile</b>                                   | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui ne peut se développer complètement qu'en pleine lumière (contraire de sciaphile*).                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Hélophyte</b>                                    | Plante de vase dont les organes de renouvellement (rhizomes, etc.), se situent dans la vase (e.g. phragmite), et dont les organes végétatifs sont aériens et souvent dressés.                                                                                                                                                                                 |
| <b>Herbacé(e)</b>                                   | Qui à la consistance souple et tendre de l'herbe ; on oppose en général les plantes herbacées aux plantes ligneuses*.                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Hydrologie</b>                                   | Etude scientifique des eaux naturelles (nature, formation, propriétés physico-chimiques).                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Hygrocline</b>                                   | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant en conditions assez humides.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Hygrophile</b>                                   | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes ayant besoin de fortes quantités d'eau tout au long de son développement et croissant en conditions très humides (sol engorgé en permanence).                                                                                                                                                          |
| <b>Jonçaie</b>                                      | Formation* végétale sur sol humide, dominée par des joncs sociaux.                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Lande</b>                                        | Formation* végétale caractérisée par la dominance d'arbrisseaux sociaux (e.g. lande à bruyères, lande à ajoncs...).                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Ligneux(se)</b>                                  | Formé de bois ou ayant la consistance du bois ; on oppose généralement les espèces ligneuses (arbres, arbustes, arbrisseaux, sous-arbrisseaux) aux espèces herbacées*.                                                                                                                                                                                        |
| <b>Lithophyte</b>                                   | Plante de lithosol*.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Lithosol</b>                                     | Sol minéral très peu évolué ou constamment rajeuni par l'érosion.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Manteau</b>                                      | Végétation essentiellement arbustive située linéairement en lisière de forêt.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Marnage</b>                                      | Variation du niveau de l'eau (en général, phénomène intersaisonnier, mais parfois, artificiellement plus fréquent).                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Mésoacidiphile</b>                               | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH modérément acides (sols et eaux).                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Mésohygrophile</b>                               | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions hydriques intermédiaires entre mésophile* et hygrophile*.                                                                                                                                                                                                   |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mésophile</b>              | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions moyennes, en particulier d'humidité et de sécheresse.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Mésotrophe</b>             | Moyennement riche en éléments nutritifs, modérément acide et induisant une activité biologique moyenne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Mésoxérophile</b>          | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions hydriques intermédiaires entre mésophile* et xérophile (milieux secs notamment l'été).                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Métapopulation</b>         | Ensemble de sous-populations d'une espèce dont chacune occupe un îlot d'habitat favorable dans un paysage qui, par ailleurs, constitue un habitat défavorable à cette espèce. La sous-population peut avoir un effectif qui fluctue mais l'extinction locale peut être évitée par l'arrivée occasionnelle d'immigrants venant des îlots voisins de la métapopulation.<br>« Méta » est un préfixe signifiant supérieur (d'un point de vue abstrait). |
| <b>Mull</b>                   | Type d'humus, qui se forme à partir de débris végétaux peu ligneux* et riches en azote et se décompose très rapidement en raison d'une intense activité biologique. Le mull acide à un pH compris entre 4 et 5.                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Mycorhize(é)</b>           | Association symbiotique* du mycélium d'un champignon avec les racines de plantes supérieures (en particulier les arbres).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Neutroacidicline</b>       | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH moyennement acides à neutres (sols et eaux).                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Neutrophile</b>            | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH voisin de la neutralité (ni acides, ni basiques).                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Nitrophile</b>             | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant sur des sols riches en composés azotés.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Nodosité</b>               | Renflement sur la racine, qui contient des bactéries symbiotiques* fixatrices d'azote atmosphérique.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Oligotrophe</b>            | Très pauvre en éléments nutritifs et ne permettant qu'une activité biologique réduite.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Pédogenèse</b>             | Ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) qui régissent la formation et l'évolution des sols.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Pelouse</b>                | Formation* végétale basse, herbacée* et fermée, dominée par les graminées. Les pelouses se distinguent des prairies* par le fait qu'elles sont situées sur des sols superficiels plus pauvres en nutriments, ne permettant qu'un développement lent et progressif des ligneux*.                                                                                                                                                                     |
| <b>Perturbation</b>           | Événement aléatoire et brusque, d'origine diverse (forte crue, gel, sécheresse, destruction par l'Homme...).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Phytosociologie</b>        | Étude scientifique des tendances naturelles que manifestent des espèces végétales différentes à cohabiter ou au contraire à s'exclure ; étude des groupements* végétaux (ou phytocénoses) à l'aide de méthodes floristiques et statistiques, débouchant sur une classification.                                                                                                                                                                     |
| <b>Pionnier(ère)</b>          | Relatif à une espèce ou un ensemble d'espèces aptes à coloniser des terrains nus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Podzol (podzolisation)</b> | Type de sol dont l'évolution est provoquée par des processus chimiques (action d'acides organiques) qui s'ajoutent aux processus purement physique du lessivage. Ce sont des sols à humus acide et appauvri en argile.                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Population</b>             | Ensemble des individus appartenant à la même espèce vivant généralement dans des conditions de milieu homogènes, dans une région donnée, à un moment donné.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Prairie</b>                | Formation* végétale herbacée*, fermée et dense, dominée par les graminées et faisant l'objet d'une gestion agricole par fauche ou pâturage.                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Propagule</b>              | Organe assurant la multiplication en particulier végétative des plantes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Ranker</b>                 | Sol acide formé de roche mère cristalline, le plus souvent sous climat humide ou montagnard.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Rias</b>                   | Les rias sont des estuaires étroits et profonds.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Roselière</b>              | Peuplement dense de grandes plantes herbacées* (roseaux...) poussant dans des zones humides.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Rudéral(ale, aux)</b>      | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes caractéristiques de terrains fortement transformés par les activités humaines (décombres, jardins, friches industrielles, cultures...).                                                                                                                                                                                                                                                      |



|                             |                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rupestre</b>             | Relatif à un organisme se développant sur les rochers.                                                                                                                                                |
| <b>Rupicole</b>             | Se dit d'un organisme se développant sur des parois et falaises.                                                                                                                                      |
| <b>Sabulicole</b>           | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant dans le sable.                                                                                                                  |
| <b>Saprophage</b>           | Qualifie un organisme qui se nourrit de matières organiques en cours de décomposition (e.g. les champignons du sol).                                                                                  |
| <b>Saxicole</b>             | Se dit d'une espèce ou d'un groupement d'organismes se développant sur des rochers.                                                                                                                   |
| <b>Sciaphile</b>            | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes tolérant un ombrage important (contraire d'héliophile*).                                                                                       |
| <b>Silicicole</b>           | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en silice (conditions stationnelles généralement acides).                              |
| <b>Spontané</b>             | Se dit d'une espèce ou d'un groupement d'organismes se développant à l'état sauvage, naturellement, sans introduction par l'homme.                                                                    |
| <b>Station</b>              | 1- Etendue de terrain de superficie variable mais généralement modeste, où les conditions physiques et biologiques sont relativement homogènes.<br>2- Site où se développe un organisme donné.        |
| <b>Substrat</b>             | Support sur lequel vit un organisme ou un groupement* d'organismes.                                                                                                                                   |
| <b>Succession</b>           | Remplacements successifs des groupements d'organismes au cours du temps en lieu donné qui constituent une série évolutive progressive ou régressive.                                                  |
| <b>Symbiotique</b>          | Se dit d'une relation entre deux organismes dont chacun tire bénéfice.                                                                                                                                |
| <b>Synchrone (approche)</b> | Qui se fait par l'étude de plusieurs sites d'âge différents. La reconstitution de la végétation consiste à replacer les stades de végétation les uns après les autres en fonction de l'âge des sites. |
| <b>Taxon</b>                | Unité quelconque de la classification des organismes vivants (classe, ordre, famille, genre, espèce, sous espèce,...).                                                                                |
| <b>Thermophile</b>          | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui croît préférentiellement dans des sites chauds (et généralement ensoleillés).                                                              |
| <b>Tourbière</b>            | Etendue marécageuse dont le sol est exclusivement composé de matière organique végétale non totalement décomposée (tourbe).                                                                           |
| <b>Vivace</b>               | Plante dont le cycle de végétation dure plus de deux années.                                                                                                                                          |
| <b>Xérique</b>              | Qualifie un milieu très sec.                                                                                                                                                                          |
| <b>Xérophile</b>            | Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes s'accommodant de condition sèches permanentes.                                                                                                 |
| <b>Zoochorie</b>            | Mécanisme de dispersion des semences par les animaux.                                                                                                                                                 |

## TERMES LIÉS À L'EXPLOITATION DES CARRIÈRES

|                                |                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Banquette</b>               | Partie horizontale qui sépare deux fronts de taille*.                                                                                                                                     |
| <b>Carreau</b>                 | Partie de carrière horizontale formée par l'avancée progressive des fronts de taille* (localisée en fond de fosse).                                                                       |
| <b>Exhaure (eau d'exhaure)</b> | Epuisement par pompage des eaux pluviales et souterraines.                                                                                                                                |
| <b>Fronts de taille</b>        | Parois verticales de la carrière, obtenues par abattage de la roche par explosif (tir de mines).                                                                                          |
| <b>Gradin</b>                  | Partie de carrière constituée d'un front de taille* et de sa banquette*.                                                                                                                  |
| <b>Merlon</b>                  | Dépôt linéaire constitué de matériaux de découverte (terre végétale, roche altérée), généralement édifié dans un but de protection visuelle, auditive...                                  |
| <b>Pétitionnaire</b>           | Personne ou entité juridique signataire de la demande d'autorisation, en d'autre terme c'est le maître d'ouvrage exploitant la carrière                                                   |
| <b>Récolement</b>              | Vérification contradictoire entre l'exploitant et l'administration de l'exécution des clauses et conditions imposées (arrêté préfectoral d'autorisation), après l'exploitation d'un site. |
| <b>Régilage</b>                | Consiste à étaler les matériaux (terre végétale...) de manière relativement régulière sur un espace donné.                                                                                |
| <b>SN-ROC</b>                  | Syndicat National des Industries de Roches Ornamentales et de Construction                                                                                                                |
| <b>Sous-solage</b>             | Labour profond.                                                                                                                                                                           |
| <b>Stérile(s)</b>              | Matériaux minéraux non commercialisables.                                                                                                                                                 |
| <b>Terres de découverte</b>    | Matériaux superficiels (terre végétale et roche altérée) recouvrant la roche saine.                                                                                                       |
| <b>Terril</b>                  | Dépôt volumineux de matériaux stériles*.                                                                                                                                                  |
| <b>UNICEM</b>                  | Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction                                                                                                                  |
| <b>UNPG</b>                    | Union Nationale des Producteurs de Granulats                                                                                                                                              |