

Potentialités Ecologiques des carrières



CARRIÈRES

DE ROCHE CALCAIRE



calcaires

Analyse bibliographique et réflexions



Chambre Syndicale Nationale
des Fabricants de Chaux
Grasses et Magnésiennes



CHARTRE
ENVIRONNEMENT
des Industries de Carrières

Couverture :

Crédit dessin : Faucon pèlerin : Dubois P.J., Le Maréchal P., Olios G. & Yésou P., 2000. Inventaire des oiseaux de France - Avifaune de la France métropolitaine. Nathan
Schéma de carrière : <http://www.unicem.fr/lr/>

Crédit photographique : ENCEM, Frédéric Andrieu

LES POTENTIALITES ECOLOGIQUES DES CARRIERES CALCAIRES

- Etude bibliographique -

Ce travail a été financé et réalisé sous l'égide du Comité National de la Charte et 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

| Comité scientifique | |
|--------------------------------|--|
| Monsieur Bruno De FOUCAULT | Vice-président du Conseil Scientifique de l'Environnement Nord-Pas-de-Calais |
| Monsieur Bernard FROCHOT | Professeur émérite de l'université de Bourgogne |
| Madame Sylvie VANPEENE-BRUHIER | CEMAGREF - Grenoble |

| Comité de suivi | |
|-------------------------------|--|
| Madame Karine BOULOT | Morillon-Corvol Rhône-Méditerranée - RMC |
| Monsieur Eric CARENCO | Granulats Rhône-Alpes - VICAT |
| Monsieur Philippe GOUZE | UNICEM* Midi-Pyrénées |
| Monsieur Patrick LECOMTE | GSM Ouest - ITALCIMENTI |
| Monsieur Dominique A. SCHMITT | UNICEM* Rhône-Alpes |
| Monsieur Olivier VERDIER | ENCEM |

L'organisation, le suivi et la coordination de l'étude ont été pilotés par Eric Carencó (Géologue, GRA), Patrick Lecomte (Ecologue, GSM Ouest) et Dominique A. Schmitt (Secrétaire Général, UNICEM* Rhône-Alpes).

La réalisation a été confiée au bureau d'études ENCEM :

| | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|
| Madame Nathalie ANDRIEU | ENCEM – Montpellier | Synthèse, rédaction |
| Monsieur Frédéric ANDRIEU | ENCEM – Montpellier | Supervision |

PREAMBULE

L'humanité a utilisé les formidables ressources de la biodiversité terrestre depuis des centaines de siècles pour se nourrir, se vêtir ou encore se soigner. Son développement s'est fait grâce à l'exploitation, pas toujours optimale, de cette biodiversité.

Depuis quelques décennies seulement, une partie de l'humanité s'inquiète des conséquences de ses activités sur la diversité du vivant. Protection d'espèces, création de sanctuaires, réglementation des échanges d'espèces ou de patrimoines génétiques, voici quelques-unes des mesures prises en faveur d'une pérennisation, d'une conservation mais aussi d'une valorisation de la biodiversité. Car l'enjeu n'est pas seulement environnemental. La popularisation du concept de développement durable lors de la conférence de Rio en 1992 l'illustre de manière éclatante : économie, société et environnement sont étroitement liés et interdépendants.

Les carrières, qui exploitent la troisième ressource naturelle après l'air et l'eau, le savent bien et leur engagement en faveur de la biodiversité est ancien. Voici plus de vingt ans que des mesures concrètes d'aménagement pour la faune et la flore sont mises en œuvre sur des sites. Au-delà de ces actions d'entreprises, l'UNPG* a initié une démarche plus générale sur les patrimoines et potentiels écologiques des carrières. A partir du début des années 90, une étude d'envergure concerne les zones humides issues de carrières. Depuis l'année 2000, le même travail a débuté sur les roches éruptives. Enfin, 2002 a vu le démarrage d'une action similaire sur les roches calcaires, permettant à terme une connaissance de la biodiversité en carrière sur les principaux types de matériaux. Pour chaque sujet la démarche est la même : une phase préliminaire bibliographique permet de dresser l'état de connaissances et d'orienter les phases ultérieures. Des phases d'inventaires suivent : elles sont destinées à mettre en évidence le patrimoine biologique des carrières mais aussi leurs potentialités en la matière.

Comme pour l'ensemble des actions et études menées par l'UNPG*, ces trois volets s'accordent aux 4 objectifs suivants : répondre, connaître, former et communiquer.

Il nous faut répondre à des interrogations, qu'elles soient internes à la profession ou qu'elles viennent de nos partenaires scientifiques, associatifs ou administratifs. Atteindre cet objectif passe par la connaissance, donc la réalisation d'études par des organismes indépendants, sous le contrôle d'un comité scientifique composé d'experts dans le domaine. Cette connaissance débouche sur des pratiques concrètes, notamment pour ce qui concerne le réaménagement de carrières pendant et après leur exploitation. L'édition de documents de vulgarisation permet de former les acteurs sur le terrain et de partager les enseignements avec le plus grand nombre.

L'étude zones humides a ainsi abouti à l'édition d'un recueil des résultats largement diffusé ainsi qu'à la publication d'un guide pratique d'aménagement écologique des carrières en eau. L'étude sur les roches massives éruptives ainsi que celle qui suit donneront lieu à des publications similaires.

La logique de développement durable, à laquelle adhère l'UNPG*, plaide désormais pour une interdisciplinarité des études autour des objets « carrières ». Au-delà du thème de la biodiversité, l'économie et le social prennent pleinement leur place. La profession s'engage volontairement et volontiers dans cette approche nouvelle de notre monde mais ne perd pas de vue un élément fondamental : le développement durable de nos sociétés passe par la garantie de l'accès à la ressource minérale pour notre génération et les générations futures.

AVANT PROPOS

Une carrière est souvent perçue 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 : plantes, insectes, oiseaux... ne tardent pas à prospecter et 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.

Après exploitation, une carrière devient 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 au cours de son exploitation et après celle-ci. 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 20 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 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 ? Autant de questions qui se posent et qui ont en partie guidé la présente étude bibliographique sur les potentialités écologiques des carrières calcaires.

Les études précédentes menées par l'UNPG* sur les zones humides issues des carrières et les potentialités écologiques des carrières de roches éruptives l'ont montré : pour réussir un aménagement écologique, il est nécessaire d'être capable d'estimer les potentialités écologiques du site de carrière, de définir un ou des objectifs adaptés, de pratiquer les interventions techniques nécessaires, de présenter un programme de gestion et de suivi du site qui en garantisse la pérennité... Cela passe par l'anticipation de ces préoccupations dans le cadre du projet de carrière (connaissance du site, phasage d'exploitation, modalités de remise en état, coordination des travaux, communication, partenariat...).

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| PRESENTATION DE L'ETUDE | 13 |
| <hr/> | |
| PRESENTATION DES CARRIERES CALCAIRES | 15 |
| <hr/> | |
| 1. Les carrières calcaires en France | 15 |
| 2. Les modes d'exploitation d'une carrière calcaire | 18 |
| 3. Les différentes roches calcaires | 20 |
| 4. La réglementation relative aux carrières et à leur remise en état | 22 |
| | |
| LA DEMARCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 24 |
| <hr/> | |
| 1. La recherche bibliographique | 24 |
| 2. Présentation des documents | 26 |
| 3. Analyse critique de la bibliographie | 27 |
| 4. Liste bibliographique | 29 |
| | |
| L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE | 44 |
| <hr/> | |
| Partie 1 : L'écologie des carrières calcaires | 45 |
| 1.1. Notions d'écologie fondamentale adaptées aux carrières | 45 |
| 1.2. Trajectoire écologique d'une carrière calcaire | 47 |
| 1.2.1. Une colonisation rapide | 47 |
| 1.2.2. Les successions écologiques observées | 48 |
| 1.2.3. Les vitesses d'évolution | 58 |
| 1.2.4. Autres dynamiques écologiques | 60 |
| 1.2.5. Les limitations | 63 |
| 1.2.6. Le rôle des perturbations | 63 |
| | |
| Partie 2 : La flore et la faune des carrières calcaires | 65 |
| 2.1 Les habitats des carrières calcaires | 65 |
| 2.1.1. Les formations végétales | 65 |
| 2.1.2. Les habitats floristiques remarquables | 67 |
| 2.2. La flore des carrières calcaires | 68 |
| 2.2.1. Les végétaux non vasculaires et les organismes fongiques | 68 |
| 2.2.2. Les végétaux vasculaires | 69 |
| 2.3. La faune des carrières calcaires | 74 |
| 2.3.1. Les invertébrés | 74 |
| 2.3.2. Les batraciens | 76 |
| 2.3.3. Les reptiles | 78 |
| 2.3.4. Les oiseaux | 79 |
| 2.3.5. Les mammifères | 83 |
| 2.3.6. Analyse générale | 85 |
| | |
| Partie 3 : Les facteurs de la diversité écologique des carrières calcaires | 87 |
| 3.1. Origine du potentiel écologique des carrières calcaires | 87 |
| 3.2. Les facteurs de variabilité des carrières calcaires | 89 |
| 3.2.1. Facteurs climatiques | 90 |
| 3.2.2. Facteur « superficie de la carrière » | 91 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.3. Facteur « granulométrie et nature du substrat » | 92 |
| 3.2.4. Facteur « environnement de la carrière » | 93 |
| 3.2.5. Facteur « âge de la carrière » | 94 |
| 3.2.6. Facteur « sinuosité de la carrière » | 95 |
| 3.2.7. Facteur « modalités d'exploitation » | 95 |
| 3.2.8. Facteur « fréquentation humaine, pression anthropique » | 95 |
| 3.2.9. Facteur « région biogéographique » | 96 |
| 3.3. Ce qui les distingue des autres carrières | 97 |
| Partie 4 : Le réaménagement écologique des carrières calcaires | 99 |
| 4.1. Etude d'un exemple et principes de la réaffectation écologique | 99 |
| 4.1.1. Exemple de la Chalandrue | 99 |
| 4.1.2. Principes de réaffectation écologique | 101 |
| 4.2. Définition de l'objectif | 102 |
| 4.3. Une organisation administrative, économique et foncière nécessaire | 103 |
| 4.4. Les principes d' interventions | 105 |
| 4.4.1. Le traitement du front de taille | 105 |
| 4.4.2. Le traitement du carreau | 105 |
| 4.4.3. L'orientation des pentes de talus et merlons | 109 |
| 4.4.4. Le traitement des puits | 110 |
| 4.4.5. L'accès au site | 110 |
| 4.5. L'entretien, la gestion et le suivi scientifique | 111 |
| 4.5.1. Le suivi scientifique | 111 |
| 4.5.2. L'entretien et la gestion du site | 111 |
| 4.5.3. L'évaluation des coûts | 113 |
| PROPOSITION D'INVESTIGATIONS : COMMENT ABORDER LA PHASE TERRAIN ? | 115 |
| 1. La sélection des sites à expertiser | 115 |
| 1.1. L'approche menée sur le Massif armoricain | 115 |
| 1.2. La démarche proposée de sélection des sites | 116 |
| 2. L'établissement d'une typologie des milieux pour identifier les biocénoses potentielles | 116 |
| 3. La mesure de la valeur écologique d'un site | 118 |
| 3.1. Approche multicritères | 118 |
| 3.2. Approche multicritères simplifiée | 118 |
| 3.3. Approche par les bio-indicateurs | 123 |
| 4. Quel potentiel écologique mettre en valeur ? | 127 |
| CONCLUSION | 128 |
| GLOSSAIRE | 130 |
| ANNEXE : LISTE BIBLIOGRAPHIQUE THEMATIQUE | 133 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figure n° 1 | : Les quatre zones biogéographiques françaises..... | 14 |
| Figure n° 2 | : Principaux affleurements du substrat calcaire en France | 17 |
| Figure n° 3 | : Productions dominantes de granulats | 18 |
| Figure n° 4 | : Les quatre modes d'exploitation des roches calcaires..... | 19 |
| Figure n° 5 | : Exemple de schéma d'une carrière en exploitation..... | 21 |
| Figure n° 6 | : Répartition des références par années | 25 |
| Figure n° 7 | : Origine géographique des références | 26 |
| Figure n° 8 | : Répartition géographique des études de cas décrites dans la bibliographie | 28 |
| Figure n° 9 | : Dynamique écologique d'une carrière en cours de « renaturation » | 49 |
| Figure n° 10 | : Stades pionniers sur sables calcaires..... | 50 |
| Figure n° 11 | : Formation d'un sol..... | 51 |
| Figure n° 12 | : Succession végétale observée en fond de carrière de craie du nord de la France..... | 51 |
| Figure n° 13 | : Schémas des successions des anciennes carrières de roche massive de Bourgogne | 52 |
| Figure n° 14 | : Succession végétale observée sur roche calcaire massive de Bourgogne | 53 |
| Figure n° 15 | : Illustration de l'influence de la fracturation du substrat..... | 53 |
| Figure n° 16 | : Modèles de dynamique spatiale de la reconquête végétale des carrières de roche massive..... | 56 |
| Figure n° 17 | : Modèle de la diversité insectes / végétation..... | 57 |
| Figure n° 18 | : Evolution théorique de l'avifaune d'une carrière de roche massive de l'est de la France..... | 59 |
| Figure n° 19 | : Rythme de colonisation d'une carrière abandonnée..... | 60 |
| Figure n° 20 | : Interprétation du référentiel floristique dans un modèle statistique de la dynamique successionnelle de la végétation | 61 |
| Figure n° 21 | : Quelques exemples de colonisation en carrière calcaire | 62 |
| Figure n° 22 | : Evolution et régression : un équilibre fragile du milieu..... | 63 |
| Figure n° 23 | : Colonisation naturelle de la carrière Faucouzy (02)..... | 66 |
| Figure n° 24 | : Exemple d'une pelouse sèche à Brome érigé en carrière | 68 |
| Figure n° 25 | : Sisymbre couché (<i>Sisymbrium supinum</i>) | 71 |
| Figure n° 26 | : Quelques orchidées relevées en carrières calcaires | 73 |
| Figure n° 27 | : Quelques batraciens cités en carrières calcaires et leur biotope | 77 |
| Figure n° 28 | : Reptiles cités en carrières calcaires..... | 79 |
| Figure n° 29 | : Quelques oiseaux cités en carrières calcaires..... | 80 |
| Figure n° 30 | : Chauves-souris citées dans les carrières souterraines calcaires..... | 84 |
| Figure n° 31 | : Oseille à feuilles rondes (<i>Rumex scutatus</i>)..... | 88 |
| Figure n° 32 | : Evolution de la température dans différents habitats d'une carrière | 91 |
| Figure n° 33 | : Nombre d'espèces de plantes vasculaires en fonction de la taille de la carrière | 92 |
| Figure n° 34 | : Un réaménagement exemplaire ? La Chalandrue, autoroute A31 (Côte-d'Or)..... | 100 |
| Figure n° 35 | : Vocabulaire de la renaturation | 101 |
| Figure n° 36 | : Un modèle pour la réaffectation écologique | 104 |
| Figure n° 37 | : Exemple de traitement des fronts de taille | 105 |
| Figure n° 38 | : Reconstitution d'un sol pour un objectif productif (sylvicole)..... | 106 |
| Figure n° 39 | : Comparaison d'un aménagement « camouflage » et d'un aménagement écologique | 108 |
| Figure n° 40 | : Exemple de traitement des pentes selon leur exposition | 109 |
| Figure n° 41 | : Exemple de valorisation des terrils, merlons et éboulis | 110 |
| Figure n° 42 | : Exemple d'aménagement d'une entrée de site | 110 |
| Figure n° 43 | : Approche multicritères simplifiée | 119 |
| Figure n° 44 | : Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises | 120 |
| Figure n° 45 | : Exemple de fiche typologique de cotation des carrières calcaires francomtoises | 121 |
| Figure n° 46 | : Méthode d'évaluation de la valeur écologique des terrils | 124 |
| Figure n° 47 | : Méthode d'échantillonnage pour des relevés botaniques..... | 124 |
| Figure n° 48 | : Les étapes d'un diagnostic écologique sur le terrain..... | 126 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau n° 1 : Composition de la production de l'activité carrière en 2002..... | 15 |
| Tableau n° 2 : Productions régionales de matériaux calcaires..... | 17 |
| Tableau n° 3 : Nomenclature chimique des roches carbonatées..... | 22 |
| Tableau n° 4 : Répartition de la bibliographie relative à l'écologie des carrières calcaires selon les sujets abordés | 27 |
| Tableau n° 5 : Richesse floristique et faunistique en Europe et en France métropolitaine..... | 46 |
| Tableau n° 6 : Evolution de la population de batraciens et reptiles dans une mine de lignite du nord-est de l'Espagne. 58 | |
| Tableau n° 7 : Nombres d'invertébrés mentionnés dans les carrières calcaires..... | 75 |
| Tableau n° 8 : Synthèse des potentialités biologiques des carrières calcaires | 86 |
| Tableau n° 9 : Les éléments principaux des successions primaires sur terrain dégradé et les différentes façons de les assister | 112 |
| Tableau n° 10: Liste des descripteurs pour une typologie des habitats naturels | 117 |
| Tableau n° 11: Comparaison de bio-indicateurs..... | 122 |

PRESENTATION DE L'ETUDE

La remise en état des carrières de roches massives est une préoccupation grandissante des administrations comme d'autres publics avertis ou non (riverains, environnementalistes). La valorisation écologique des sites constitue une voie intéressante et nouvelle. Compte tenu de la régression des milieux naturels remarquables, cette option peut contribuer à restaurer et à préserver une biodiversité concurrencée par d'autres usages des sols.

Il s'ensuit une demande croissante relative aux modalités d'aménagement propres à valoriser le potentiel écologique des carrières.

L'étude des potentialités écologiques pourra permettre :

- de valider des expériences et des observations pour imaginer et créer des aménagements les plus appropriés ;
- d'asseoir la démarche qu'il apparaît nécessaire de définir en amont des projets et de définir les moyens techniques d'exploitation pour atteindre les objectifs recherchés ;
- de mieux satisfaire dans le contenu des études d'impact aux volets « mesures compensatoires » et « projet d'aménagement » tout en argumentant la contribution des industries extractives au maintien de la biodiversité ;
- de définir la méthodologie des inventaires écologiques de la phase suivante.

L'encadrement de l'étude est organisé en une maîtrise d'ouvrage, assurée par le Comité national de la Charte Professionnelle de l'Industrie des Granulats, auquel sont associés des Comités régionaux de Charte, et une maîtrise d'œuvre, assurée par un Comité de pilotage, un Comité scientifique et un prestataire.

La lecture puis **l'analyse des données bibliographiques**, objet du présent dossier, seront suivies d'une phase d'inventaires écologiques sur des sites répartis sur la France, puis d'une restitution des résultats avec conception d'un cahier technique à l'attention des professionnels exploitants de carrière.

Le présent document traite des **carrières calcaires hors d'eau**, les autres types de carrières ayant déjà fait l'objet d'études similaires :

- les carrières alluviales, Charte UNPG*/ECOSPHERE (Kovacs et al., 2001) ;
- les carrières de roches massives siliceuses du Massif armoricain, Charte UNPG* Pays-de-Loire, Bretagne, Normandie ; ENCEM ; Ouest-Aménagement (Paillat, 2001). Cette étude, actuellement en cours, est dans sa phase d'inventaire de terrain.

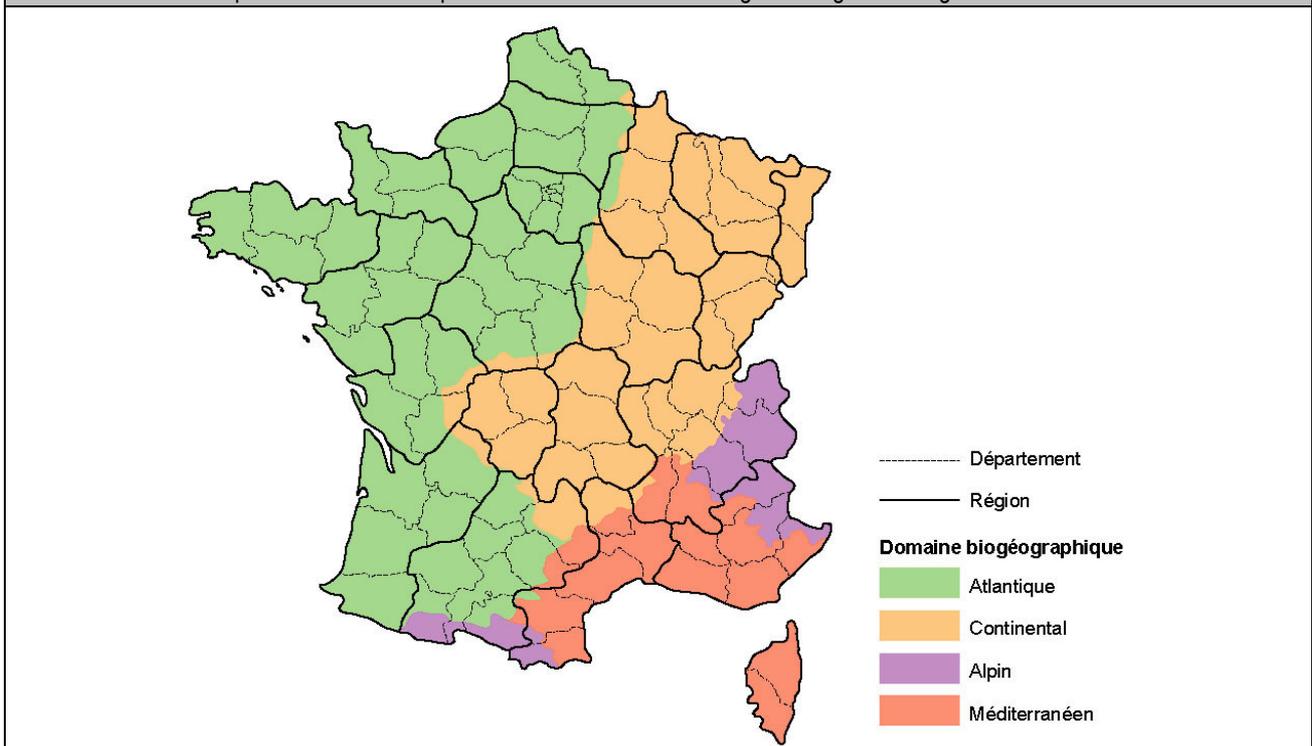
Les **objectifs** de l'étude bibliographique sont de :

- mettre en évidence les potentialités écologiques des carrières calcaires ;
- comprendre le fonctionnement des écosystèmes qui s'y installent et ce qui les favorise ;
- compléter les connaissances déjà acquises sur ce thème pour les carrières de zones humides (gravières en eau) et celles des roches massives siliceuses du Massif armoricain.

Le **périmètre de l'étude** couvre toutes les zones de la France où affleurent des substrats de nature calcaire. Celles-ci se répartissent selon les **quatre** zones biogéographiques* : continentale, atlantique, alpine et méditerranéenne (Figure n° 1). Sur un total de 6 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 n° 1 : Les quatre zones biogéographiques françaises

D'après site internet : <http://natura2000.environnement.gouv.fr/regions/idxreg.html#carto>



PRESENTATION DES CARRIERES CALCAIRES

Avant de présenter les résultats de cette première phase, il semble important de caractériser les carrières calcaires selon trois axes :

- le poids économique ;
- le mode d'exploitation ;
- la géologie.

Cette caractérisation est suivie d'un rappel de la réglementation concernant particulièrement la remise en état, qui est au cœur de la démarche initiée dans cette étude.

1. Les carrières calcaires en France

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 représentent en France une occupation cumulée de l'espace d'environ 2 000 km² (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 7 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 n° 1). Les matériaux de nature calcaire y jouent un rôle important.

| Tableau n° 1 : Composition de la production de l'activité carrière en 2002 | | |
|--|------------------------------|--------------|
| Source : UNICEM* / SESSI | | |
| GRANULATS | | |
| Roches massives calcaires | 99 000 000 t | 25 % |
| Roches massives éruptives et métamorphiques | 116 000 000 t | 29 % |
| Roches meubles (alluvionnaire, marin, autres) | 168 000 000 t | 42 % |
| Recyclage | 18 000 000 t | 4 % |
| Total | 401 000 000 t | 100 % |
| MATERIAUX POUR L'INDUSTRIE | | |
| Roches de nature calcaire | 19 400 000 t | 91 % |
| Roches d'autres natures (galets, pouzzolane...) - valeur estimée en raison du secret statistique | 2 000 000 t | 9 % |
| Total | 21 400 000 t | 100 % |
| PIERRE DE TAILLE | | |
| Roche calcaire | 400 000 m ³ | 67 % |
| Roches autres (granites, grès, schistes...) | 200 000 m ³ | 33 % |
| Total | 600 000 m³ | 100 % |

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 415 millions de tonnes en 2001 et 401 millions de tonnes en 2002. Ces matériaux sont produits par 1 810 entreprises sur 4 000 sites, avec une tendance progressive à la réduction du nombre de carrières (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...).

Les calcaires utilisés pour cette production sont de diverses natures, compacts, bioclastiques, dolomitiques, oolithiques... En 2002 ils représentaient **1/4 de la production nationale de granulats** (un peu plus d'un quart provenant des roches éruptives et les 2/5 restant des gisements alluvionnaires). La part des roches calcaires **augmente**, ces dernières années, **de 1% par an**.

LES MATERIAUX DESTINES A L'INDUSTRIE représentent une production environ 20 fois plus faible que celle des granulats avec un peu plus de 21 millions de tonnes produites en 2002. Les matériaux d'origine calcaire y jouent également un rôle majeur assurant près des **90 % des besoins**. Ce sont des gisements particuliers, recherchés pour leur richesse voire leur pureté en carbonate (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.

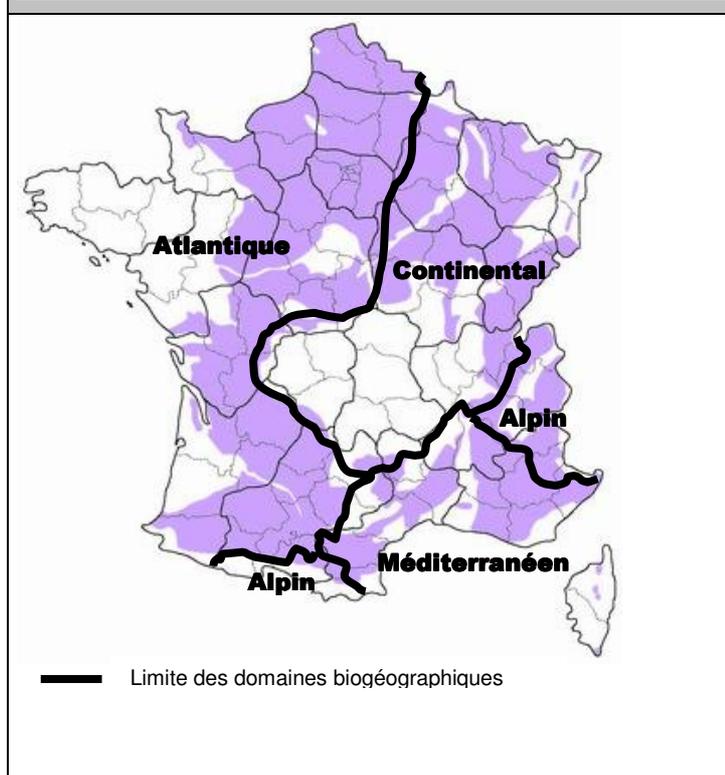
LA PIERRE DE TAILLE est l'activité la moins importante, mais elle se rapporte au mode le plus ancien de valorisation de la pierre. Son implication est forte dans la construction, en particulier la rénovation, la production de dalles et d'objets divers, la sculpture, la décoration. Elle fait vivre plus de 930 entreprises sur de nombreux sites (statistiques SN-ROC*). Pour 2002 la production se monte à environ 580 000 m³, dont les **2/3 sont d'origine calcaire**. Les roches utilisées sont variées : calcaires compacts, récifaux ou bioclastiques, oolithiques...

Tableau n° 2 : Productions régionales de matériaux calcaires

Source : UNICEM* / UNPG* / SN-ROC

Le pourcentage est exprimé par rapport à la production totale d'origine calcaire.

| GRANULATS | | | PIERRE DE TAILLE | |
|----------------------------|-----------------|--------|----------------------------|--------|
| Provence-Alpes-Côte-d'Azur | 15 614 000 t/an | 14,8 % | Bourgogne Franche-Comté | 24,3 % |
| Languedoc-Roussillon | 13 549 000 t/an | 12,9 % | Languedoc-Roussillon | 17,2 % |
| Franche-Comté | 11 322 000 t/an | 10,8 % | Provence-Alpes-Côte-d'Azur | 16,1 % |
| Nord-Pas-de-Calais | 9 828 000 t/an | 9,3 % | Poitou-Charentes | 15,0 % |
| Midi-Pyrénées | 8 095 000 t/an | 7,7 % | Picardie | 9,7 % |
| Aquitaine | 7 698 000 t/an | 7,3 % | Autres régions | 17,7 % |
| Centre | 7 241 000 t/an | 6,9 % | | |
| Rhône-Alpes | 6 510 000 t/an | 6,2 % | | |
| Poitou-Charentes | 6 362 000 t/an | 6,0 % | | |
| Bourgogne | 4 794 000 t/an | 4,6 % | | |
| Champagne-Ardenne | 4 665 000 t/an | 4,4 % | | |
| Lorraine | 3 886 000 t/an | 3,7 % | | |
| Ile-de-France | 2 168 000 t/an | 2,1 % | | |
| Pays-de-Loire | 1 730 000 t/an | 1,6 % | | |
| Picardie | 543 000 t/an | 0,5 % | | |
| Limousin | 530 000 t/an | 0,5 % | | |
| Alsace | 320 000 t/an | 0,3 % | | |
| Basse-Normandie | 303 000 t/an | 0,3 % | | |
| Haute-Normandie | 209 000 t/an | 0,2 % | | |
| Auvergne | 36 000 t/an | 0,0 % | | |
| Corse, Bretagne | - | 0,0 % | | |

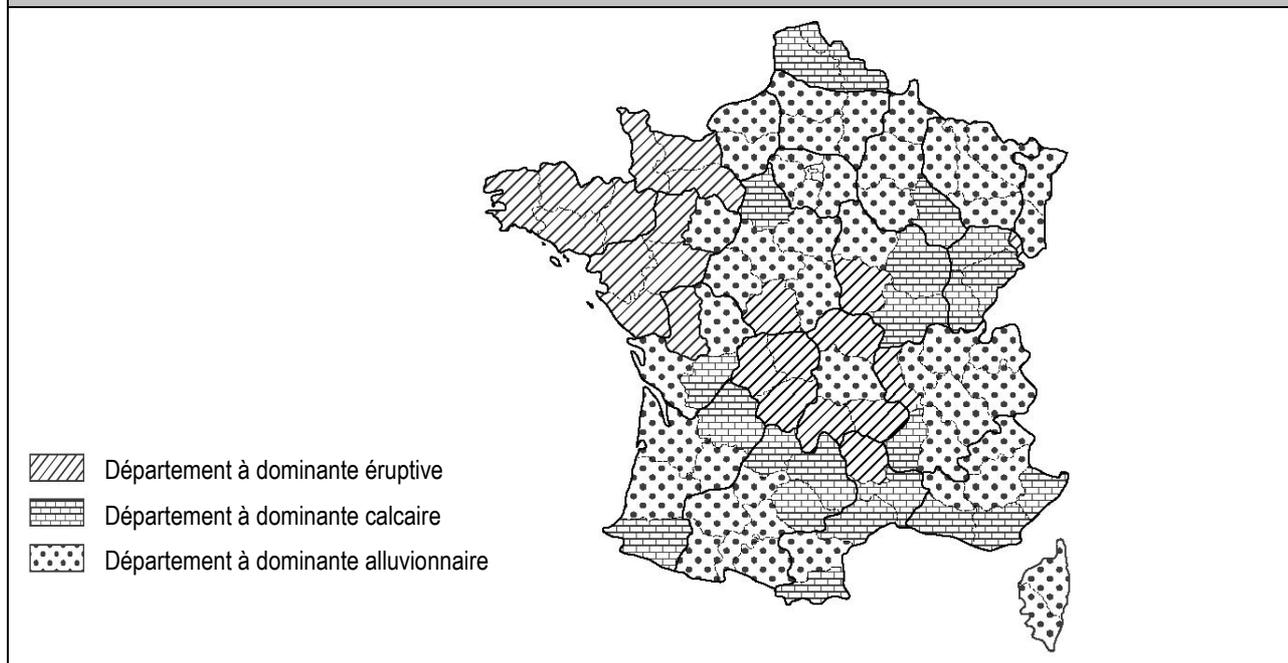
Figure n° 2 : Principaux affleurements du substrat calcaire en France

Le détail des productions régionales de roches massives calcaires en France est donné par le Tableau n° 2, la Figure n° 2 et la Figure n° 3. Les principales régions sont situées sur le pourtour méditerranéen (Provence-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon), le Nord (Nord-Pas-de-Calais), l'Est (Franche-Comté, Bourgogne, Lorraine, Champagne-Ardenne) et l'Ouest (Poitou-Charentes et Centre). Les départements les plus productifs sont les Bouches-du-Rhône et l'Hérault (pour plus de 6 millions de tonnes chacun), le Nord, le Doubs, le Var et le Pas-de-Calais (près de 5 millions de tonnes chacun).

Certaines régions, au sol pourtant calcaire, sont peu productives en raison de matériaux de qualité moindre, de caractéristiques particulières, de contraintes géographiques. La part des alluvionnaires y est prédominante : Champagne crayeuse, Aquitaine, Picardie, Haute-Normandie...

Figure n° 3 : Productions dominantes de granulats

D'après les statistiques UNICEM* / UNPG*

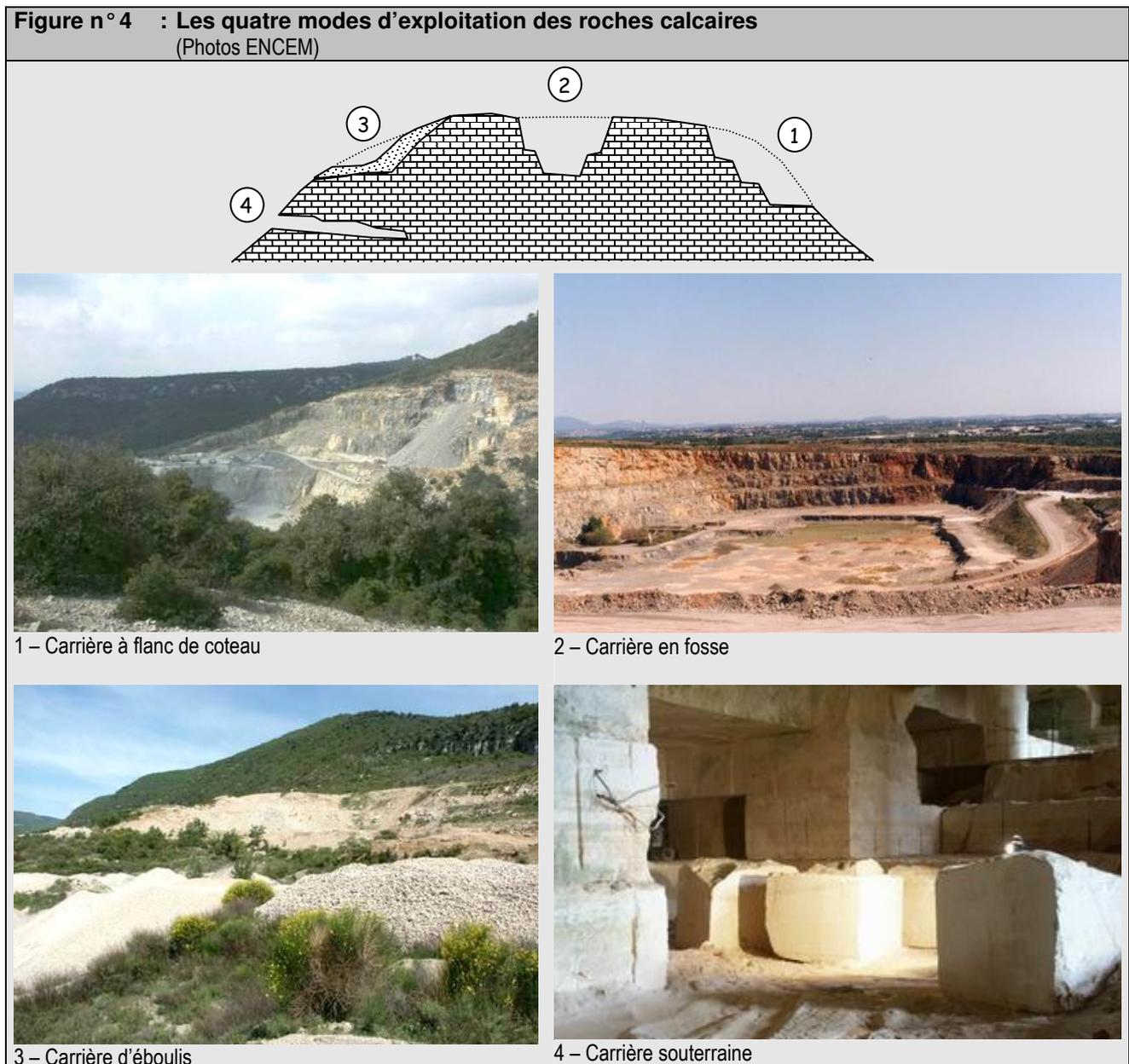


2. Les modes d'exploitation d'une carrière calcaire

En roches calcaires, il peut être distingué quatre modes d'exploitation (Figure n° 4), alors qu'en roches éruptives, il en est cité classiquement deux (Paillat, 2001) :

1. *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 ;
2. *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. Elle peut atteindre une nappe phréatique, nécessitant le pompage pour poursuivre l'exploitation ;
3. *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 glaciaire et concernent un matériau meuble ;
4. *la carrière souterraine* : elle exploite un gisement par creusement de galeries et avancée progressive. Il s'agit d'exploitation de pierre de taille dans la majorité de cas, de gypse pour la fabrication de plâtre (en Ile-de-France, Lorraine...), plus rarement de calcaire marneux pour l'industrie cimentière (Isère).

Des situations mixtes existent entre les deux premiers types. A 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.



Les deux derniers modes décrits précédemment sont peu ou prou spécifiques aux gisements de roches calcaires.

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 charbons). Lorsqu'elle s'enfonçe dans un coteau, sous une épaisse couche de matériaux stériles, l'extraction en souterrain s'impose alors, dans la mesure où les couches supérieures offrent une cohésion satisfaisant pour garantir la stabilité de l'ensemble (présence d'autres roches calcaires par exemple). Cette pratique prend toute sa dimension dans les régions de plaines. Les roches éruptives n'offrent pas une telle disposition, elles affleurent ordinairement en massifs largement affleurant. Leur exploitation en souterrain ne s'impose donc pas comme une nécessité, même pour des roches particulière.

Les *gisements d'éboulis naturels* sont hérités pour la plupart d'entre eux des périodes glaciaires. Face au phénomène de gélifraction, les roches calcaires sont plus sensibles que les roches éruptives. Elles se désagrègent en blocs, rocailles et cailloux entraînant la formation de vastes éboulis en pied de falaises 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 (Figure n° 5).

Les exploitations de roches calcaires en eau (carrières en fosse) nécessitent le pompage pour le rabattement de la nappe pendant l'exploitation. La fin de l'exploitation signifie le retour d'un plan d'eau, au niveau de la nappe phréatique en fond de fosse d'extraction. Ces cas peuvent s'apparenter pour partie aux zones humides décrites dans les travaux antérieurs menés sur les gravières (Kovacs et al., 2001).

3. Les différentes roches calcaires

Le calcaire est une **roche carbonatée** : sa formule chimique est à base de carbonates de calcium (CaCO_3). D'autres roches carbonatées lui sont associées dans la présente étude comme **les craies**, formées d'accumulation de tests coquilliers d'animaux 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.

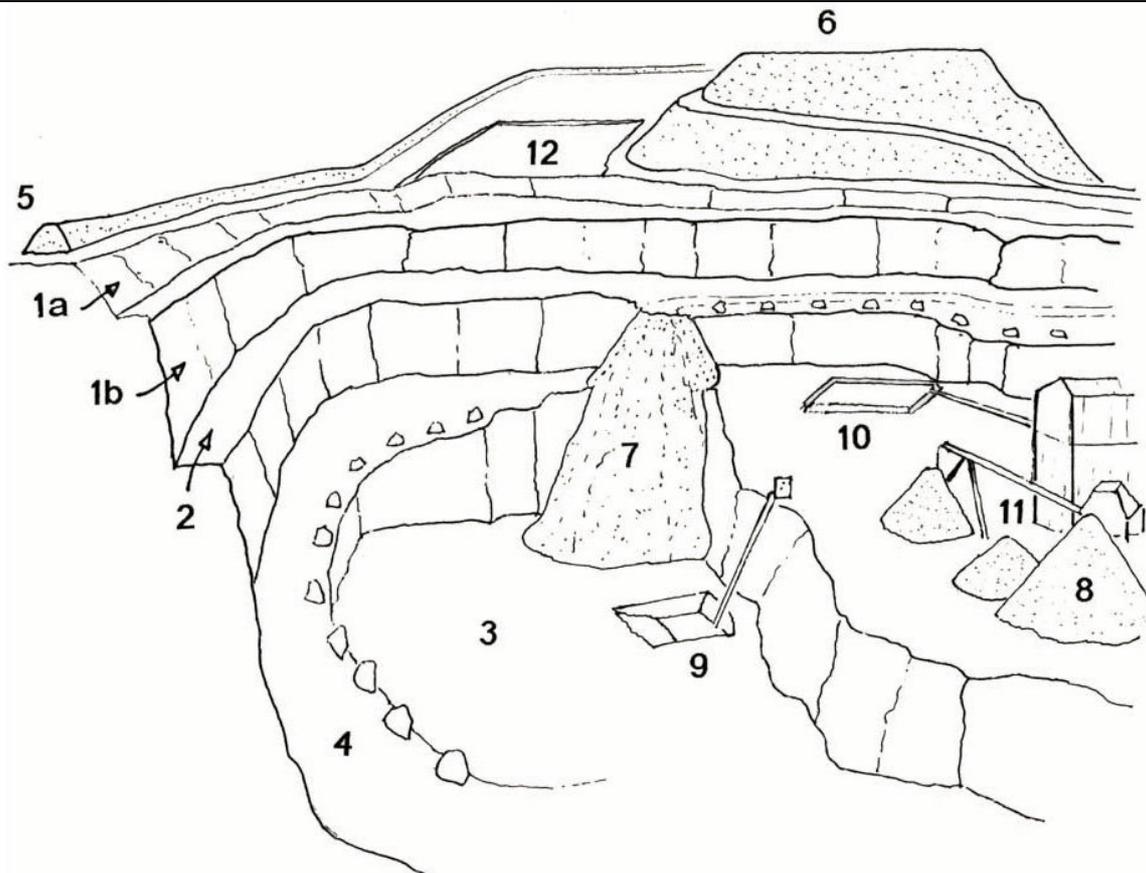
Les calcaires exploités en carrière ont des aspects et des caractéristiques différentes. Selon différents critères (origine, granulométrie, nature chimique), sont distinguées les principales roches suivantes :

Les calcaires constitués par des organismes vivants : 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.

- **calcaire construit ou roche de bioherme** : calcaire édifié par des organismes vivants tels que les coraux, les polypiers, les rudistes et les algues. C'est un calcaire de type récifal, constitué de fossiles en place ;
- **calcaire bioclastique** : roche constituée de débris de fossiles, entiers ou en fragments (les bioclastes) enrobés dans une matrice calcaire. Selon le fossile dominant divers vocables sont utilisés comme calcaires à foraminifères, à nummulites, à entroques, à mollusques... Ce calcaire s'apparente à des calcaires détritiques, dont les éléments d'origine ont subi un certain transport ;
- **craie** : roche carbonatée particulière pouvant s'apparenter à une roche bioclastique. Elle est constituée par un amoncellement important de coccolithes, tests calcaires d'une algue. La petite taille de ces tests et leur quantité importante confèrent à cette roche des propriétés différentes (microporosité, faible dureté, friabilité...).

Figure n° 5 : Exemple de schéma d'une carrière en exploitation

D'après Paillat, 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

VOCABULAIRE : les différentes zones d'exploitation de la carrière

- . **Les fronts de taille** sont les parois subverticales de la carrière généralement obtenues par abattage à l'explosif, parfois agencées en escaliers. Des **banquettes** horizontales fractionnent alors le front en gradins.
- . **Le carreau** correspond à la zone subhorizontale en fond de carrière formée par avancée progressive du front de taille. Il peut être un lieu de stockage, de traitement, de circulation et de parking.
- . **Des pistes**, larges d'une dizaine de mètres, relient les fronts aux autres secteurs de la carrière.
- . **Des merlons** sont des accumulations de matériaux de découverte (« sol initial »), de dimensions modestes (moins de 2 m de hauteur). **Les terrils**, plus volumineux que les merlons, sont constitués de stériles, matériaux non commercialisés, réutilisables en remblais dans le cadre de réaménagement.
- . **Des stocks** concentrent les granulats traités (concassés et criblés) en attente de commercialisation.
- . **Des bassins d'exhaure** (recueil des eaux en fond de fosse) ou de décantation (traitement des eaux de lavage) présentent un volume variable selon la surface du site. Ils en sont parfois absents.

Les calcaires chimiques et détritiques : ce sont des roches issues, soit de débris de roches ou boues calcaires, soit d'une précipitation directe de carbonate.

- **calcaire cryoclastique :** cela concerne principalement des éboulis stabilisés formés de cailloutis calcaires. Leur mise en place s'est effectuée sur le continent, sous climat périglaciaire, par l'action gel/dégel s'exerçant sur une roche carbonatée en place ;
- **calcaire sableux, silteux, argileux :** calcaire renfermant une quantité notable (mais inférieure à 50 %) de constituants terrigènes.
- **calcaire lithographique :** calcaire à grain fin, organisé en bancs plus ou moins épais ;
- **calcaire compact :** roche massive en banc souvent épais, peu fracturé ;
- **calcaire oolithique :** calcaire d'origine chimique constitué par l'accumulation de petits corps sphériques de la dimension d'une tête d'épingle, les oolithes, pris dans un ciment calcaire. Les grosses oolithes, dont le diamètre dépasse 2 mm, donnent des calcaires pisolithiques ;
- **calcaire siliceux :** calcaire imprégné de silice ou envahi par une silicification secondaire ;
- **calcaire marneux :** calcaire contenant une fraction fine argileuse ;
- **calcaire dolomitique et dolomie :** calcaire dont le calcium a fait l'objet d'une substitution partielle ou totale par le magnésium, la dolomite ($MgCaCO_3$). Cette substitution de l'ion calcium par le magnésium s'accompagne d'une modification des caractéristiques physiques de la roche, notamment l'absence de réaction aux acides en conditions normales, la roche devient en général plus compacte, dure et massive.

| Tableau n° 3 : Nomenclature chimique des roches carbonatées | | |
|--|---------------------|---------------------|
| <i>Nom</i> | <i>Calcite en %</i> | <i>Dolomie en %</i> |
| <i>Calcaire pur</i> | > 95 | < 5 |
| <i>Calcaire magnésien</i> | 90 à 95 | 5 à 10 |
| <i>Calcaire dolomitique</i> | 50 à 90 | 10 à 50 |
| <i>Dolomie calcareuse ou calcarifère</i> | 10 à 50 | 50 à 90 |
| <i>Dolomie pure</i> | < 10 | > 90 |

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 (karst, 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, caractère gélif...) et donc la création d'habitats variés entraînant des réactions différentes de la végétation et de la faune associée.

4. 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**. A 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 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 30 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 »*.

En carrières calcaires sèches, 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.

Les carrières calcaires fournissent en 2002 le quart des granulats produits en France, les 2/3 des besoins en pierre de taille et 90 % des besoins en matériaux industriels. Concernant les granulats, de loin la production la plus importante, la part des matériaux d'origine calcaire augmente de 1% chaque année. Les régions productrices correspondent aux principales zones d'affleurement du substrat calcaire en France.

L'extraction du calcaire peut prendre la forme d'une carrière à flanc de coteau, en fosse, en galeries souterraines ou d'éboulis.

Les carrières calcaires sont soumises à la Législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement, comportant l'obligation d'une remise en état après travaux, mais n'engageant pas à un « réaménagement ».

LA DEMARCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. La recherche bibliographique

La collecte bibliographique a eu lieu d'avril à novembre 2003, soit 8 mois, délai relativement court mais qui a paru suffisant compte tenu de la richesse des inventaires précédents et notamment celui mené à l'occasion de l'étude Massif armoricain (Paillat, 2001). 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, Paillat, 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... :

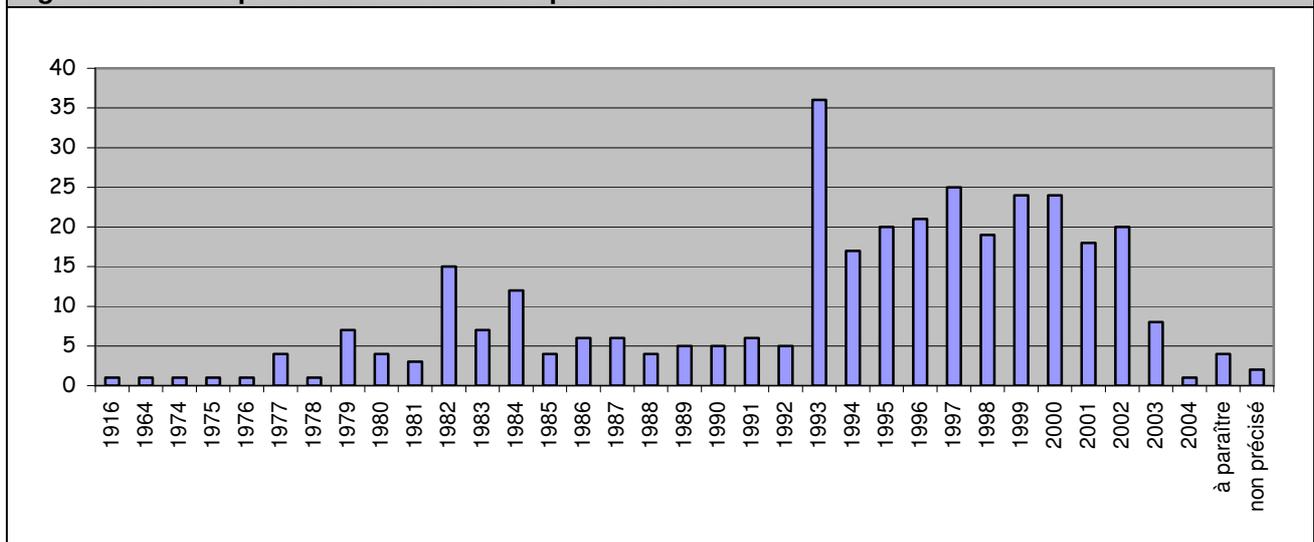
1. Syndicats professionnels : profitant de l'expérience infructueuse de nos prédécesseurs pour leur étude bibliographique, cette démarche n'a pas été renouvelée ;
2. DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) : elles ont été contactées par téléphone et certaines d'entre elles ont fait l'objet de 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 (Zone Naturelle d'Intérêt Faunistique et Floristique) 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, Ecole 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.

Ces 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.

Figure n° 6 : Répartition des références par années



2. Présentation des documents

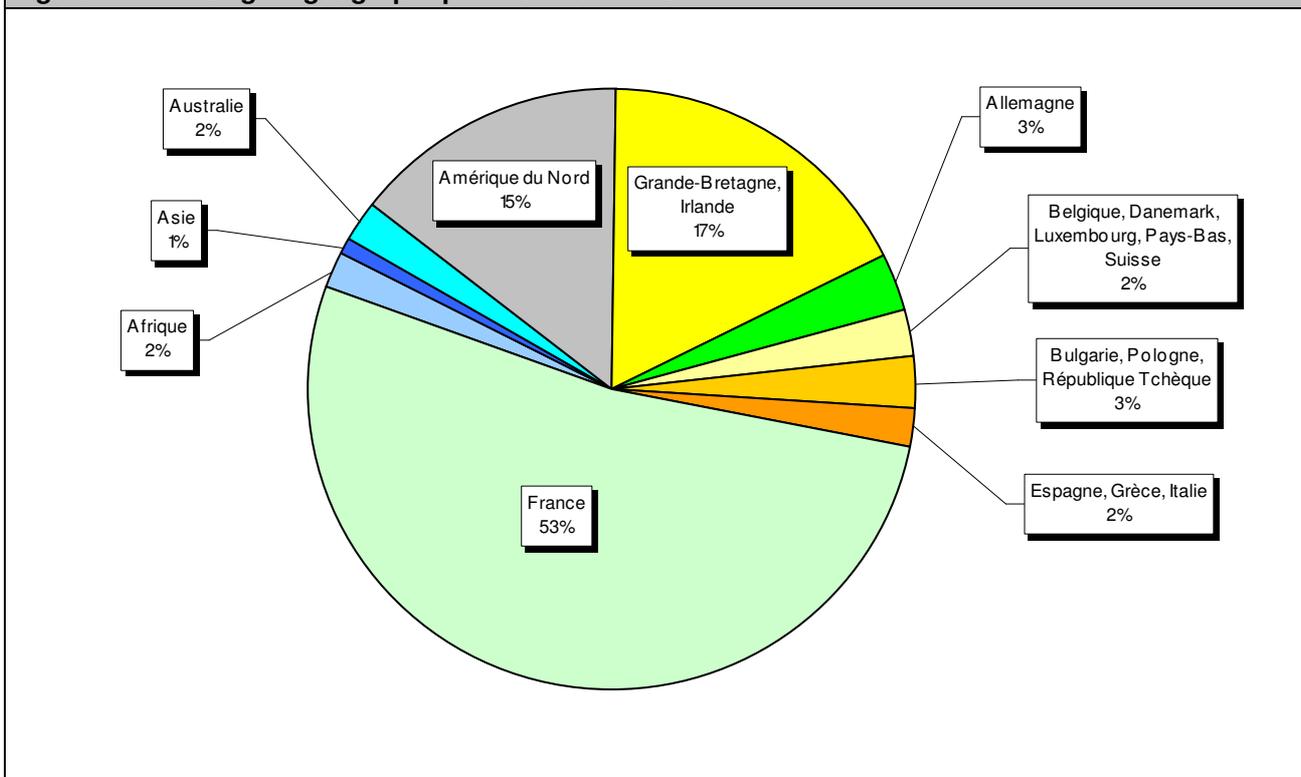
Au total environ 340 références de toutes natures ont été rassemblées. Comme le montre l'histogramme de répartition chronologique de ces références (Figure n° 6), la majorité d'entre elles date de moins de 10 ans. Quelques anciennes références ont été consultées. Il s'agit de documents relevant de théories écologiques reprises par des auteurs plus récents.

La répartition géographique des références est pour plus de la moitié française (Figure n° 7). 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 internationales.

Près d'un tiers des références étrangères sont d'origine anglo-saxonne (Grande-Bretagne, Amérique du Nord et Australie). Ceci tient au caractère universel de l'anglais, mais surtout 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.

Figure n° 7 : Origine géographique des références



Quatre grandes rubriques thématiques se détachent, au sein desquelles les documents rassemblés ont été regroupés :

- des réflexions relatives aux expériences en carrières calcaires (avec quelques exceptions sur d'autres types de carrières) ;
- des réflexions relatives à l'écologie de la restauration (nombreuses références anglo-saxonnes) ;
- des généralités sur les carrières ;
- des généralités sur l'environnement utiles à l'approche développée ci-après (par exemple, l'écologie des bermes routières ou ferroviaires, des terrils...).

Ce classement thématique des données bibliographiques figure en annexe du présent document.

Plus dans le détail, ces documents peuvent être classés selon les différents sujets traités, présentés dans le Tableau n° 4.

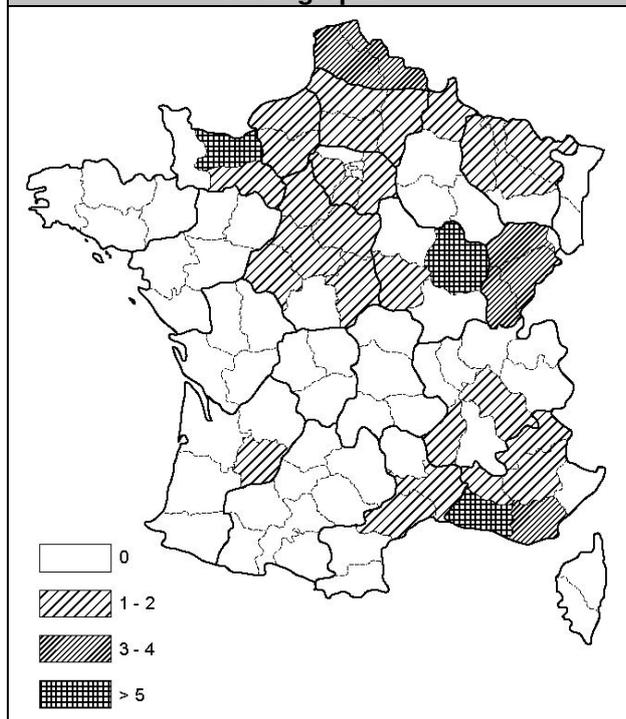
| Tableau n° 4 : Répartition de la bibliographie relative à l'écologie des carrières calcaires selon les sujets abordés | |
|--|------|
| . Nombre de références total : | 352 |
| . Nombre de références de type « expériences en carrières calcaires » : | 65 |
| dont (les différents thèmes ne sont pas exclusifs les uns des autres) | |
| . Références présentant des descriptifs écologiques (relevés faune/flore) : | 80 % |
| . Références présentant l'influence de différents facteurs : | 24 % |
| . Références proposant une méthode de mesure de l'intérêt écologique : | 24 % |
| . Références présentant des modalités d'aménagement écologique de carrières : | 56 % |

3. Analyse critique de la bibliographie

La répartition géographique de l'ensemble des références laisse la plus large part (plus de 50%) aux sources françaises, plus faciles d'accès. Les documents anglo-saxons (1/3 des références) portent pour l'essentiel sur des aspects théoriques de l'écologie de la restauration. Des références britanniques, allemandes et tchèques étoffent le créneau de l'écologie appliquée (Paillat, 2001).

La carte jointe (cf. Figure n° 8) donne la répartition géographique des sites de carrières décrits dans les bibliographies de type « expériences en carrières calcaires ». Les exemples sont nombreux, répartis sur l'ensemble des grandes régions calcaires de France, avec toutefois des exceptions : le Sud-Ouest (Aquitaine et Midi-Pyrénées) et les Alpes, pourtant exploités pour leurs matériaux calcaires, ne sont pas décrits dans les études. Ces zones n'ont pas fait l'objet d'expertises écologiques, peut-être concurrencées auprès des scientifiques et naturalistes régionaux par des sujets aux enjeux économiques et sociaux plus pressants tels que la revégétalisation des pistes de ski.

Figure n° 8 : Répartition géographique des études de cas décrites dans la bibliographie



Ce premier sous-ensemble, néanmoins relativement représentatif des carrières calcaires en France, devrait favoriser l'étape de travail suivante (étude de sites et inventaires). Les références étrangères, non représentées sur la carte, 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. La majorité des documents sont récents, publiés au cours des 20 dernières années. Les études relatives à l'écologie des carrières portent toutes, sauf de rares exceptions, sur des carrières abandonnées depuis longtemps (30 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 calcaire 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. Ces références sont spécifiées dans le texte sous la forme « communication orale ».

4. Liste bibliographique

Elle est présentée dans les pages suivantes, selon un classement alphabétique.

En annexe, le même ensemble de références est classé selon quatre thématiques :

- expériences en carrière calcaire (sauf exceptions) ;
- écologie de la restauration ;
- généralités sur les carrières ;
- généralités sur l'environnement.

Environ 340 références bibliographiques ont été analysées. Classées selon 4 thèmes,

- **expériences en carrières calcaires,**
- **écologie de la restauration,**
- **carrières,**
- **environnement,**

elles sont complétées de communications orales.

Leurs apports à l'étude laissent des lacunes :

- **les carrières calcaires décrites ne couvrent pas l'ensemble des zones de gisement calcaire français ;**
- **beaucoup de conseils d'aménagement « écologique » mais peu de mises en pratiques et de bilans d'expériences ;**
- **des facteurs déterminants de l'écologie des carrières sont pressentis, mais leur influence n'est pas démontrée ;**
- **les annexes de la carrière (pistes, périphérie) ne sont pas étudiées ;**
- **les bilans manquent et le « coût d'aménagement écologique » n'est pas précisé.**

Liste bibliographique générale

- AEE - Agence Européenne de l'Environnement, 1999. L'environnement à l'aube du XXI^{ème} 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.
- 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.
- Aronson J. & Le Floc'h E., 1996a. Hierarchies and landscape history : dialoguing with Hobbs and Norton. *Restoration Ecology*, 4 : 327-333.
- Aronson J. & Le Floc'h E., 1996b. Vital landscape attributes : missing tools for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 4 : 377-387.
- Aronson J. & Le Floc'h E., 1996c. Que faire de tant de notions du paysage ? *Natures-Sciences-Sociétés*, 4 : 264-266.
- Aronson J., Dhillion S. & Le Floc'h 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., Dhillion S. & Le Floc'h 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. *Restoration Ecology*, 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. *Restoration Ecology*, 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. *Journal of Applied Ecology*, 31 : 74-84.
- Barbault R., 1995. Biodiversity dynamics : from population and community ecology approaches to a landscape ecology point of view. *Landscape and Urban Planning*, 31 : 89-98.
- Barnaud G. & Chapuis J.L. . Recréer la nature programme national de recherche. Muséum National d'Histoire Naturelle. Plaquette 8 p.
- Barnaud G., 1995. A l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration. *Natures-Sciences-Sociétés*, 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., Denton J.S. & Buckley J., 1996. Factors affecting population densities of adult Natterjack toads *Bufo calamita* in Britain. *Journal of Applied Ecology*, 33 : 263-268.
- Bell L.C., 2001. Establishment of native ecosystems after mining - Australian experience across diverse biogeographic zones. *Ecological Engineering*, 17 : 179-186.
- Bell S.S., Fonseca M.S. & Motten L.B., 1997. Linking restoration and landscape ecology. *Restoration Ecology*, 5 : 318-323.
- Bertrand A., 1997. Endémisme et biodiversité : l'exemple des mollusques dans les Pyrénées françaises. *Vertigo*, 7 : 45-57.
- Berube M.E. & Lavoie C., 2000. The natural revegetation of a vacuum-mined peatland : Eight years of monitoring. *Can. Field Nat.*, 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. *British Wildlife*, 5 : 273-287.
- Billeter R., Hooftman D.A.P. & Diemer M., 2003. Differential and reversible responses of common fen meadow species to abandonment. *Applied Vegetation Science*, 6 : 3-12.
- BIOTOPE, 2002. Guide sur la prise en compte des milieux naturels dans les études d'impact. DIREN Midi-Pyrénées, 76 p.
- 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. *Envir. Management*, 11 : 265-269.
- Blondel J., 1976. Stratégies démographiques et successions écologiques. *Bull. Soc. Zool. France*, 101 : 695-718.
- Blondel J., 1986. *Biogéographie évolutive*. 2^{ème} édition Masson, 221 p.
- Bonnet E., Vilks A., Lenain J.F. & Petit D., 1997. Analyse temporelle et structurale de la relation Orthoptères - Végétation. *Ecologie*, 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. *Restoration Ecology*, 7 : 24-32.
- 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 Armoricaire. *E.R.I.C.A.*, 11 : 9-25.
- Box E.O., 1996. Plant functional types and climate at the global scale. *Journal of Vegetation Science*, 7 : 309-320.
- Box J., 1993. Conserving or greening ? The challenge of post-industrial landscapes. *British Wildlife*, 4 : 273-279.
- Box J., 1996. Setting objectives and defining outputs for ecological restoration and habitat creation. *Restoration Ecology*, 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. & Huttl R.F., 2001. Future minesite restoration involves a broader approach. *Ecological Engineering*, 17 : 87-90.
- Bradshaw A.D., 1983. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 20 : 1-17.
- Bradshaw A.D., 1984. Land restoration, now and in the future. *Proc. Royal Soc. B.*, 223 : 1-23.
- Bradshaw A.D., 1993. Restoration ecology as a science. *Restoration Ecology*, 1 : 71-73.
- Bradshaw A.D., 1997. Restoration of mined lands - using natural processes. *Ecological Engineering*, 8 : 255-269.
- Bradshaw A.D., 2000. The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties. *Landscape and Urban Planning*, 51 : 89-100.
- Bradshaw A.D., Marrs R.H. & Roberts R.D., 1982. Succession. *Ecology of Quarries*. 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. *Land Degradation and Development*, 13 : 461-467.
- Brofas G. & Varelides C., 1999. Hydro-seeding and mulching for establishing vegetation on mining spoils in Greece. *Land Degradation and Development*, 11 : 375-382.
- Brown V.K. & Gange A.C., 1992. Secondary plant succession : how is it modified by insect herbivory ? *Vegetatio*, 101 : 3-13.
- Brown V.K., 1982. Size and shape as ecological discriminants in successional communities of Heteroptera. *Biol. J. Lin. Soc.*, 18 : 279-290.
- Brown V.K., 1984. Secondary succession : insect - plant relationships. *BioScience*, 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. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle d'Autun*, 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.), *Damaged ecosystems and restoration*. World Scientific : 1-23.
- Cairns J., 2000. Setting ecological restoration goals for technical feasibility and scientific validity. *Ecological Engineering*, 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
- Choi Y.D. & Wali M.K., 1995. The role of *Panicum virgatum* (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.
- 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.
- 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. *Ecological Applications*, 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.
- 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. *Ecology of Quarries*. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 12-19.
- Davis B.N.K., 1986. Colonization of newly created habitats by plants and animals. *Journal of Environmental Management*, 22 : 361-371.
- Davis M.A. & Slobodkin L.B., sous presse. The science and values of restoration ecology. *Restoration Ecology*, 8 p.
- De Foucault B., 1979. Observations sur la végétation des rochers arides de la Basse-Normandie armoricaine. *Doc. Phytosoc.*, 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. *Bull. Soc. Linn. Normandie*, 108 : 61-70.
- Debout G., 2001. Le Grand Corbeau *Corvus corax* et le Faucon Pèlerin *Falco peregrinus* nicheurs en Normandie. *Alauda*, 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. *Belgian J. Bot.*, 132 : 77-94.
- Delarze R., 1994. Dynamique de la végétation sur les pistes ensemençées de Crans-Montana (Valais, Suisse). Effets de l'altitude. *Botanica Helvetica*, 104 : 3-16.
- Dinger F., 1997. *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*. CEMAGREF-Editions, Antony, 144 p.
- Donadieu P. & Rumelhart M., 1983. Ecologie et paysage - La cicatrization des "plaies paysagères" - Le cas de la cicatrization végétale naturelle. ENSP Versailles, 36 p.
- Donadieu P., 2002. Les références en écologie de la restauration. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, 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. *Ecology of Quarries*. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge : 62-66.
- Dragovich D. & Patterson J., 1995. Condition of rehabilitated coal mines in the hunter valley, Australia. *Land Degradation and Development*, 6 : 29-39.
- 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.), *Animals in primary succession - the role of fauna in reclaimed lands*. Cambridge University Press, Cambridge : 307-337.
- Duret J.L. & Chiffaut A., 2000. Etude de la faune de la carrière de la Chalandrue, Til-Châtel (Côte d'Or). Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 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.
- 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, 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, 2002. Demande d'autorisation au titre des installations classées, commune de Moulézan (30). OMYA, ENCEM, dossier n° 18-30-3695.
- 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.
- Felinks B., Pilarski M. & Wiegleb 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.
- 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., 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. & Heinkele 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 biology. *Ann. Zool. Fenn.*, 31 : 5-18.
- Halle S., 1993. Wood mice (*Apodemus sylvaticus*) 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.
- Ireland T.T., Wolters G.L. & Schemnitz S.D., 1994. Recolonization of wildlife on a coal strip-mine in northwestern New Mexico. *Southwestern Naturalist*, 39 (1) : 53-57.
- Jefferson R.G. & Usher M.B., 1986. Ecological succession and the evaluation of non-climax communities. In : Usher M.B. (Eds.), *Wildlife Conservation Evaluation*, Chapman and Hall Ltd, London : 69-91.
- Jefferson R.G., 1984. Quarries and wildlife conservation in the Yorkshire Wolds, England. *Biological Conservation*, 29 : 363-380.
- Jochimsen M.E.A., 1996. Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession. *Water, Air & Soil Pollution*, 91 : 99-108.
- Jochimsen M.E.A., 2001. Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil. *Ecological Engineering*, 17 : 187-198.
- Johnson C.D. & Skousen J.G., 1995. Minesoil properties of 15 abandoned mine land sites in west Virginia. *J. Env. Quality*, 24 : 635-643.
- Johnson D.B., 1998. Biodiversity and ecology of acidophilic microorganisms. *Fems Microbiology Ecology*, 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. *Chemosphere*, 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 III^{ème} 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. *Applied Vegetation Science*, 4 : 19-27.
- Kjoss V.A. & Litvaitis J. A., 2001. Comparaison of 2 methods to sample snake communities in early successional habitats. *Wildlife Society Bulletin*, 29 : 153-157.
- Kovacs J.C., Dasnias P., Barnde S. & Le Bloch F., 2001. Carrières et zones humides – Le patrimoine écologique des zones humides issues de l'exploitation des carrières. Ecosphère, Charte UNPG, MNHN, CNRS, Paris, 5 volumes.
- Kryuchkov V.V., 1993. Extreme anthropogenic loads and the northern ecosystem condition. *Ecological Applications*, 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. *Conservation Biology*, 2 : 316-328.
- 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. *Natures-Sciences-Sociétés*, 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. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 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. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14 : 3-14.
- Le Roux C., 2002. La réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert. *Bois et forêts des tropiques*, 272 (2) : 5-20.
- Lebahy C., 1983. La réinsertion paysagère des carrières de roches massives par la revégétalisation. CEMAGREF, 100 p.

- Lecoite A., 1979. *Southbya nigrella* (De Not.) Spruce, *Cephaloziella baumgartneri* Schiffn. et *Tortella inflexa* (Bruch) Broth., bryophytes nouvelles pour la Basse-Normandie, aux carrières d'Orival, près de Creully (Calvados). *Bull. Soc. Linn. Normandie*, 107 : 47-60.
- Lecoite 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.
- Lecoite A., Boudier P. & Hunault G., 1991. Première session bryologique de la Société Botanique du Centre Ouest : La Sarthe (9 au 13 juillet 1990). *Bull. Soc. Bot. Centre Ouest*, 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. *Alauda*, 70 (1) : 33-36.
- Lefeuvre J.C. & Barnaud G., 1988. Ecologie du paysage : mythe ou réalité ? *Bull. Ecologie*, 19 : 493-522.
- Lefeuvre J.C. & Leduc J.P., 1981. La reconquête des milieux naturels : faire revivre des carrières. *Annales des Mines*, 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.), *Patrimoine en folie*. 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. *Le Granulat*, 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'Equipement 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. *Bull. Soc. Herp. France*, supplément, 91 : 6-7.
- Lemoine G., 2000. Les carrières des Plombs et des Peupliers: un écosystème spécifique, objet d'un aménagement adapté. *L'Orchidophile*, 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. *Bull. Ecologie*, 14 (3) : 133-178.
- Lévy-Bruhl V. & Coquillart 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. *L'Argiope*, 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. *L'Argiope*, 30 : 13-15.
- Loppi S. & Pirintsos S.A., 2000. Effect of dust on epiphytic lichen vegetation in the mediterranean area (Italy and Greece). *Israel Journal of Plant Sciences*, 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. *Sociobiology*, 23 (1) : 1-11.
- 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.), *Primary succession on land*. 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.). *Vegetatio*, 12 : 103-222.
- Matheson J.D. & Larson D.W., 1998. Influence of cliffs on bird community diversity. *Can. J. Zool.*, 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.), *Primary succession on land*. Blackwell Scientific Publications : 101-112.
- Mentis M.T., 1999. Diagnosis of the rehabilitation of opencast coal mines on the Highveld of South Africa. *South African Journal of Science*, 95 (5) : 210-215.
- Meyer B., 1982. Permanence du *Cytisanthus horridus* (Vahl) Gams (= *Genista horrida* D.C.) à Couzon-au-Mont-d'Or. *Bull. Soc. Linn. de Lyon*, 51 (7) : 233.
- Miao Z. & Marrs R., 2000. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. *Journal of Environmental Management*, 59 : 205-215.
- Michener W., 1997. Quantitatively evaluating restoration "experiments". *Restoration Ecology*, 5 : 324-337.
- Miles J. & Walton D.W.H., 1993. *Primary succession on land*. 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.
- 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 Chalandruie (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 Chalandruie, 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. & Lansart 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.
- Paillat G., 2001. Carrières de roche éruptive, Potentialités écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions, ENCEM & 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.
- Prach K. & Pysek P., 1994a. Clonal plants - What is their role in succession ? *Folia Geobot. Phytotax.*, Praha, 29 : 307-320.
- Prach K. & Pysek P., 1994b. Spontaneous establishment of woody plants in central european derelict sites and their potential for reclamation. *Restoration Ecology*, 2 : 190-197.
- Prach K. & Pysek P., 2001. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats : experience from central Europe. *Ecological Engineering*, 17 : 55-62.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1993. On the rate of succession. *Oikos*, 66 (2) : 343-346.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1997. Changes in species traits during succession : a search for pattern. *Oikos*, 79 (1) : 201-205.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1999. Prediction of vegetation succession in human disturbed habitats using an expert system. *Restoration Ecology*, 7 : 15-23.
- Ranson C.E. & Doody J.P., 1982. Quarries and nature conservation - Objectives and management. *Ecology of Quarries.* 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. *Proceeding of the Royal Society of London, A*, 339 : 355-372.
- Reading C.J., 1997. A proposed standard method for surveying reptiles on dry lowland heath. *Journal of Applied Ecology*, 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. *Bull. Soc. Linn. Normandie*, 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.
- Rochefort L., 2000. New frontiers in bryology and lichenology - Sphagnum - A keystone genus in habitat restoration. *Bryologist*, 103 : 503-508.
- Royer J.M., 1977. Les pelouses sèches à thérophytes de Bourgogne et de Champagne méridionale. *Coll. Phytosoc. 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. *Can. J. Bot.*, 64 : 1286-1298.
- Sänger H., 1995. Flora and vegetation on dumps of uranium mining in the southern part of the former GDR. *Acta Soc. Bot. Pol.*, 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). *Archs Inst. G.-D. Luxemb. Sect. Sci. Nat. Phys. Math.*, NS 42 : 11-37.
- Schulz F. & Wiegleb G., 2000. Development options of natural habitats in a post-mining landscape. *Land Degradation and Development*, 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.
- 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". Redland granulats, 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. *Int. Biodeterioration and Biodegradation*, 40 (2-4) : 263-267.
- Sionneau J.M., 1987. Les potentialités écologiques des carrières. Industries minérales, *Mines et Carrières*, 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. *J. Env. Quality*, 23 : 1224-1230.
- Smith R.I.L., 1993. The role of bryophyte propagule banks in primary succession : case study of an antarctic fellfield soil. In : Miles J. & Walton D.W.H. (Eds.), *Primary succession on land*. Blackwell Scientific Publications : 55-78.
- Snazell R. & Clarke R., 2000. The restoration of an area of restored chalk downland by spiders (Araneae) *Ekological Bratislava*, 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. *Ecologie des milieux montagnards et de haute altitude, document d'écologie pyrénéenne*, II-IV : 165-170.
- Steffan-Dewenter I. & Tscharrntke T., 2001. Succession of bee communities on fallows. *Ecography*, 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. *Documents phytosociologiques*, (9-14) : 245-246.
- Strong W.L., 2000. Vegetation development on reclaimed lands in the Coal Valley Mine of western Alberta, Canada. *Can. J. Bot.*, 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. *Ecological Engineering*, 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.) : *Animals in primary succession - The role of fauna in reclaimed lands*. 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. *Journal of Applied Ecology*, 34 : 289-303.
- Usher M.B. & Jefferson R.G., 1990. The concepts of colonisation and succession : their role in nature reserve management. *Biological Conservation*, 48 : 153-159.
- Usher M.B., 1979. Natural communities of plants and animals in disused quarries. *Journal of Environmental Management*, 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.
- Wiegand 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.
- Wiegand 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.

L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les données bibliographiques utilisées peuvent se scinder en deux grands familles :

- les expériences fondamentales sur des sites pilotes particuliers comme les mines après cessation d'activité. Ce sont des publications le plus souvent à caractère international ayant pour objet la description et l'analyse des mécanismes se mettant en place dans les écosystèmes étudiés. Ces observations utiles pour la compréhension du fonctionnement des milieux apportent néanmoins peu d'éclaircissement sur la variabilité écologique des carrières et l'expression de leur potentiel ;
- les descriptions et exemples ponctuels de carrière. Ces informations, à caractère national, mettent en avant le potentiel écologique mis en évidence par les naturaliste mais sont en général dénuée de synthèse permettant d'appréhender les points forts et les points faibles ayant prévalu à l'expression de ce potentiel.

Face à ces lacunes constatées lors de l'étude bibliographiques, il a paru nécessaire de faire la synthèse des connaissances de l'écologie des carrières calcaires à partir des données fondamentales de l'écologie et des résultats obtenus dans les publications notées dans la présente bibliographie. L'analyse bibliographique aborde ainsi successivement quatre aspects de l'écologie des carrières calcaires.

1. L'écologie des carrières calcaires : l'adaptation des notions d'écologie fondamentale aux carrières permet de fixer le cadre en termes de fonctionnement pour les inventaires qui ne manqueront pas d'intervenir par la suite.
2. La flore et la faune des carrières calcaires : l'analyse des éléments disponibles sur la faune et la flore conduit à préciser les potentiels d'habitats et des populations* qui s'y trouvent.
3. Les facteurs de la diversité écologique des carrières calcaires : grâce à l'étude des facteurs de variation des conditions présentes sur les carrières, une liste des facteurs propices à la diversité écologique a été élaborée.
4. Le réaménagement écologique des carrières calcaires : l'analyse d'un exemple de réaménagement écologique donne les grands axes à garder à l'esprit lors de l'élaboration d'un guide d'aménagement écologique.

A l'issue de ces quatre parties, nous serons alors en mesure de proposer des pistes d'investigation à poursuivre afin de répondre au moins en partie à la problématique soulevée tout au long de l'étude.

PARTIE 1 : L'ÉCOLOGIE DES CARRIÈRES CALCAIRES

1.1. Notions d'écologie fondamentale adaptées aux carrières

Ce chapitre synthétise des théories développées et illustrées par de nombreux auteurs (Petit, 1980 ; Sauveterre, 1985 ; Frain, 1991 ; Robert et al., 1991 ; Frochot, 2002). Elles sont appliquées à des carrières abandonnées depuis plusieurs dizaines d'années et n'ayant généralement pas fait l'objet de travaux spécifiques en faveur d'un quelconque objectif écologique.

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 graines 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 graines** 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).

La diversité biologique, ou « **biodiversité** », est devenue un enjeu majeur des politiques de protection de l'environnement. Elle assure la sécurité pour les cultivars et donc garantit l'approvisionnement pour l'alimentation humaine, elle permet la viabilité des équilibres et de

l'aménagement du territoire, et préserve la qualité et la durabilité de l'environnement (Cauderon, 1996). Cette notion a été rendue médiatique par l'adoption de textes internationaux officiels : Convention sur la diversité biologique (1992), Directive Habitats. Il s'agit de préserver l'équilibre des écosystèmes, clé d'un développement durable pour les activités humaines et l'environnement naturel.

Chaque écosystème est constitué d'un ensemble d'espèces, dont les relations fonctionnelles assurent sa pérennité et son développement. La biodiversité est composée de la diversité écologique (différents habitats), la diversité spécifique (différentes espèces) et la diversité génétique (différents patrimoines génétiques pour chaque espèce).

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 4 des 6 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'invasion 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 n° 5).

| Tableau n° 5 : 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 | | |
| Mammifères | 4 300 | 270 | 119 | 78 | 29 % | 3 | 46 dont 9 en danger, 15 vulnérables |
| Oiseaux | 9 600 | 514 | 281 | 30 | 6 % | 2 | 78 dont 22 en danger, 29 vulnérables |
| Reptiles | 6 500 | 198 | 36 | 90 | 45 % | 1 | 12 dont 2 en danger, 4 vulnérables |
| Amphibiens | 4 000 | 75 | 37 | 56 | 75 % | 0 | 18 dont 3 en danger, 8 très vulnérables |
| Poissons d'eau douce | 8 400 | 334 | 73 | 200 | 58 % | 2 | 24 dont 2 en danger, 16 vulnérables |
| Papillons | 30 000 | 575 | - | 189 | 33 % | ? | 18 Lépidoptères, 52 Coléoptères en danger |
| Insectes | - | - | 34600 | - | - | ? | |
| Mollusques | - | - | 1400 | - | - | ? | |
| Plantes vasculaires | 260 000 | 12 500 | 4800 | 3 500 | 28 % | 34 | 461 espèces ou sous-espèces en danger |

La contribution des carrières calcaires à la biodiversité paraît évidente aux yeux des naturalistes contactés à l'occasion de cette étude. 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.

Piste de recherche : pour quantifier l'apport des carrières calcaires à la biodiversité générale, des inventaires faune/flore approfondis sur certains sites de carrières pourraient fournir des résultats à comparer aux inventaires régionaux.

1.2. Trajectoire écologique d'une carrière calcaire

Les excavations et galeries des plateaux forestiers de Haute-Marne, abritant fougères et chauves-souris, les fronts de taille du Lot, colonisés par les Faucons pèlerins, ou les surfaces rocailleuses écrasées de soleil dans les garrigues méditerranéenne semblent avoir peu de points communs. Pourtant toutes ces carrières calcaires, retournées à la nature en fin d'exploitation, présentent des phénomènes écologiques similaires.

1.2.1. Une colonisation rapide

A l'arrêt de l'exploitation, la carrière est un **site essentiellement minéral** : carreau dénudé, front de taille, éboulis, 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, en particulier les 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 le cas par exemple 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.

1.2.2. Les successions écologiques observées

Le concept

La « succession* écologique » est un concept ancien décrit par Clements (1916). Il décrit les processus de colonisation d'un biotope* par les êtres vivants et les changements dans le temps de la composition floristique et faunistique (Blondel, 1976 ; Donadieu & Rumelhart 1983 ; Brown, 1984...). Son point de départ 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 roche massive, qu'elle soit calcaire ou non, la succession* primaire telle que définie précédemment prévaut sur toutes les zones où la roche est mise à nu. Au niveau des surfaces régénées de terre végétale par contre, 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.

A 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 n° 9) :

- 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, accompagnés de tout un cortège faunistique.

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 n° 9 : Dynamique écologique d'une carrière en cours de « renaturation »
(Source partielle : Chambaud, 1993)

| | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|---|---|---|
| Temps | 0 | | | 50 à 100 ans |
| Stades | PIONNIER | POST-PIONNIER | | CLIMACIQUE |
| Substrat Sol | Minéral Absent | Organo-minéral 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 Fruticée ouverte-fermée | Taillis, futaie |
| Espèces fréquentes | | Catapode rigide Céraiste nain Luzerne lupuline Pâturin bulbeux Erodium Vergerettes | Brome érigé Brachypode penné Dactyle aggloméré Calamagrostis Coronille Sarriette Origan Ophrys Hélianthème Pimprenelle | Cornouiller sanguin Eglantiers Saulé marsault Cerisier Ste-Lucie Aubépine monogyne Prunellier Troène Camérisier Tremble |
| 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).

Les successions végétales observées en carrières calcaires

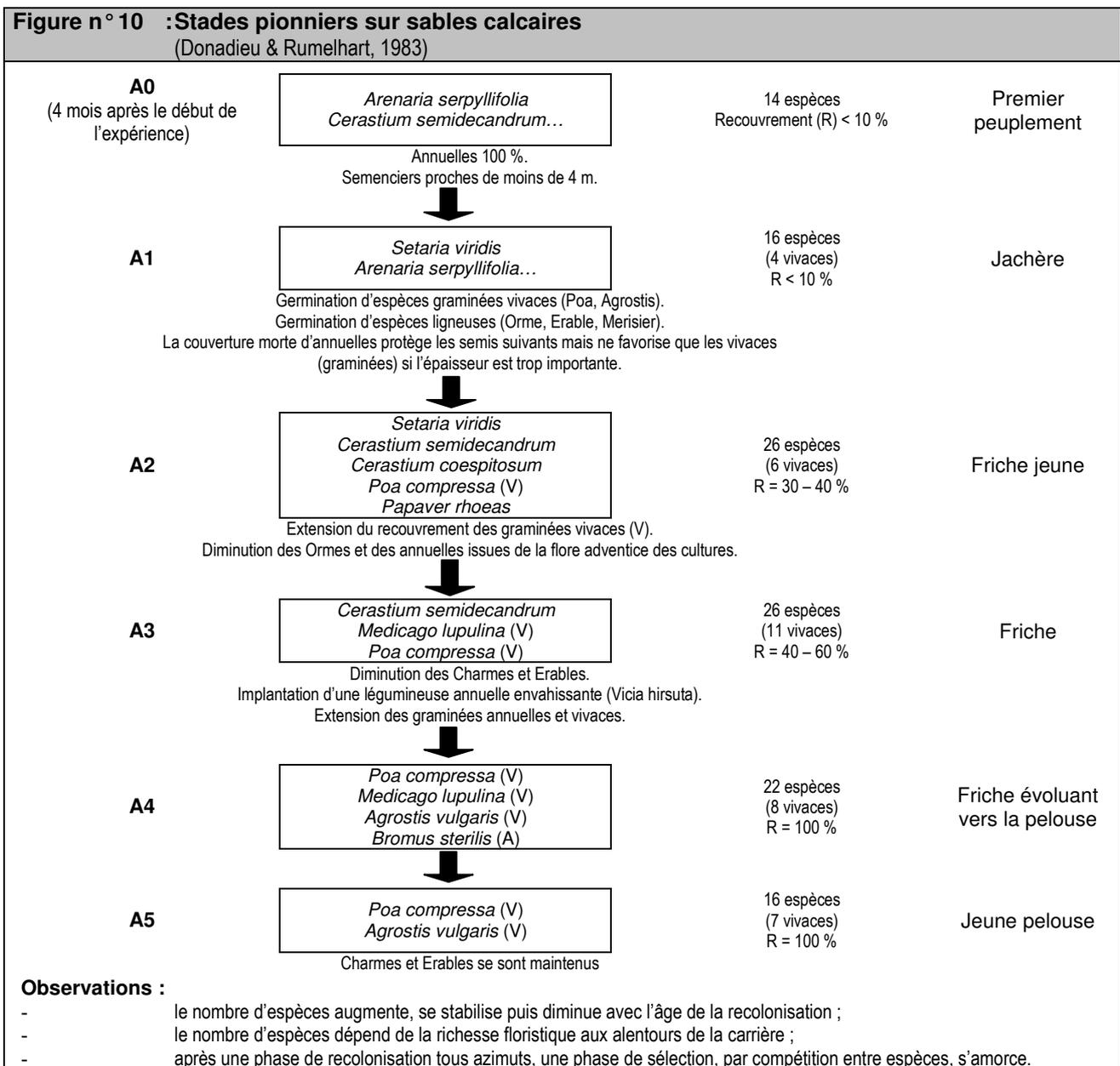
Peu de travaux abordent la notion de succession* végétale en carrière calcaire. Les principales réflexions reposent sur les travaux de Donadieu & Rumelhart (1983). Ces auteurs précisent que les mécanismes de cette succession* sont régis par 3 facteurs :

- le **hasard** qui détermine l'implantation des premières espèces végétales. Ce caractère aléatoire des premiers stades est confirmé par d'autres auteurs (Brunaud, 1997a) ;
- l'**influence** des semenciers environnants dont la richesse floristique influera sur les cortèges de la succession* ;
- la **nature du substrat** agissant sur les relations plante/sol (perméabilité, fracturation, bilan hydrique, chimisme du sol¹, texture, exposition, pente...).

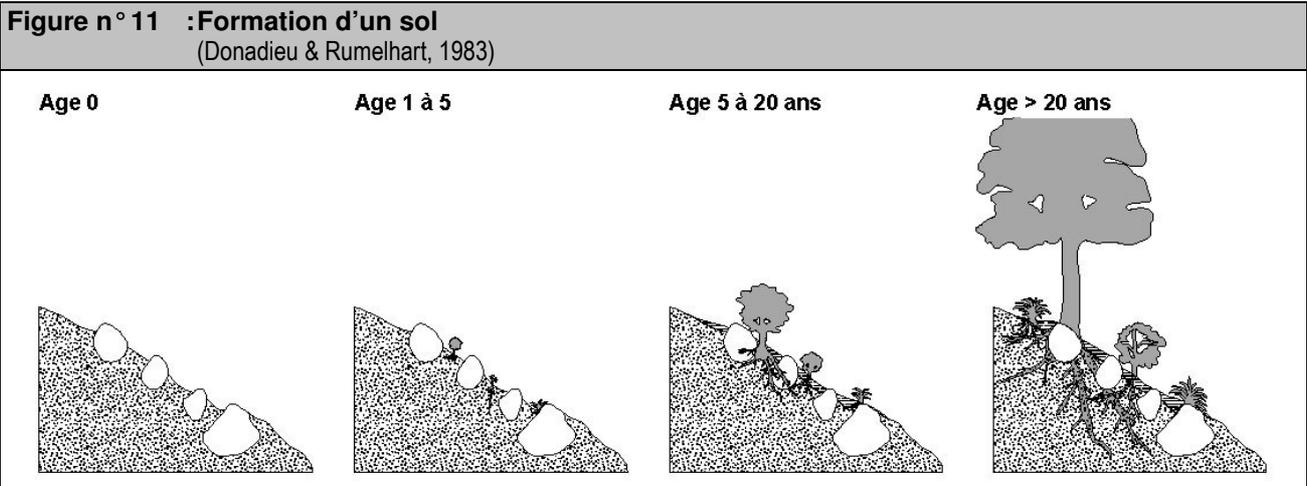
¹ Chimisme : ensemble des phénomènes considérés du point de vue de la chimie. Selon la nature du substrat, le chimisme des sols agit et contrôle directement l'établissement du type de végétation.

a - Succession sur matériaux peu compacts (sables calcaires et craies)

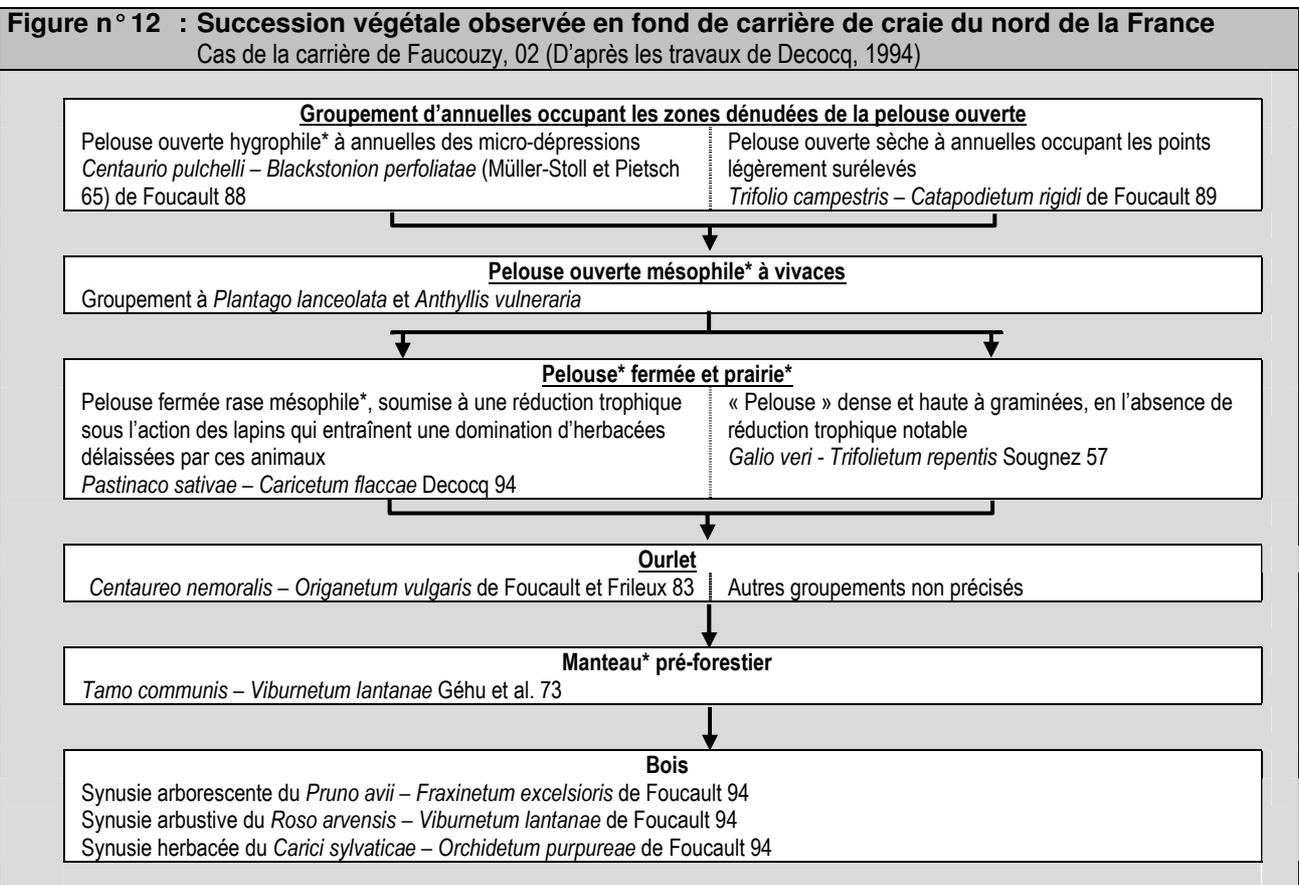
Bournérias (in Donadieu & Rumelhart, 1983) a étudié les stades pionniers* se mettant en place sur des sables calcaires, en terrain plat, dans le sud de la région parisienne (Figure n° 10). Ces stades pionniers* mis en évidence sont caractéristiques des friches calcicoles* sèches. La succession* identifiée 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 régesser au profit des vivaces.



Cette évolution s'accompagne de la formation d'un sol par accumulation progressive de particules fines et d'organes végétaux en décomposition (Figure n° 11). Elle est plus lente que ne le laisse paraître la végétation, rejoignant les observations de Frain (1991) en Auvergne. Ainsi au stade pré-forestier, le sol n'est encore souvent qu'une rendzine brunifiée sur moins de 20 cm d'épaisseur.



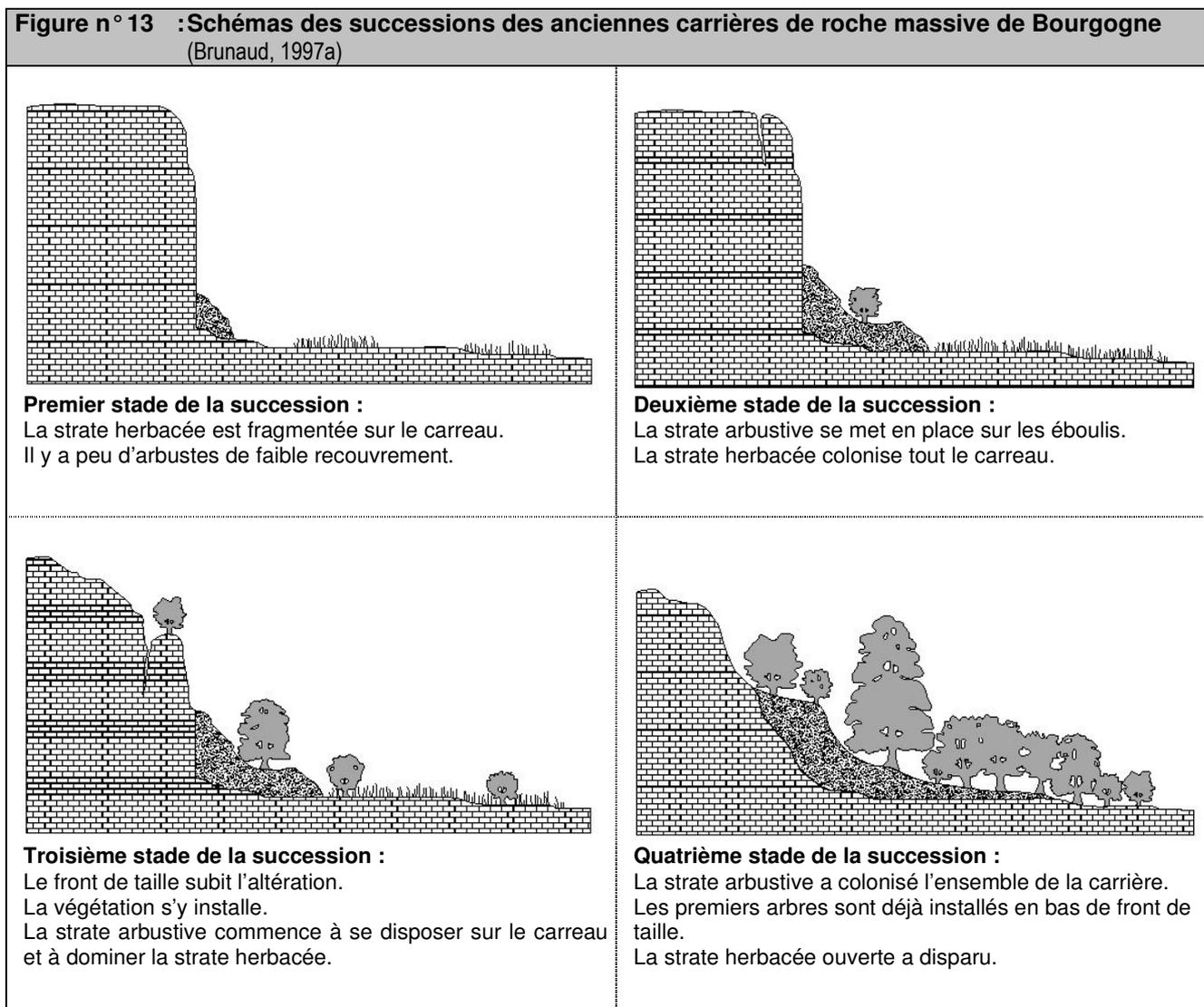
Sur substrat crayeux des anciennes carrières de phosphate du nord de la France, les différents groupements identifiés par Decocq (1994) sur le fond de la carrière montrent une succession* classique reprenant les étapes déjà décrites : pelouse* à annuelles - pelouse* à vivaces - ourlet - fourré - bois (Figure n° 12). Les groupements sont différents, mais Decocq note comme Bournérias la constance des plantes liées aux friches.



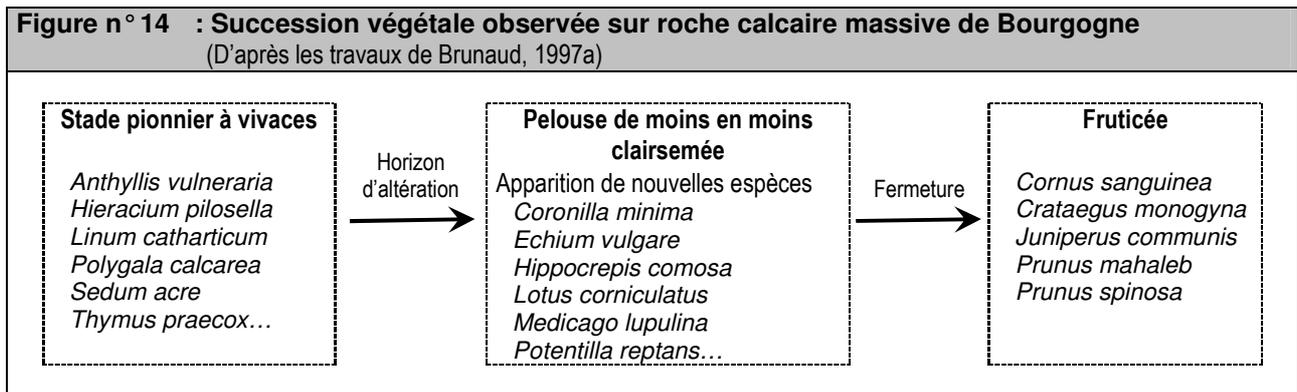
b - Succession sur calcaire compact

Dans les anciennes carrières de roche massive calcaire du nord Dijonnais étudiées par Brunaud (1997a), les différents stades évolutifs observés ont été rassemblés sur un même schéma à objet pédagogique (Figure n° 13). 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.



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 n° 14). 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.



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 n° 15).



c - Succession sur éboulis et verses

Sur les éboulis se développant parfois au pied des fronts de taille, plusieurs variantes de succession* végétale 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 (a, 1997). 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 graines et autres particules en pied d'éboulis par la végétation installée antérieurement. Les graines se fixent ainsi de plus en plus haut.

d - 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.

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 :

- après arrêt de l'activité de la carrière, ce qui correspond en général à l'arrêt des perturbations* du milieu, la végétation herbacée colonise de manière relativement uniforme l'espace (Figure n° 16C). Ce sont des pionnières dont la dissémination s'effectue surtout grâce au vent ;
- apparaissant plus tardivement, la végétation ligneuse avance de proche en proche, mode d'implantation des espèces à faible distance de dissémination. Cette végétation progresse de manière centripète (Figure n° 16A) depuis des milieux périphériques propices à l'implantation des ligneux comme les pieds de fronts et les merlons, sans oublier les éventuels boisements aux abords de la fouille. Mais des buttes terreuses et les abords de mares constituent également des foyers d'où s'amorcera une colonisation centrifuge (Figure n° 16B) ;
- des ligneux tels que le Bouleau verruqueux, le Peuplier noir, le Saule marsault échappent à cette règle de progression. Pionniers*, ils possèdent des fruits légers transportés par le vent et colonisent donc le carreau de la carrière de manière plus uniforme (Figure n° 16C).

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 (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.

Les successions animales

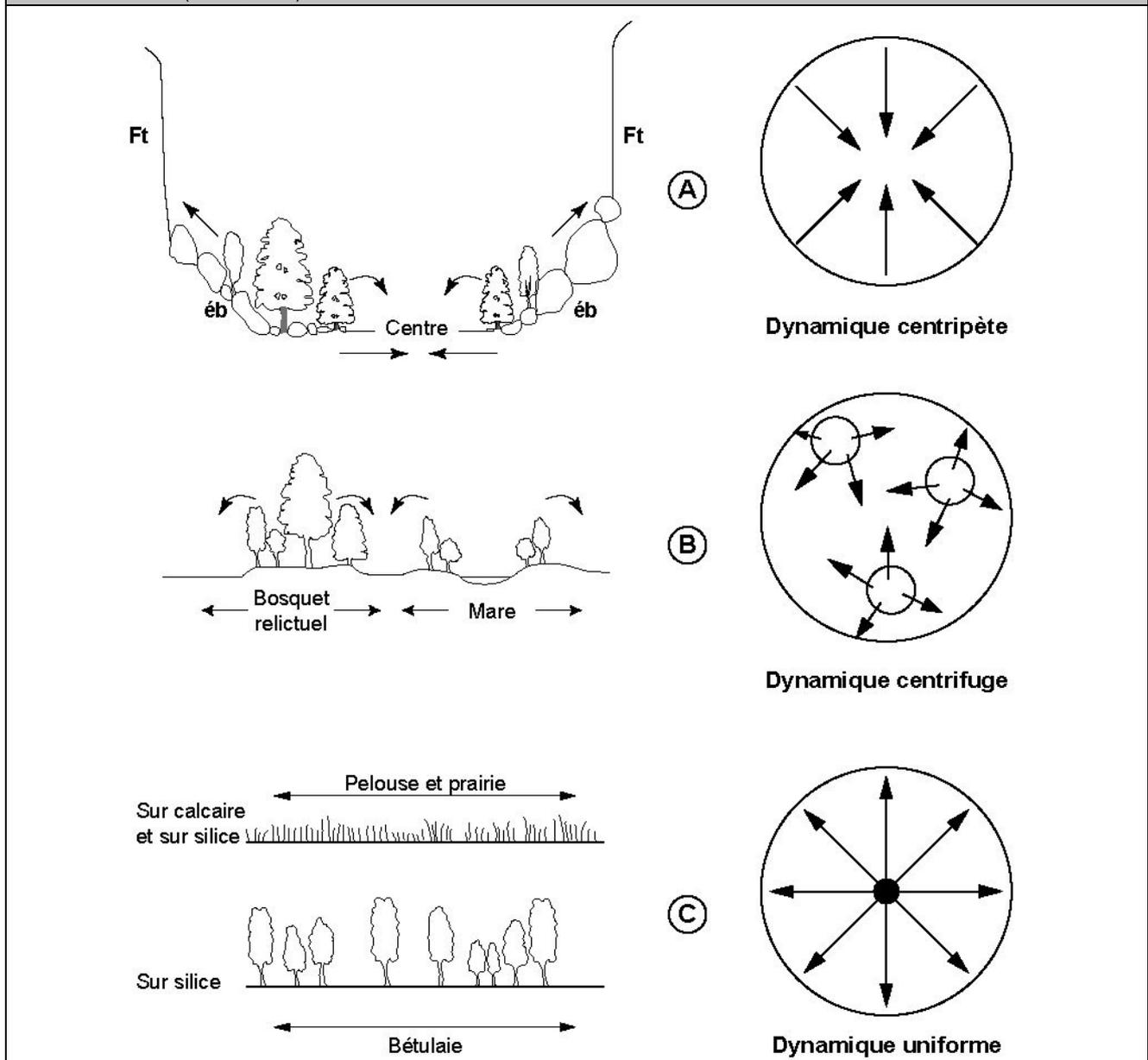
Principalement étudié à travers la végétation (Lepart & Escarre, 1983), le concept de succession* est développé également pour des approches faunistiques. Aucun exemple ne semble aborder le cas des carrières calcaires. La faune, excepté éventuellement quelques insectes, est davantage liée à la structure de la végétation (pelouse* ouverte, fermée, fourrés, strate arbustive, strate arborescente) qu'à la composition floristique. Ainsi, la nature calcaire 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 par Picaud & Petit (1998), Bonnet et al. (1997) et Brown (1984) pour les orthoptères, Galan (1997) pour les batraciens...

a - 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).

Figure n° 16 : Modèles de dynamique spatiale de la reconquête végétale des carrières de roche massive
(Boulet, 1996)



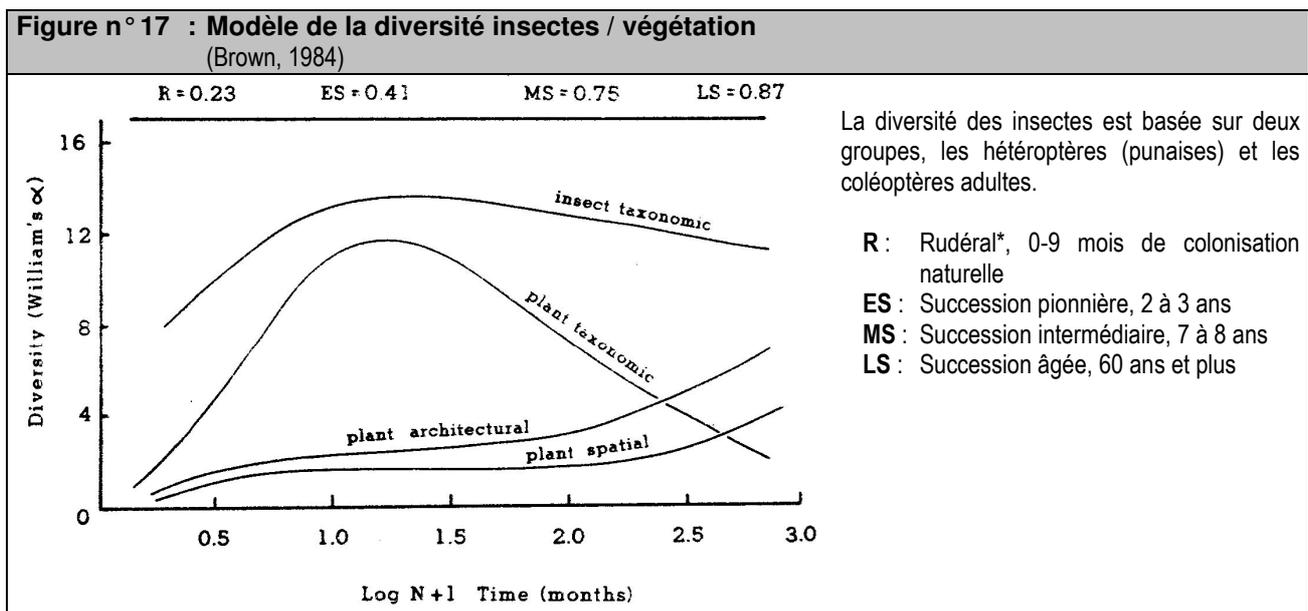
La végétation apparaît comme un élément central de la succession* écologique pour les insectes :

- **diversité végétale** : suite à l'étude de la recolonisation des haldes minières d'uranium du Limousin par les orthoptères², 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.

² Orthoptères : groupe d'insectes regroupant notamment les criquets et les sauterelles.

- **structure et architecture de la végétation** : Brown (1984) indique le rôle important de ce paramètre (Figure n° 17). 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.
- **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.



b - 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 donnent un aperçu (Tableau n° 6). 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 3 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 n° 6 : Evolution 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. <u>Batraciens</u> : 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, <i>Discoglossus galganoi</i> (+ 3) fréquente les sites herbeux. <u>Reptiles</u> : une seule espèce, <i>Podarcis bocagei</i> , 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 |
| AMPHIBIENS | | | | | | | | | |
| Nombre d'espèces | 0 | 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 8 | 10 |
| Nombre d'individus | 0 | 0 | 10 | 22 | 37 | 50 | 57 | 52 | 84 |
| REPTILES | | | | | | | | | |
| Nombre d'espèces | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 8 | 7 |
| Nombre d'individus | 0 | 3 | 9 | 22 | 28 | 23 | 18 | 31 | 28 |

c - 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 n° 18). Celui-ci suppose que la taille de la carrière n'est pas un facteur limitant.

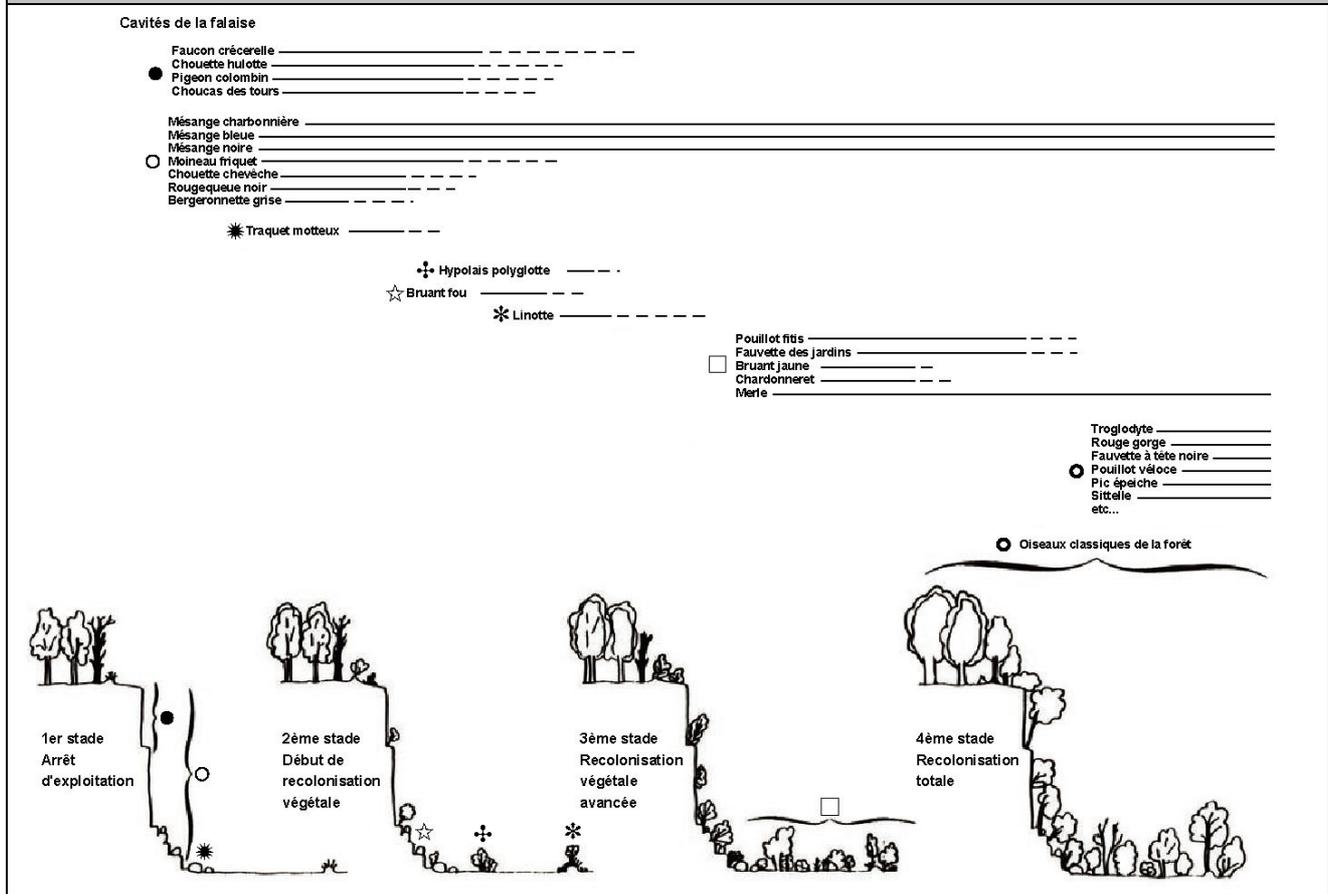
Chaque compartiment de la carrière se caractérise par un cortège aviaire spécifique. Les espèces inféodées aux falaises et aux autres milieux ouverts se maintiennent tant que la végétation ligneuse reste discrète. Avec la fermeture progressive du site, elles disparaissent rapidement pour laisser la place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

Cette évolution du peuplement se traduit par un gain en diversité ornithologique 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.

1.2.3. Les vitesses d'évolution

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 (100 ans), surtout lorsque celles-ci se trouvent en contexte forestier. La strate arbustive accompagne le passage de la strate herbacée à arborée.

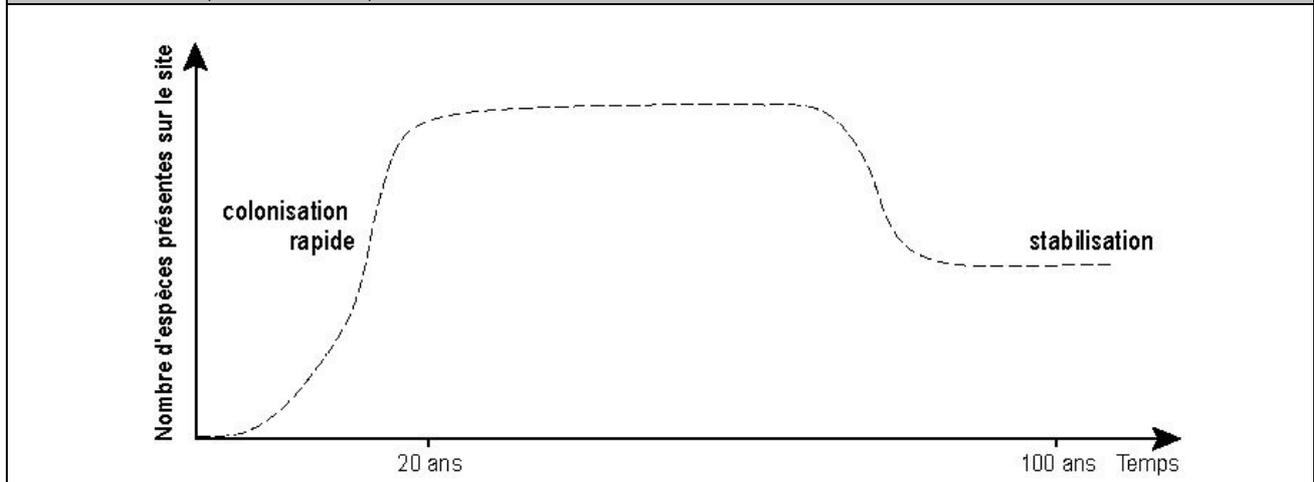
Figure n° 18 : Evolution théorique de l'avifaune d'une carrière de roche massive de l'est de la France
(Robert et al., 1991)



L'apparition des ligneux marque la fermeture du milieu. La durée de chaque stade est propre à chaque carrière. Selon le type de calcaire notamment, l'altération de la roche 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 n° 19). 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 n° 19 : Rythme de colonisation d'une carrière abandonnée
(Brunaud, 1997a)



1.2.4. Autres dynamiques écologiques

Ce « modèle » de succession* a de nombreuses limites car des « blocages » dans la succession* existent :

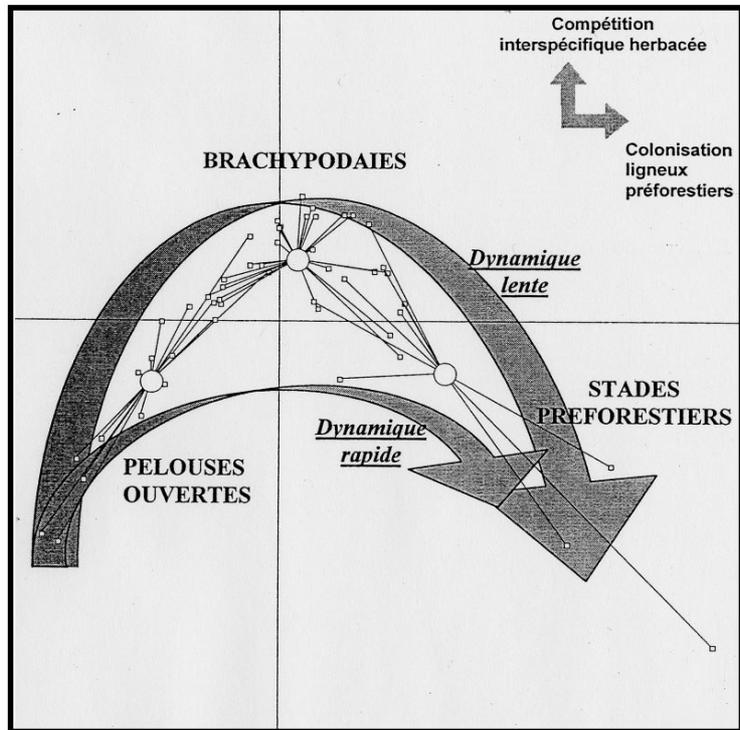
- la faune joue un rôle non négligeable en freinant la dynamique. Par le broutage, les lapins peuvent prolonger et maintenir l'état de pelouse* (Decocq, 1994 ; Dutoit, 1996). Brown (1984) démontre également l'action des criquets sur le ralentissement de la succession* végétale ;
- le Brachypode penné, une graminée sociable, peut 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...

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 20 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 de la France, une forme de « résistance » à l'évolution classique. Des pelouses* à Brachypode penné persistent en effet plusieurs années (Figure n° 20). 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 n° 20 : Interprétation du référentiel floristique dans un modèle statistique de la dynamique successionale de la végétation
(Alard, 2000)

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



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 n° 21). 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.

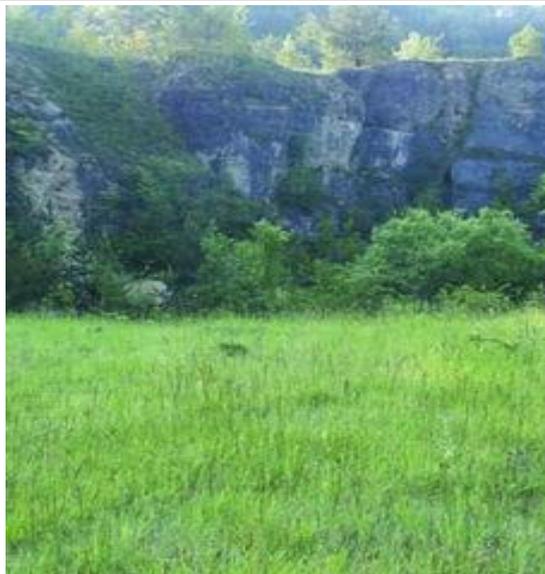
Aucun principe ou explication systématique n'est proposé par les auteurs. En les rapportant, ceux-ci justifient par contre la nécessité d'un suivi, d'une surveillance des sites, voire d'interventions anthropiques* pour éviter ces blocages de la dynamique écologique si ceux-ci paraissent contraires à 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 milieu 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 ; Figure n° 16B).

Figure n° 21 : Quelques exemples de colonisation en carrière calcaire
(photos ENCEM)



▲ Végétation pionnière ouverte à *Sisymbre couché* sur calcaire marneux en place en Ile-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 rocailles 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).

1.2.5. Les limitations

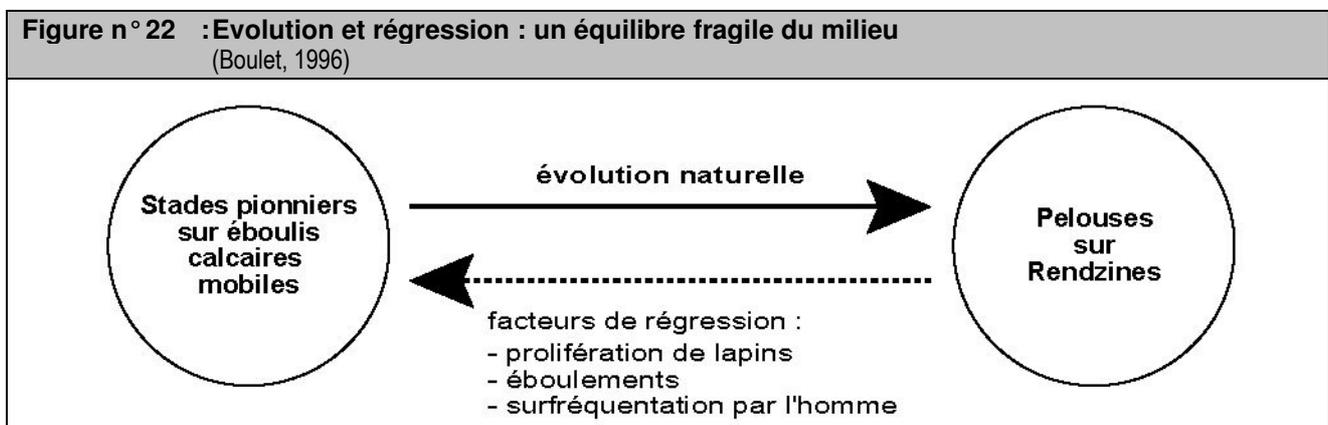
Les potentialités écologiques des carrières s'expriment parfois difficilement, limitées en cela par les phénomènes suivants :

- 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...

1.2.6. Le rôle des perturbations

Des événements aléatoires peuvent modifier le milieu (gel long, inondation, fréquentation occasionnelle intense type moto-cross, effondrement de terrains, éboulement...). Ils sont considérés par certains auteurs (Frochot, 2000) comme intéressants en terme d'écologie car ils « rajeunissent » un milieu déjà évolué et parfois en cours de fermeture. La productivité de l'écosystème s'en trouve stimulée. La succession* écologique redémarre aux stades pionniers* comme sur un milieu neuf (Arnal & Lamade, 1987).

Pendant l'exploitation, les rajeunissements du front de taille, les mouvements de matériaux sont souvent trop fréquents pour que la végétation se développe. Par contre, dès que ces « perturbations » deviennent plus occasionnelles, une population* pionnière s'installe et se renouvelle grâce à ces événements répétés.



Le mouvement des éboulis (Frain, 1991) et l'action des lapins (Boulet, 1996) peuvent présenter cet avantage (Figure n° 22). Seul le Bouleau parvient parfois à s'adapter à la mobilité du pierrier. Le broutage intensif par les lapins favorise un groupement à Polytric, bloquant toute dynamique de la végétation. Ceci peut être intéressant dans les situations où un milieu ouvert à pelouse* rase est recherché.

En fin d'exploitation, la carrière calcaire, 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, accumulation de litière, 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 (nature de la roche, 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 calcaire, le caractère aléatoire de la colonisation des premiers stades et l'environnement de la carrière pourvoyeur de semenciers. Mais les approches floristiques restent limitées géographiquement et écologiquement. 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. Bien qu'il n'existe pas d'étude de cas en carrière calcaire, la nature du substrat ne semble pas jouer un rôle fondamental.

PARTIE 2 : LA FLORE ET LA FAUNE DES CARRIERES CALCAIRES

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 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 calcaires 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 jouer ces carrières calcaires 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 roche calcaire est difficile à établir, compte tenu de leur grand nombre sur le territoire français et de la carence en observations scientifiques, homogènes et transposées par écrit, disponibles. Néanmoins 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.

Un assez grand nombre d'espèces colonise ces milieux de 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 nichoirs ; 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.

2.1 Les habitats des carrières calcaires

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.

2.1.1. Les formations végétales

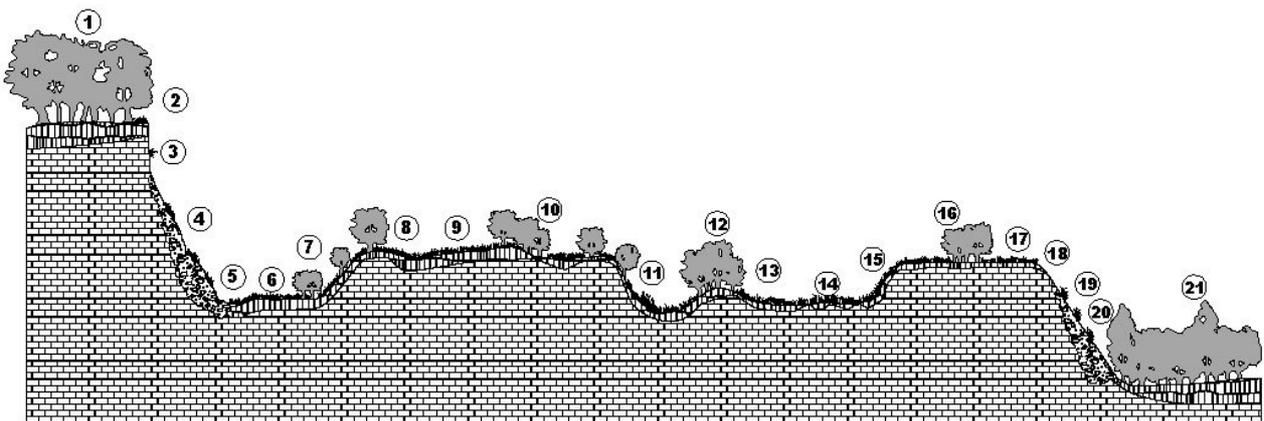
Depuis la roche nue jusqu'aux boisements, toutes les formations végétales sont envisageables, sans oublier les milieux aquatiques et humides, même si ces derniers sont en général peu fréquents et

rarement cités dans la littérature. 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.

Les seules approches 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 4 anciennes carrières de craie phosphatée du nord de la France dont la fin d'exploitation remonte à plus de 60 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 n° 23), induisant des conditions de milieux variées sur des distances réduites. L'action de l'homme, le pâturage par des animaux domestiques mais aussi sauvages (lapin) ont eu un rôle important dans le maintien des stades herbacés et donc dans la diversité constatée des formations végétales.

Figure n° 23 : Colonisation naturelle de la carrière Faucouzy (02)
(Decocq, 1994)



- | | |
|---|---|
| <p>1. Bois de plateau : phytocénose polysynusiale <i>Pruno avii - Fraxinetum excelsioris</i> (strate arborescente) <i>Rosa arvensis - Viburnetum lantanae</i> (strate arbustive) <i>Carici sylvaticae - Orchidetum purpureae</i> (strate herbacée)</p> <p>2. Manteau* : <i>Tamo communis - Viburnetum lantanae</i></p> <p>3. Front de taille relictuel</p> <p>4. Pierrier mobile : « groupement à <i>Lactuca perennis</i> et <i>Hieracium maculatum</i> »</p> <p>5. Bord de chemin : <i>Galio veri - Trifolietum repentis</i></p> <p>6. Chemin peu fréquenté : <i>Medicagini lupulinae - Cynosuretum cristati</i></p> <p>7. Mosaïque ourlet / hallier</p> <p>8. Ourlet sur sol décalcifié : « groupement à <i>Calamagrostis epigeios</i> et <i>Centaurea decipiens</i> »</p> <p>9. Pelouse de plateau : <i>Pastinaco sativae - Caricetum flaccae</i></p> <p>10. Hallier à <i>Cornus sanguinea</i> et <i>Rosa micrantha</i></p> <p>11. Ourlet : <i>Centaureo nemoralis - Origanetum vulgaris</i></p> | <p>12. Manteau* : « groupement à <i>Salix caprea</i> et <i>Prunus avium</i> » 13. Ourlet semi-sciaphile : « groupement à <i>Brachypodium sylvaticum</i> »</p> <p>14. Pelouse du fond de carrière : <i>Pastinaco sativae - Caricetum flaccae</i></p> <p>15. Faciès bryolichenique du <i>Pastinaco - Caricetum</i></p> <p>16. Hallier à <i>Cornus sanguinea</i></p> <p>17. Ourlet à <i>Inula salicina</i></p> <p>18. Replat xérique à <i>Thymus praecox</i> et <i>Orobanche alba</i></p> <p>19. Pseudo-éboulis : complexe bi-synusial <i>Picrido hieracioidis - Carlinetum vulgaris</i> (synusie hémicryptophytique) <i>Galeopsio angustifoliae - Teucrietum botrydis</i> (synusie thérophytique)</p> <p>20. Manteau* eutrophe* : « groupement à <i>Sambucus nigra</i> »</p> <p>21. Bois du fond de carrière : phytocénose polysynusiale <i>Pruno avii - Fraxinetum excelsioris</i> (strate arborescente) <i>Ulmo minoris - Sambucetum nigrae</i> (strate arbustive) « groupement à <i>Epipactis helleborine</i> et <i>Geum urbanum</i> » (strate herbacée)</p> |
|---|---|

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).

2.1.2. Les habitats floristiques remarquables

Un « habitat » se définit comme une combinaison de paramètres abiotiques et des formations végétales associées. Il faut l'entendre ici comme biotopes* ou milieux de vie pour la faune et la flore (et non dans le sens de la typologie CORINE Biotopes de la directive européenne Habitats). Parmi les habitats floristiques décrits dans les quelques travaux traitant des formations végétales rencontrées en carrières calcaires, certains 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) :

Eboulis crayeux de basses altitudes du *Leontodontion hyoseroidis* Duvignaud, Durin et 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 4 plantes endémiques de haut intérêt patrimonial : *Iberis violetii*, *Iberis durandii*, *Viola cryana* (plante considérée aujourd'hui comme disparue), *Viola hispida*.

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 marno-calcaire 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. et Moor 38 : issues généralement 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 groupement (Figure n° 24). 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 favorisé 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 et 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 n° 24 : Exemple d'une pelouse sèche à Brome érigé en carrière
(photo ENCEM)

Pelouse* à Brome érigé âgée de moins de 20 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



2.2. La flore des carrières calcaires

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 discrétion de ces végétaux, 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. C'est ainsi que 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.

2.2.2. Les végétaux vasculaires

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

Si Paillat (2001), s'appuyant sur les travaux de Boulet (1996), déplore la relative pauvreté des carrières siliceuses du Massif armoricain, il semble qu'il en soit tout autrement pour leurs homologues calcaires. L'analyse des documents disponibles met en lumière une richesse floristique significative, notamment du point de vue des espèces 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, rocailles...) 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 chanfreins³, 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. Les quelques exemples qui suivent donnent un aperçu du caractère remarquable, voire exceptionnel de ces biotopes*.

Les études des carrières de Bourgogne par Brunaud (1997a) et Frochot et al. (2000) 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.

- Genêt hérissé (*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 écus (*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.
- Héliantheme 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).

³ 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 calcaricoles, rare et protégée en France, visée par l'annexe n° 2 de la directive Habitats (Figure n° 25). 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 Ile-de-France, située en limite ouest de son aire de répartition (ENCEM, DIREN Ile-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).
- **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).

Figure n° 25 : 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 Ile-de-France.



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 Séslerie 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 (ENCCEM, communication orale).
- Lin français (*Linum leonii*) : plante rare en France recolonisant des pelouses* de la carrière de la Chalandruie 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 defloratum*), 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 (ENCCEM, 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 n° 26). Plusieurs carrières du nord de la France sont ainsi citées pour leur richesse en orchidées en Champagne-Ardenne (Millarakis & Parent, 1995), en Lorraine (ZNIEFF ; ENCCEM, 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)...
- Héliantheme à feuilles de saules (*Helianthemum salicifolium*) : plante méditerranéenne, citée de longue date dans une ancienne carrière du Loir-et-Cher (Maubert, à paraître).

Les messicoles

Plusieurs messicoles et adventices des cultures sur sols calcarifères sont en forte régression sur le territoire national avec le développement de l'agriculture intensive. A 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*), Calépine irrégulière (*Calepina irregularis*), Vesce de Hongrie (*Vicia pannonica*), la Fumeterre de Vaillant (*Fumaria vaillanti*).... L'importance de ce rôle est soulignée par Decocq (1994) et Thievent (1993a).

Figure n° 26 : Quelques orchidées relevées en carrières calcaires

(Photos ENCEM)



Orchis pourpre



Ophrys litigieuse



Ophrys mouche



Platanthère verte



Orchis homme-pendu



Céphalanthère à larges feuilles

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 (Lecoite, 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. 15 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 3 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 (ENCEM, 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* calcaires 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 (ENCEM, communication orale).
- Fougère des marais (*Thelypteris palustris*) : noté dans une ancienne carrière de chaux en Ardenne (Peresson & Grangé, 2000).

2.3. La faune des carrières calcaires

2.3.1. Les invertébrés

Mal connus et très nombreux, les invertébrés sont rarement 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 Thinon (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 n° 7).

| Tableau n° 7 : Nombres d'invertébrés mentionnés dans les carrières calcaires (Sauveterre, 1985) | | |
|--|--------------|----------------------|
| REGION | JURA | MEDITERRANEE |
| Mollusques | 12 espèces | 14 espèces |
| Arachnides | - | 27 espèces |
| Myriapodes | - | 38 espèces |
| Insectes | Hyménoptères | 55 espèces aculéates |
| | Coléoptères | - |
| | Lépidoptères | 49 espèces |
| | Collembolés | - |
| | Orthoptères | 21 espèces |
| | Hétéroptères | - |
| | Hémiptères | - |
| 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 *Trochoïdea 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

Ils occupent la plupart des niches écologiques d'une carrière depuis les stades pionniers* des dalles calcaires 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 (Burlé, 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 régalaage de terre fait chuter la diversité et disparaître les espèces les plus intéressantes.

Les Lépidoptères (papillons) ont une grande capacité de déplacement et peuvent occuper des milieux variés, chaque espèce occupant un faciès bien défini. En 3 ans d'observation (Robert et al., 1991), plus de 100 espèces ont été identifiées, dont quelques-unes jamais observées dans la région. L'Ecaïlle noire et blanche n'est ainsi connue qu'en 4 sites en Franche-Comté, tous correspondant à des carrières abandonnées depuis la fin du XIX 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 50 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.

La présence d'eau élargit la gamme des potentialités avec la reproduction potentielle de nombreuses libellules et autres insectes aux mœurs 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 batraciens

L'intérêt batrachologique d'un site dépend avant tout de sa capacité d'accueil en période de reproduction. C'est en effet à cette période que les amphibiens, jusque là 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. 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, mais dès qu'un milieu aquatique, même temporaire, est présent, 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 calcaires.

Les espèces de batraciens notées en carrières calcaires reflètent des écologies variées :

- **Espèces pionnières préférant les petites 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 calcaires, 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 ; ENCEM, 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 optimum à son installation.

A 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 calcaires, liées en général à un environnement plus sec.

Figure n° 27 : Quelques batraciens cités en carrières calcaires 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 ponctué 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), 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 calcaire sont peu nombreuses (Nivernais, 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 mœurs peu aquatiques : Crapaud commun, Triton palmé, Triton alpestre, Triton commun, Grenouille agile, Grenouille rousse.** A 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 mœurs 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 calcaires 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 et Pélodyte ponctué sont les batraciens les plus régulièrement cités en carrières calcaires. 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 (5 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.

2.3.3. 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 calcaires par rapport à leur environnement immédiat, alliées à des habitats rocheux et des caches variées, sont favorables à plusieurs reptiles de France. Mais leur grande discrétion rend difficile leur observation. Les citations dans la littérature sont peu fréquentes (Figure n° 28). 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 n° 28 : 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*)

Seps strié (*Chalcides chalcides*)

Couleuvre de Montpellier (*Malpolon monspessulanus*)

Lézard vert (*Lacerta viridis*)

Coronelle lisse (*Coronella austriaca*)

Couleuvre verte-et-jaune (*Coluber viridiflavus*)

Lézard ocellé (*Lacerta lepida*)

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...

2.3.4. Les oiseaux

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 calcaires peuvent ainsi jouer deux rôles :

- le premier et de loin le plus important est l'accueil d'oiseaux pour la reproduction. A 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 repaires.

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.

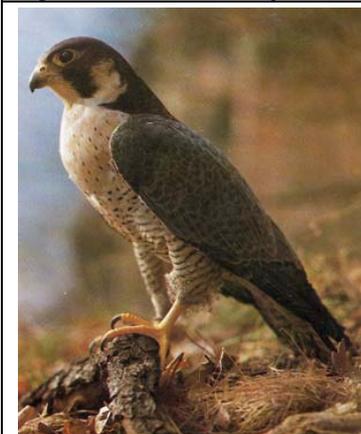
Les oiseaux nicheurs

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.

Les biotopes* à dominante minérale de la carrière tels que les falaises, les talus rocailloux et les éboulis attirent le cortège d'oiseaux le plus original. Celui-ci peut se scinder en trois ensembles :

- **Espèces rupestres*** : elles recherchent les vives 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 n° 29) et le Grand corbeau sont les plus régulièrement cités. 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). Le Faucon pèlerin, plus rare et médiatique, est moins cité en carrières (Figure n° 29). Il y est cité dans le Lot (Office National de la Chasse et de la faune Sauvage, 2002), en Picardie (ENCSEM, communication orale), en Rhône-Alpes (LPO Haute-Loire, communication orale), en Alsace (ENCSEM, communication orale) ou en Limousin (SEPOL, communication orale). 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 n° 29 : Quelques oiseaux cités en carrières calcaires



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

▲ **Faucon pèlerin** : oiseau rupestre* emblématique assez rare, présent dans des carrières du Quercy, du Boulonnais...



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

▲ **Merle de roche** : oiseau méditerranéo-montagnard peu commun, inféodé aux rocailloux 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 calcaires 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 n° 29). 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 (ENCCEM, communication orale).

Pour le Faucon pèlerin, dont les conditions d'installation en carrière 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.

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 accueillant simultanément ou séparément le Hibou grand-duc, le Grand corbeau et le Faucon pèlerin, en donnent un exemple (Office National de la Chasse et de la faune Sauvage, 2002 ; ENCCEM, 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. Moins fréquente, est l'utilisation des falaises taillées dans les stocks de matériaux fins par l'Hirondelle de rivage (ENCCEM, 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 (ENCEM, 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 n° 18). 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.

Les faciès herbacés des carrières 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'Oedicnème criard, sont toutefois signalées dans l'ouest de la France et en Champagne-Ardenne (fiches ZNIEFF ; ENCEM 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.

Les faciès buissonnants et forestiers apparaissant en carrière 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 philomèle, Pinson des arbres, Rouge-gorge familial, 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.

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.

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 (micro-mammifères 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.

2.3.5. Les mammifères

Les potentialités des carrières calcaires 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.

Les chauves-souris

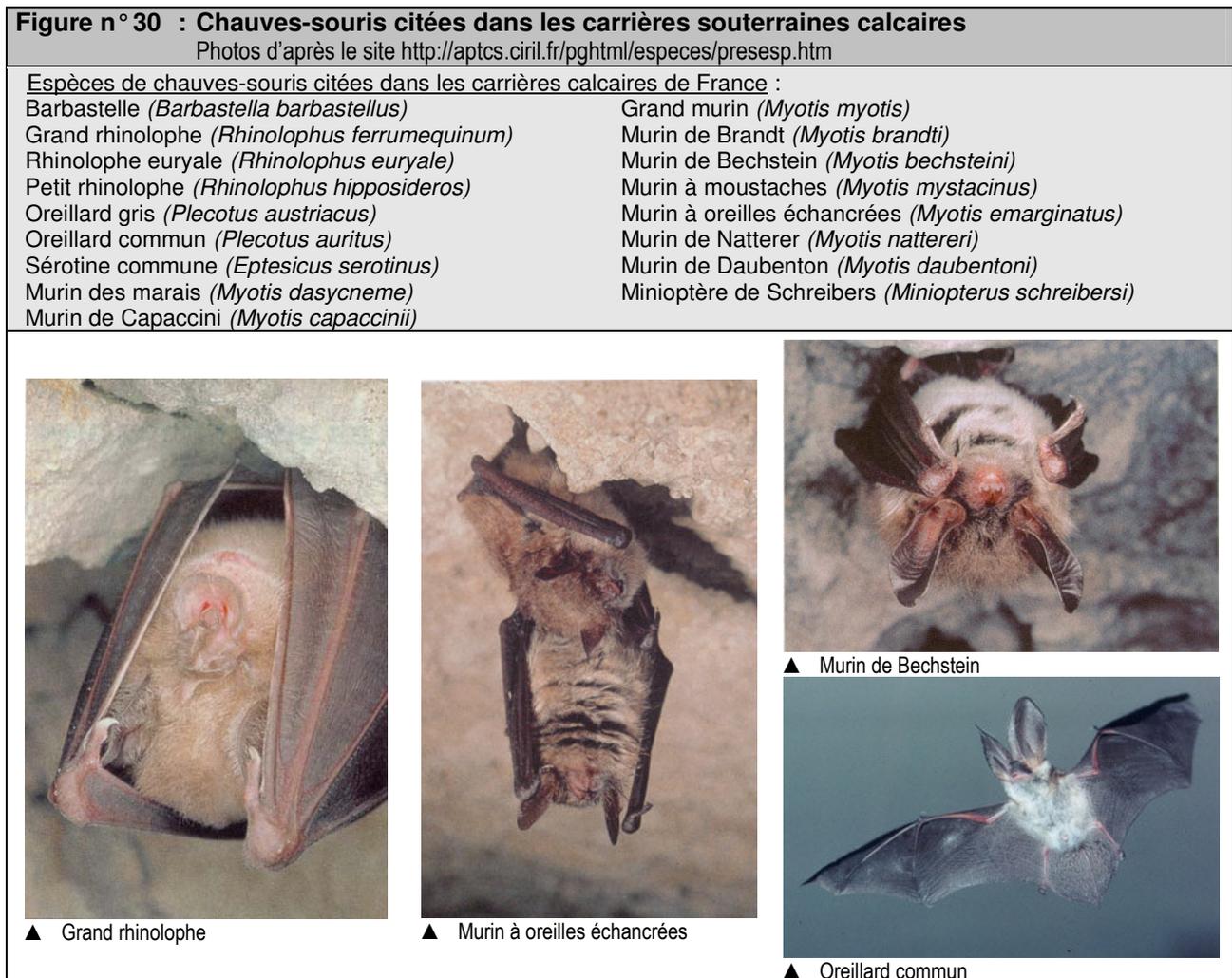
Les chauves-souris sont des espèces sensibles, menacées et rares en France pour une majorité d'entre elles. Toutes sont protégées sur le territoire national et la moitié est concernée par la directive Habitats. Vis-à-vis de ces animaux, les carrières souterraines de pierre de taille offrent des milieux 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 n° 30). 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.

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).

Les autres mammifères

A 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

Robert (Robert et al., 1991) conclut 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 calcaires. Celui-ci est différent d'un site à l'autre selon les caractéristiques de la carrière.

Si le nombre d'espèces et la part des espèces peu communes sont les composantes essentielles de ce potentiel écologique, 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. Ces milieux de surface limitée ne peuvent nourrir que de petites populations* animales. Par contre, ils offrent à des espèces capables de se déplacer et de prospecter l'environnement de la carrière pour trouver le complément de nourriture, 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 ce mode d'organisation (Frochot, 1993). A l'échelle du paysage, cet auteur conclut que l'ensemble « carrière + son environnement » présente une productivité intéressante.

L'aperçu du patrimoine floristique et faunistique recensé en carrières calcaires et résumé dans le tableau qui suit (Tableau n° 8) montre l'enjeu important que revêtent ces sites dans la préservation, le maintien, voire le développement de la biodiversité. Elles 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 calcaires doit être apprécié à l'échelle du paysage comme une complémentarité : zone refuge, zone de reproduction, aire de nourrissage, zone d'hivernage, territoire relais.

| Tableau n° 8 : Synthèse des potentialités biologiques des carrières calcaires | | |
|---|--|---|
| MILIEU DE LA CARRIERE | FLORE | FAUNE |
| FRONTS | Pas de potentialité avérée | <p>Potentiel fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <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*. · <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 FREQUENT) | Pas de données | <p>Potentiel fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Oiseaux</u> : nidification du Guépier d'Europe et de l'Hirondelle de rivage, espèces typiques et peu communes des falaises de sables. |
| ÉBOULIS, TALUS CAILLOUTEUX, ROCAILLES | <p>Potentiel très fort : 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).</p> | <p>Potentiel fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Oiseaux</u> : nidification dans les cavités d'oiseaux peu communs à rares (Merle de roche, Merle bleu, Huppe fasciée, Traquet motteux...). · <u>Invertébrés</u> : habitats pour divers espèces pionnières (criquets, arachnides...), mais connaissances à préciser. · <u>Reptiles, batraciens et mammifères</u> : caches et abris potentiels. |
| PELOUSES* | <p>Potentiel fort : 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</p> | <p>Potentiel assez fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Oiseaux</u> : quelques espèces d'intérêt patrimonial peuvent se reproduire dans ces pelouses (Pipit rousseline et Oedicnème criard). Mais conditions optimales rarement réunies (taille réduite, envahissement par les ligneux). · <u>Reptiles, batraciens et mammifères</u> : terre de nourrissage pour de nombreuses espèces vivant au sein de la carrière ou venant de l'extérieur. · <u>Invertébrés</u> : richesse entomologique (criquets, papillons...), mais connaissances à préciser. |
| FOURRES | <p>Potentiel faible : La fermeture du couvert végétal réduit considérablement la diversité et l'originalité floristiques.</p> | <p>Potentiel assez faible : Aucune espèce patrimoniale particulière n'est liée 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... Denses et uniformes, l'intérêt des fourrés est généralement très médiocre.</p> |
| BOIS | <p>Potentiel faible : La diversité et l'intérêt floristiques baissent. Quelques plantes peu communes de la famille des pyroles sont occasionnellement rencontrées. Les boisements ombragés (exposition nord) peuvent présenter un intérêt pour des fougères.</p> | <p>Potentiel faible : 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.</p> |
| MILIEUX HUMIDES | <p>Potentiel assez fort : 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.</p> | <p>Potentiel fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <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 calamité), d'autre part sur le nombre parfois élevé d'espèces susceptibles de se reproduire. · <u>Invertébrés</u> : habitat potentiel pour les libellules, mais les connaissances sont à approfondir. · <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 CARRIERES SOUTERRAINES | Potentiel nul | <p>Potentiel très fort :</p> <ul style="list-style-type: none"> · <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 CARRIERE | <p>Potentiel à déterminer : 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.</p> | <p>Potentiel à déterminer : Possibilité de reproduction d'Hirondelle de rivage sur des stocks de matériaux fins, mais situation peu fréquente. Possibilité de reproduction de batraciens dans les bassins de décantation, mais là encore situation peu rencontrée.</p> |

PARTIE 3 : LES FACTEURS DE LA DIVERSITE ECOLOGIQUE DES CARRIERES CALCAIRES

3.1. Origine du potentiel écologique des carrières calcaires

La majorité des auteurs analysés donnent des exemples du potentiel écologique des carrières calcaires. 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).

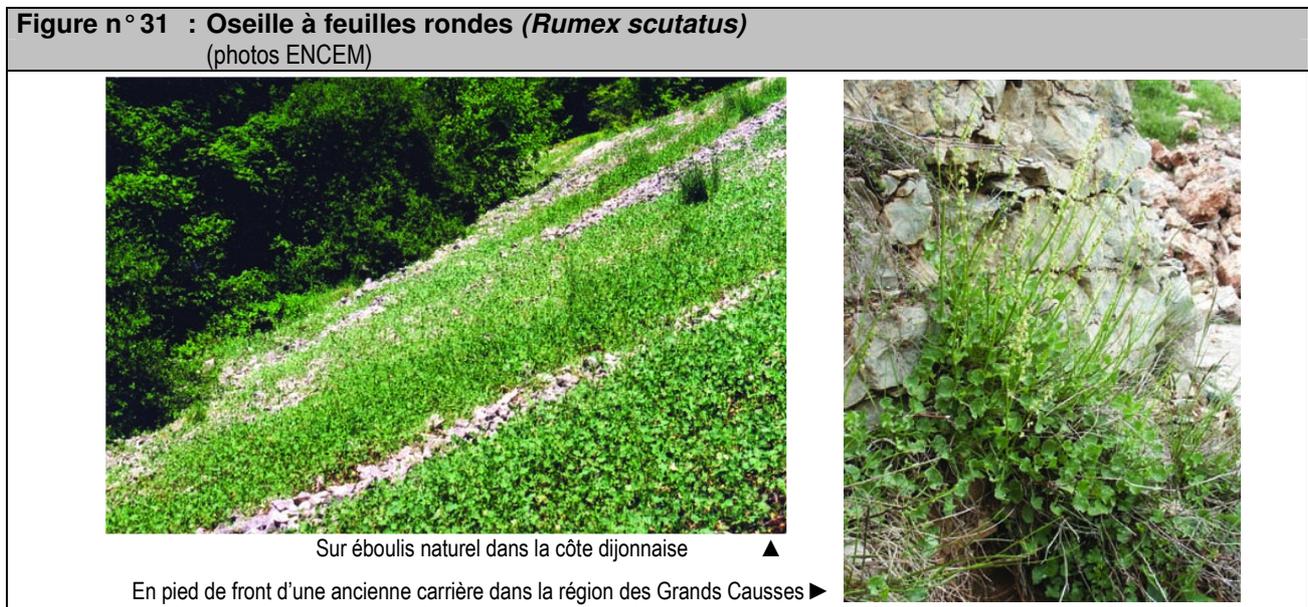
Ces deux caractéristiques de la carrière calcaire se déclinent de la façon suivante :

- les carrières calcaires 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 ronde (*Rumex scutatus*) aux éboulis instables et son rôle dans la stabilisation progressive des terrils du nord de la France (Figure n° 31). 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 phyto-géographique 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 Guépier 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).

➤ 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 phyto-génétiques (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'ambrosie), économique (plantes résistante 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 naturalisés 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 calcaires

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 (Paillat, 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*. 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. Une typologie des habitats présents en carrière calcaire tente, au dernier chapitre, de décrire les principales combinaisons de facteurs.

Decocq (1994) présente l'écologie des différentes carrières qu'il étudie comme résultant de l'action simultanée de facteurs. L'influence de ceux-ci peut être généralisée aux carrières de roches calcaires :

- édaphiques : sols et sous-sols fournissent un support physique à la végétation et une source de nutrition ;

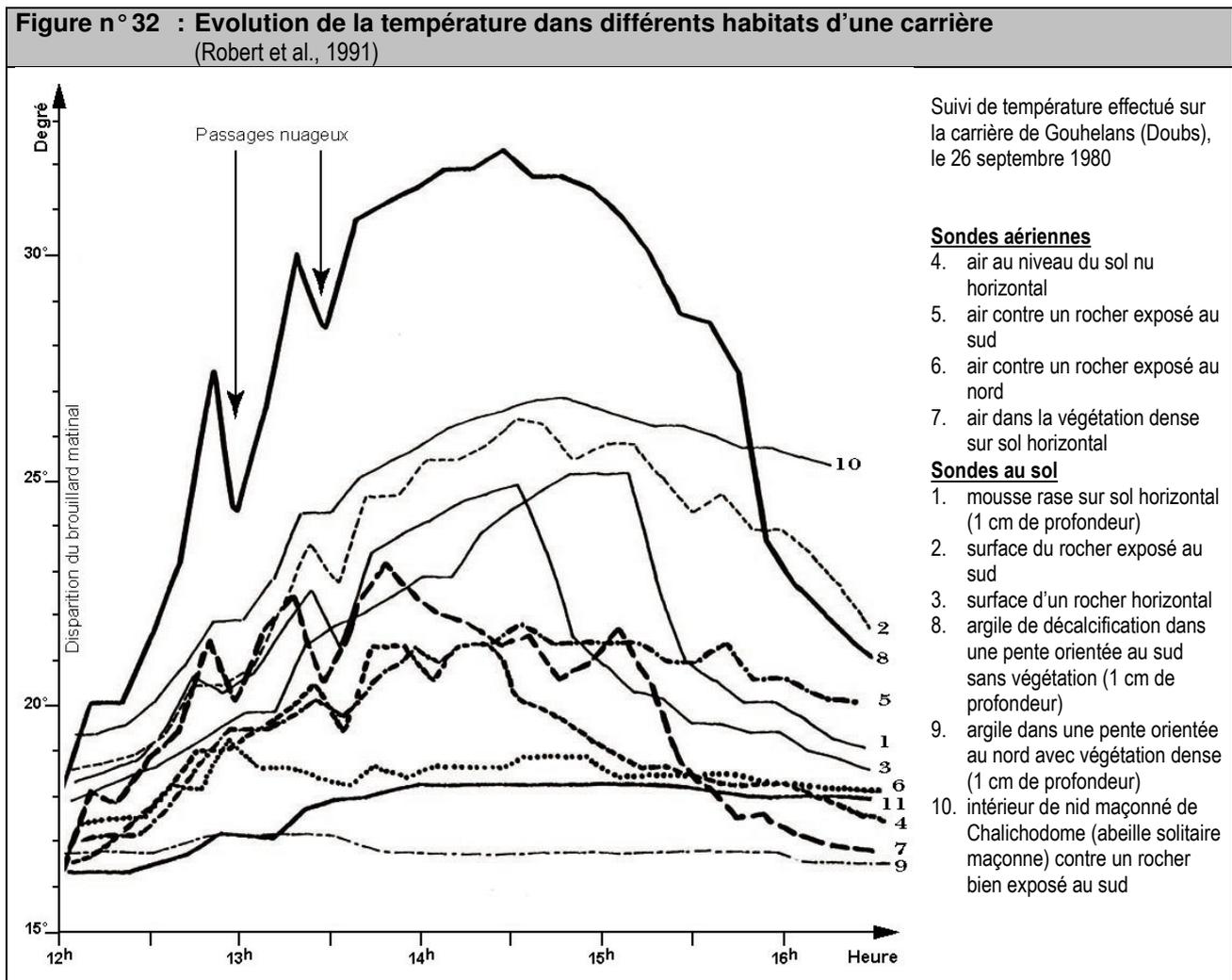
- climatiques : températures (moyennes et extrêmes), vents, luminosité influencent le cycle et la répartition des plantes. Ces facteurs se modifient avec la topographie du site ;
- biotiques : au fur et à mesure de la colonisation d'un site, les êtres vivants installés modifient les conditions d'accueil du milieu. L'ombrage apporté par les premiers arbustes crée par exemple un phytoclimat propice à l'installation 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.

3.2.1. Facteurs climatiques

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. Le caractère « sécheresse » **différencie 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.

Des microclimats sont observés en carrière de roche massive : 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-après (Figure n° 32), 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.

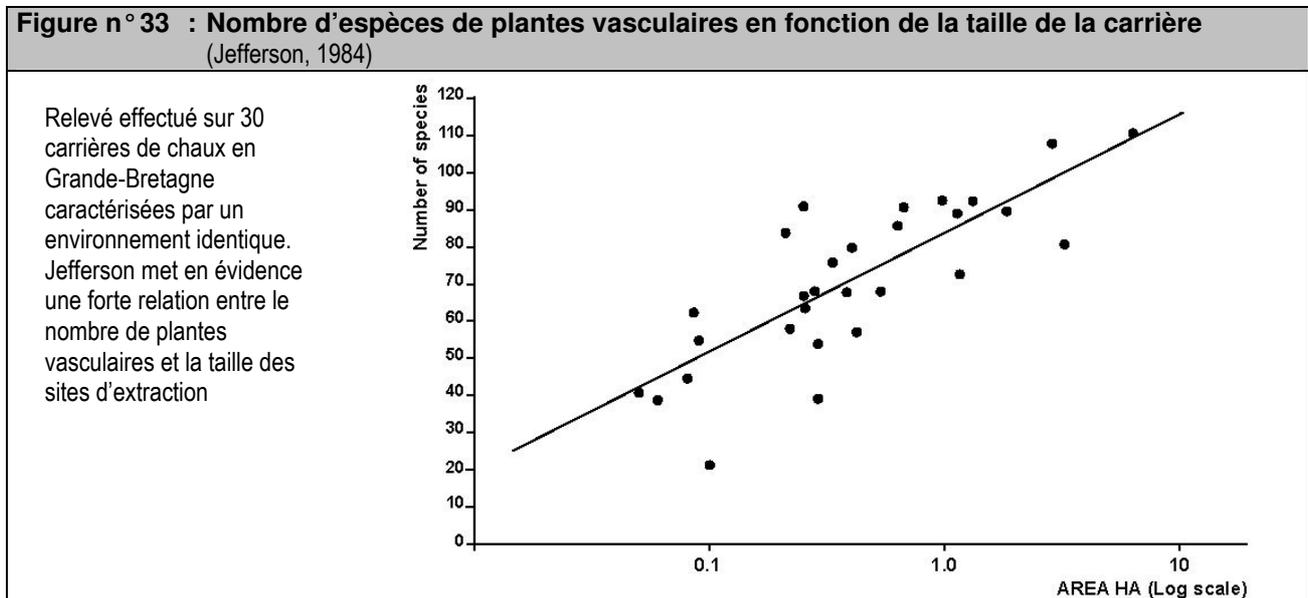
Le **caractère méridional** des carrières calcaires est remarqué dans toutes les régions géographiques. Il est d'autant plus marqué que les fronts de taille sont hauts, de couleur blanche et en forme de cirque, concentrant les rayons solaires (Sauveterre, 1985).

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.

3.2.2. Facteur « superficie de la carrière »

Les surfaces des différents milieux offerts par la carrière jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement écologique du site (Paillat, 2001). En effet, la superficie de chaque habitat et leur agencement spatial répondent plus ou moins aux exigences territoriales, trophiques et spatiales des espèces colonisatrices potentielles. Le nombre d'espèces capables de coloniser un site dépend de sa

taille, selon certains auteurs associant la carrière à un site isolé (Gray, 1982 ; Park, 1982 ; Jefferson, 1984) (Figure n° 33).



Ce principe est cependant contredit par Hodgson (1982) et Boulet (1996) qui rappellent le rôle de l'environnement de la carrière comme potentiel d'espèces colonisatrices.

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) et des surfaces complémentaires dans l'environnement. 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).

La surface limite par ailleurs 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).

3.2.3. Facteur « granulométrie et nature du substrat »

Peu d'informations 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.

3.2.4. Facteur « environnement de la carrière »

Plus les sources de diaspores⁴ 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). A 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.

Pour des espèces à grands rayons d'action et territoriale 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) montre ainsi l'importance du facteur éloignement pour le site occupé le plus proche.

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 rocaillie, 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

⁴ Diaspore : tout organe de propagation des plantes (fruit, graine, partie végétative de la plante...).

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 riches en parois, la reproduction du faucon en situation naturel 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.

3.2.5. Facteur « âge 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). Selon le 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 (Figure n° 19), elle augmente d'abord avec le temps, jusqu'à environ 50 ans, se stabilise, puis diminue vers 100 à 150 ans (Brunaud, 1997a). Cette caractéristique des successions* écologiques est soulignée par plusieurs auteurs (Frochot & Godreau, 1995 ; Boulet, 1996).

Pour la faune, des évolutions analogues sont relevées. La colonisation d'anciennes mines du Limousin par les criquets passe par un pic 2,5 ans après la réaffectation des sites, puis diminue avant de se stabiliser au bout de 4 à 5 ans (Picaud & Petit, 1998). 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).

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...).

La structuration de la végétation en plusieurs strates (muscinale, herbacée, arbustive, arborescente) marque une évolution qualitative des biocénoses* : le nombre d'espèces de gastéropodes, d'orthoptères⁵, de coléoptères ou d'hétéroptères⁶ augmente avec l'âge (Sauveterre, 1985 ; Brown, 1984) alors que, pour les hyménoptères aculéates (guêpes, fourmis, abeilles), les carrières jeunes de Franche-Comté sont plus riches que les plus anciennes (Robert et al., 1991).

⁵ Orthoptères : famille des criquets, grillons et sauterelles

⁶ Hétéroptères : famille des punaises

3.2.6. Facteur « sinuosité de la carrière »

L'influence de ce facteur est bien soulignée pour les gravières en eau avec le linéaire de berges (Kovacs et al., 2001). Il est évoqué par Sauveterre (1985) pour les carrières de roches massives mais son rôle et son influence ne sont pas analysés.

Par « sinuosité » est évoqué le rapport périmètre de la carrière / surface de la carrière. Plus ce 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.

3.2.7. Facteur « modalités d'exploitation »

Les modalités d'exploitation de la carrière jouent sur les transports, les mouvements de matériaux, l'utilisation ou non de tirs de mines, l'émission de poussières. Or plusieurs observateurs rapportent que les espèces végétales et animales pionnières colonisent le site dès les premières phases d'exploitation. Les végétaux s'implantent au gré des mouvements de matériaux, disparaissent à l'occasion de reprise d'exploitation ou autre manipulation d'engins, puis reviennent... Les dépôts de poussière ralentissent le développement des lichens (Loppi & Pirintsos, 2000) ou limitent la consommation des feuilles par les Orthoptères.

La saison du dernier remaniement avant l'interruption définitive de l'extraction favoriserait l'espèce végétale qui dissémine ses diaspores à ce moment (Sauveterre, 1985). Ainsi s'expliqueraient des populations* monospécifiques de Saules ou d'érables dans un environnement pourtant diversifié.

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. 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.

3.2.8. Facteur « fréquentation humaine, pression anthropique »

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). Les chasseurs considèrent souvent une carrière comme « réserve de chasse » pour lièvres et lapins. Les espèces de rapaces ne fréquentent plus un site dès qu'il est trop souvent envahi par des adeptes de loisirs de grand air (promenade, VTT, varappe...).

Par ailleurs, l'Homme et ses engins mécanisés ont été identifiés comme vecteurs potentiels lors de la colonisation des sites : fruits ou graines collé(e)s sous des semelles de chaussures, 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.

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.

3.2.9. Facteur « région biogéographique »

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 rocailles arides, dont l'aspect reste assez proche de l'aire minérale que crée la carrière.

Les facteurs de variabilité identifiés en carrières calcaires d'après les travaux de divers auteurs (Sionneau, 1993 ; Brunaud, 1997a...) sont les suivants :

Descripteurs physiques de la carrière

- superficie ;
- altimétrie : profondeur de fosse, hauteur de front de taille ;
- mode d'exploitation : à flanc de coteau, en fosse, date de fin d'exploitation, ébranlements dus aux tirs... ;
- présence d'eau : ligne de sources, profondeur de la nappe, drainage du site ;
- la roche calcaire :
 - . nature chimique : pH, cations Mg/Ca, impuretés, dureté,
 - . structure : organisation des couches, épaisseur, alternance, fissuration, pendage, stabilité,
 - . texture : granulométrie, présence de bancs marneux ;
- microclimat : expositions au soleil, aux vents.

Contexte environnemental :

- occupation du sol alentour ;
- repérage biogéographique* : région naturelle, axes migratoires, autres milieux semblables ;
- macroclimat : pluviométrie, ensoleillement, gel ;
- fréquentation par l'Homme : usages de la carrière, intensité du piétinement, apports de matériaux...

Les valeurs prises par ces facteurs constituent la « carte d'identité » de chaque carrière. Les habitats et les biocénoses* de la carrière en dépendent.

L'influence de chacun n'est pas toujours mise en évidence, ces facteurs étant toujours imbriqués dans des combinaisons multiples, d'un site à l'autre. Le rôle joué par certains d'entre eux, comme par exemple l'environnement de la carrière ou le type de roche calcaire (couleur, nature chimique, texture...), reste très intuitif.

3.3. Ce qui les distingue des autres carrières

Les carrières de roche calcaire se distinguent des autres carrières du fait de caractères écologiques propres. Elles sont différentes des carrières en eau, de type gravières, exploitant un gisement alluvial, d'une part ; et des carrières de roches massives de nature siliceuse, telles que celles du Massif armoricain, d'autre part.

➤ Carrières calcaires / carrières en eau

Les gravières sont 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. Mais la richesse biologique est limitée à ces quelques espèces qui envahissent le site (Kovacs et al., 2001).

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.

➤ Carrières calcaires / carrières siliceuses (roches massives)

Les roches exploitées dans le Massif armoricain, par exemple, sont de nature acide du fait de la silice qu'elles contiennent. Elles induisent la présence d'espèces végétales différentes de celles des milieux calcicoles*. Des groupements* végétaux de nature acidiphile* (pelouses* sur silice, landes) se développent sur schistes, grès et granites. 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 plus lente. Les cortèges floristiques décrits par les naturalistes (Boulet, 1996) répondent aux propriétés acides des roches, des sols et de l'eau. Les pelouses* siliceuses et les landes se distinguent nettement des groupements plus calcicoles*.

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 un support 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 le premier cas, 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.

Pour le second cas, 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 calcaires se distinguent des autres types de carrières, gravières et exploitations de roches massives siliceuses, par une colonisation lente, une faible productivité et des groupements* végétaux évolués plus calcicoles*. Leur réponse à l'érosion, provoquant une altération du substrat et la formation d'un sol, y est plus rapide que sur roches siliceuses.

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

PARTIE 4 : LE REAMENAGEMENT ECOLOGIQUE DES CARRIERES CALCAIRES

Les potentialités écologiques des carrières calcaires ont été explicitées dans les chapitres précédents. Il paraît aujourd'hui pertinent d'envisager un retour du site à la nature comme objectif de « réaménagement ».

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. Les paragraphes suivants tentent de présenter quelques clés issues de la littérature pour analyser la pertinence écologique de telle ou telle intervention.

4.1. Etude d'un exemple et principes de la réaffectation écologique

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.

4.1.1. Exemple de la Chalandrue

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 3 unités morphologiques : carreau, falaises et plate-forme périphérique. A 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 n° 34).

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) :

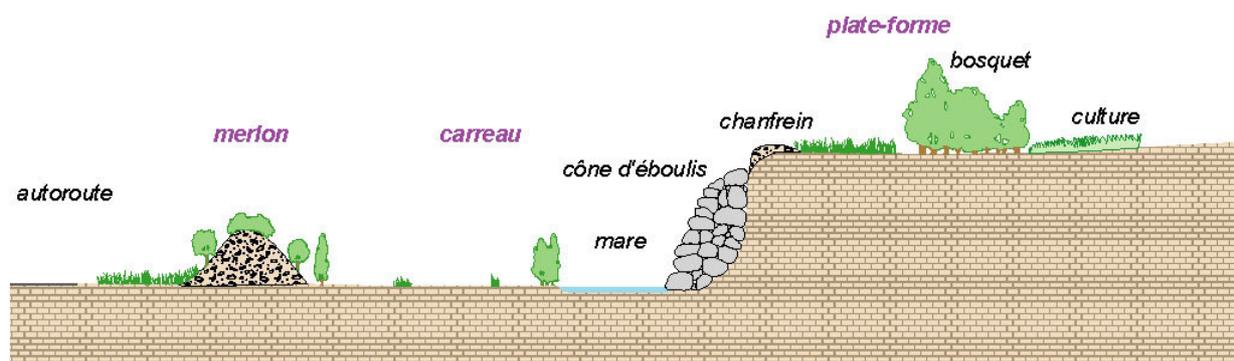
- préserver des zones de substrat compacté par l'activité d'exploitation, devant garder un aspect nu et minéral pour des espèces pionnières ;
- décompacter d'autres zones afin de favoriser l'enracinement ;
- former quelques reliefs avec des stériles afin de casser la planéité du carreau ;
- exploiter 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.

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 10 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).

Figure n° 34 : Un réaménagement exemplaire ? La Chalandrue, autoroute A31 (Côte-d'Or)
(Thievent, 1993 ; Cuénot, communication orale)



Diversité des aménagements écologiques réalisés après extraction

Le site, le contexte : plateau de Langres, autoroute A31 Dijon-Nancy, 1988, 13 ha exploités en fosse sur 17 m de profondeur, environnement agricole intensif, chasse.

Un objectif : la biodiversité et l'authenticité des espèces.

Les travaux de réaménagement : en 1991, terrassements (décompactage, mares...), semis et plantations, vieillissement artificiel du front de taille.

Entretien et gestion : suivi scientifique par le Conservatoire des Sites Bourguignons (sol, oiseaux, plantes, batraciens, insectes, mammifères), trois jours par an fauchage et lutte contre les plantes invasives.

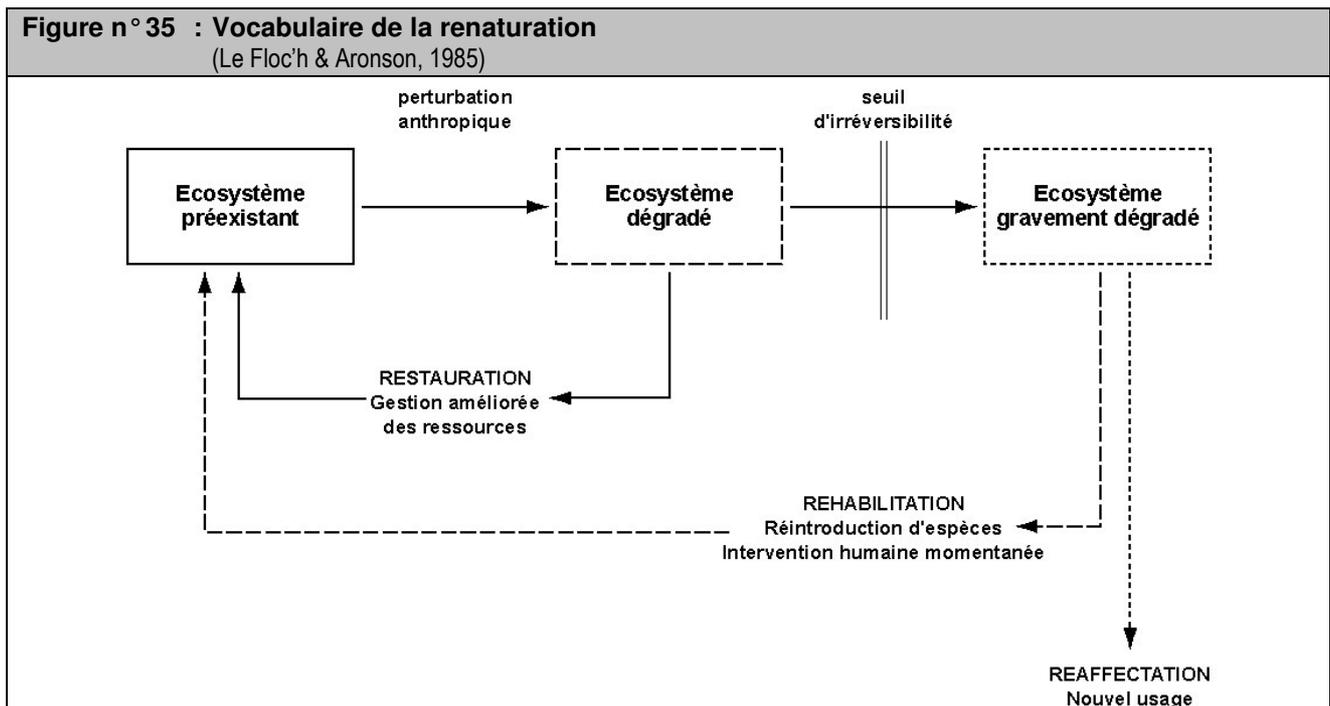
Dix ans d'expérience, quel bilan ? : un oasis de nature réussi dans un plateau agricole, présence d'espèces protégées de batraciens et de reptiles, flore intéressante, plantes alpines introduites = « rareté » régionale artificielle.

4.1.2. Principes de réaffectation écologique

Tout un **vocabulaire** existe autour de cette notion de retour à la nature (Le Floch & Aronson, 1985 ; Cairns, 1998 ; Aronson et al., 1993a). Les principaux termes employés dans la bibliographie sont listés et explicités ci-après (Figure n° 35) :

- remise en état : nettoyage du site et mise en sécurité ;
- réaménagement : organisation du site pour satisfaire un nouvel usage ;
- reconstitution : retour du site à un état similaire à l'initial avant exploitation par remblai, apport de sol... ;
- restauration : retour à un milieu de conditions physiques et biologiques semblables aux préexistantes ; transformation intentionnelle d'un milieu pour en rétablir la structure de l'écosystème préexistant ;
- réhabilitation : retour difficile, car un seuil d'irréversibilité est franchi, du site à son fonctionnement initial et à sa valeur écologique au prix d'une intervention lourde et limitée dans le temps ;
- réaffectation : transformation du milieu de façon à ce qu'il réponde à un nouvel usage. Le nouvel état du milieu peut n'avoir aucune relation de structure ou de fonctionnement avec l'écosystème préexistant.

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 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.

4.2. Définition de l'objectif

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 typicité**, une référence à l'histoire du secteur, comme par exemple la restauration des pelouses* à orchidées dans le nord de la France (Alard, 2000).

L'objectif doit être affiché si possible dès la définition du projet d'exploitation, et par conséquent décrit dans l'étude d'impact. Cet affichage précoce permet d'organiser certaines caractéristiques de l'exploitation et de lutter contre l'idée fautive mais assez répandue qu'un « réaménagement écologique » masque un « ne rien faire, laisser la nature reprendre ses droits » ! Etabli 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.

Des objectifs tels que la reconstitution d'un biotope* disparu, d'une étape relais pour un migrateur, l'accueil d'une espèce rare, la constitution de refuges... s'inscrivent tous dans cette logique. **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).

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 10 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 inter-sites. Son choix s'effectue à la lumière d'une expertise écologique du site. Il peut être formulé plutôt en terme d'« habitats » à créer que d'« espèces » à introduire.

4.3. Une organisation administrative, économique et foncière nécessaire

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. Ainsi le propriétaire du site après exploitation et le gestionnaire devront s'impliquer dans la poursuite du même objectif écologique.

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).

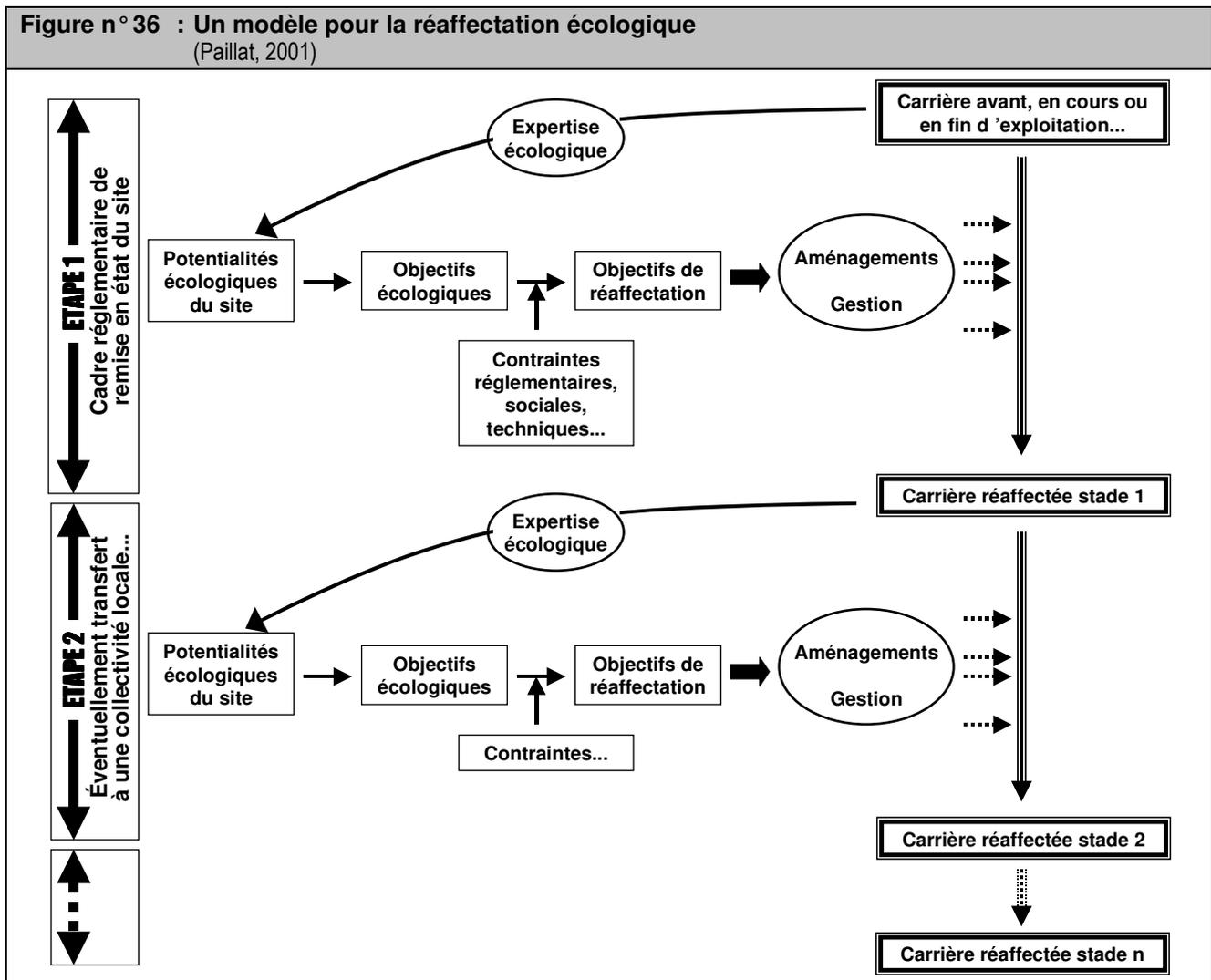
Lorsque l'objectif est défini, il peut être utile pour faciliter la gestion et l'entretien ultérieur du site de prévoir de **communiquer au public**. Un discours pédagogique aidera le carrier puis le gestionnaire du site à résoudre le dilemme qui apparaît souvent entre une certaine attente sociale d'intégration 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.

Le **temps et la souplesse** sont les facteurs essentiels de 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.

Paillat (2001) présente un schéma de synthèse (Figure n° 36), portant l'accent sur la répétition des étapes de comparaison entre l'évolution du milieu et l'objectif initial. Des remises en cause ou des

réajustements des interventions humaines sont parfois nécessaires. **Il y distingue nettement une première étape, incluse dans la mission de remise en état, qui incombe au carrier, et d'autres relevant des gestionnaires ultérieurs.**



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, peut être prévue 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.**

Le choix de l'objectif est indispensable à la préparation de n'importe quel aménagement écologique. Il suppose en effet que l'étude du potentiel écologique du site en cause a été approfondie.

Il permet d'organiser l'exploitation de la carrière en conséquence et de préparer l'« après carrière » (aspect foncier et administratif, gestion, suivi).

Cette étape de choix est l'occasion de confronter les avis des différents partenaires concernés par le site et de présenter au public les raisons de telles ou telles pratiques de gestion ultérieure.

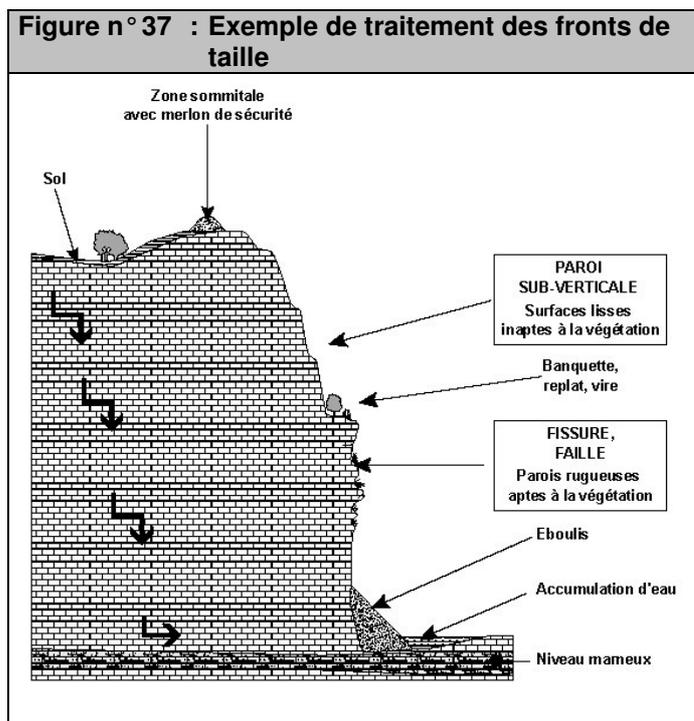
4.4. Les principes d'interventions

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.

4.4.1. Le traitement du front 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 n° 37). 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...



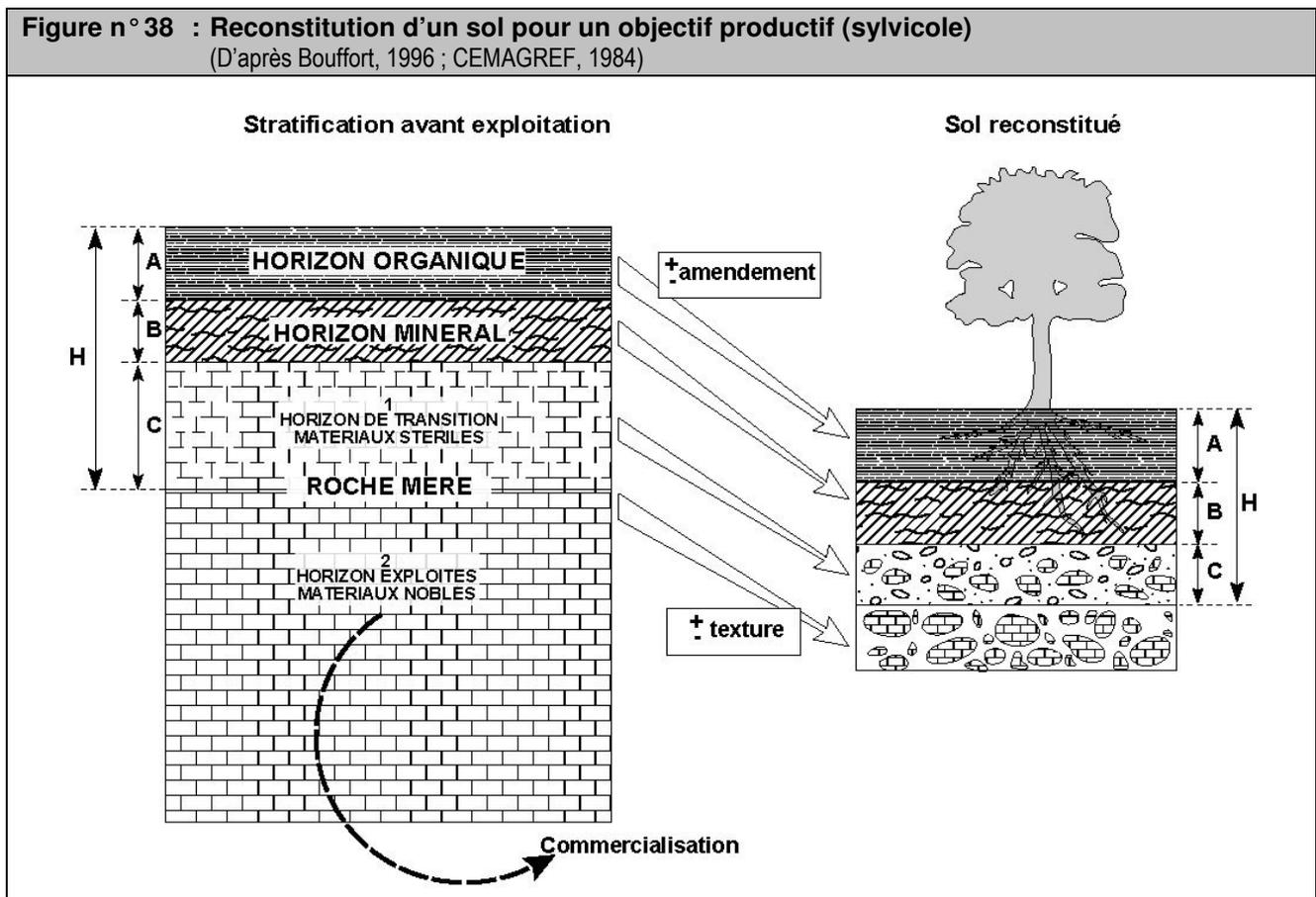
4.4.2. Le traitement du carreau

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, 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, (partie 3), 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 relevés 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.



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, Sénéçon commun, des chénopodes, des amarantes...) et très peu de plantes caractéristiques de la pelouse (quelques graminées, plus rarement d'autres plantes). Cette surprise est expliquée 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).

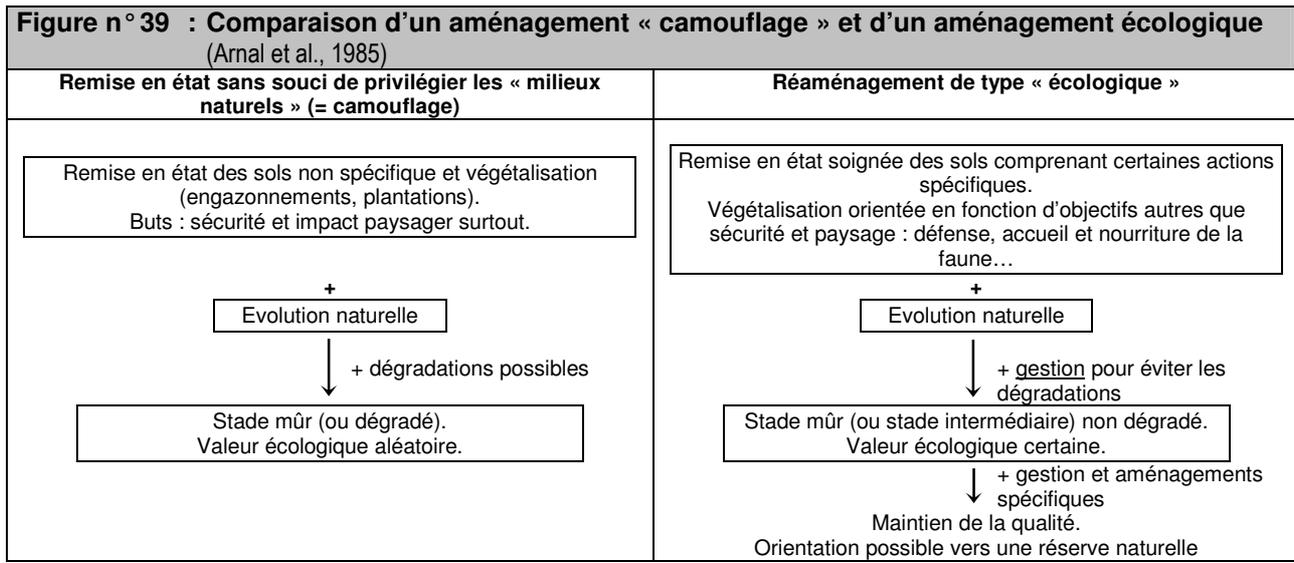
Des expériences de plantations ont été mises en œuvre pour créer des merlons végétalisés (Brun, 1987) ou habiller un front de taille de plantes grimpantes et retombantes (Guichardon, 1988). La plantation est accompagnée d'amendement du sol, d'apport d'engrais organique voire même d'irrigation. Cette 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 bermes 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 ;
- limiter 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 terme d'intérêt écologique, l'opération de verdissement accéléré et l'aménagement écologique, plus respectueux du rythme naturel de colonisation. 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.

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 :

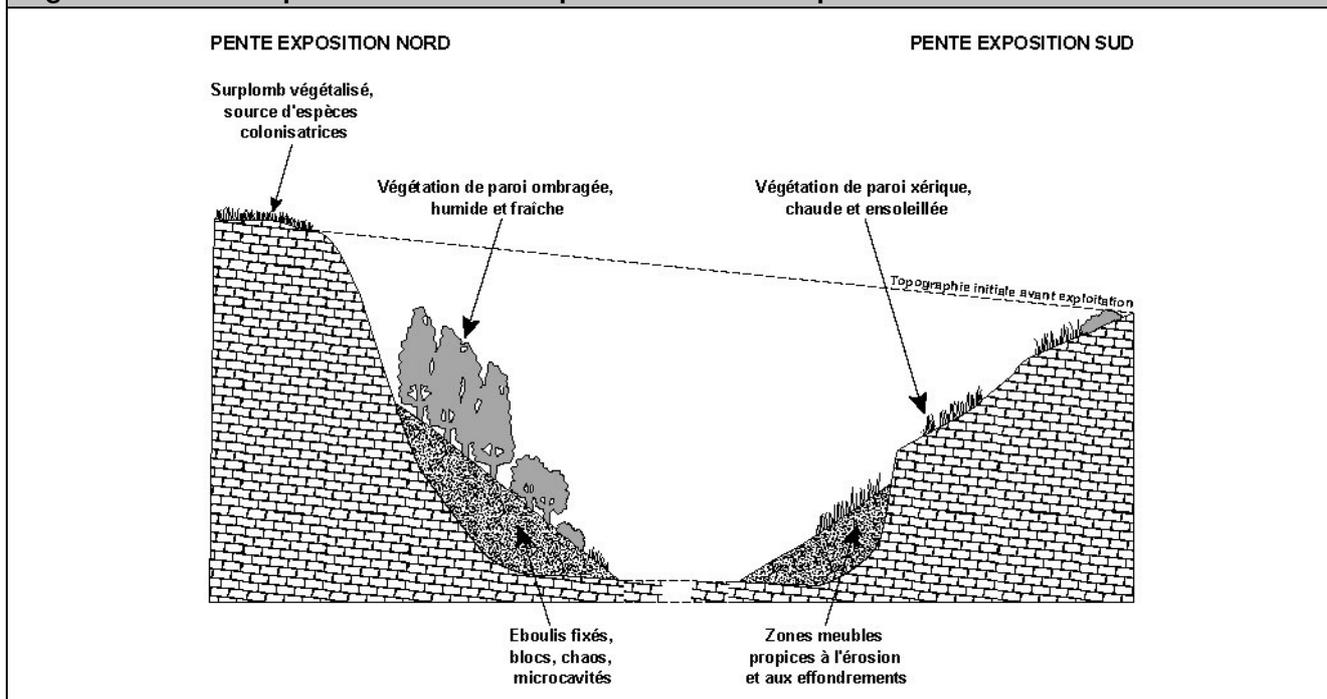
- légumineuses : Robinier faux-acacia, Baguenaudier, Genêt d'Espagne, Cytise faux-ébénier ;
- actinorhiziennes : Aulne blanc, Aulne de Corse, Argousier, Corroyère, Olivier de Bohême.

On notera que certaines de ces plantes ne sont pas locales (Robinier faux-acacia, Olivier de Bohême) 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.

4.4.3. L'orientation des pentes de talus et merlons

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 n° 40 et Figure n° 41). En zone méditerranéenne néanmoins, l'orientation sud accentuée à tel point l'aridité que la colonisation naturelle est retardée. Une orientation est y est préférable selon les travaux de Thinin.

Figure n° 40 : Exemple de traitement des pentes selon leur exposition



4.4.4. Le traitement des puits

La mise en sécurité des abords de ces cavités 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...

4.4.5. 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 n° 42).

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 n° 41 : Exemple de valorisation des terrils, merlons et éboulis

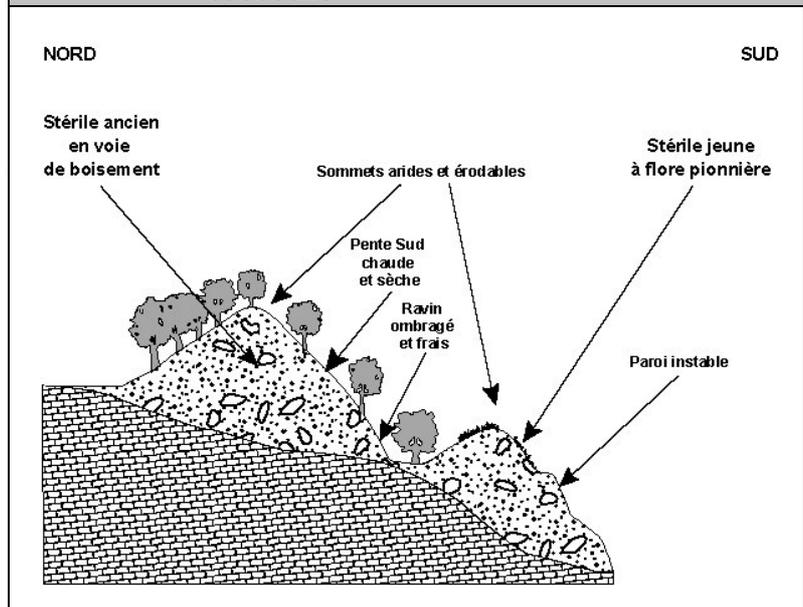
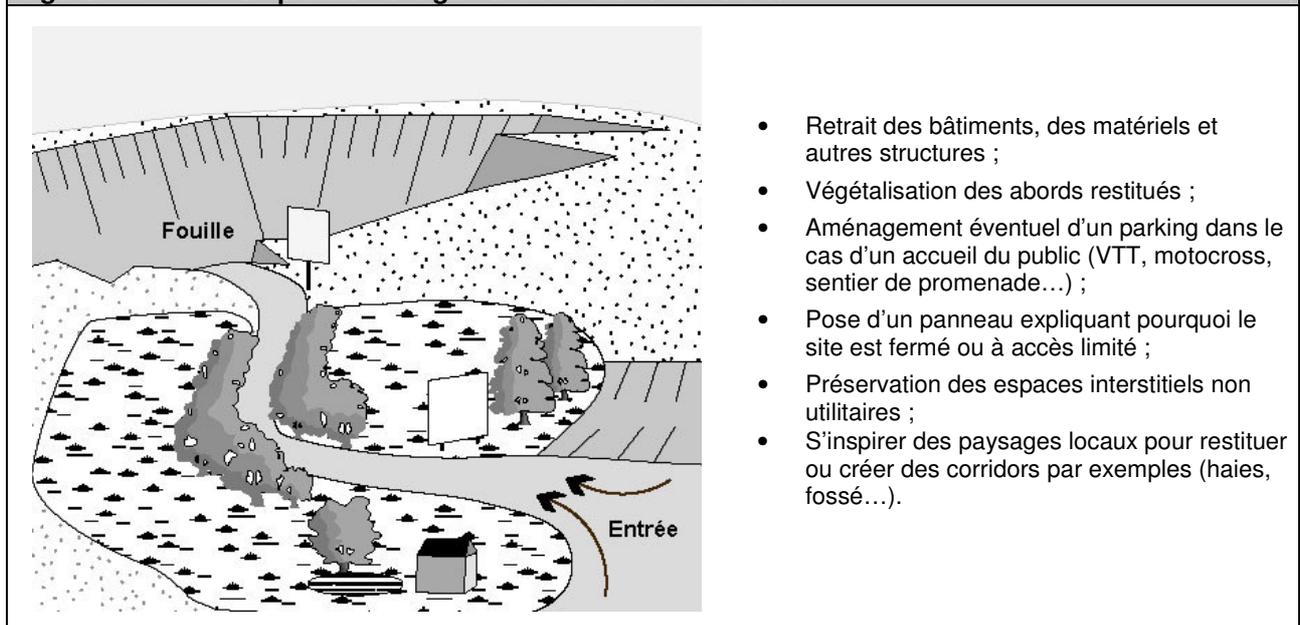


Figure n° 42 : Exemple d'aménagement d'une entrée de site



4.5. L'entretien, la gestion et le suivi scientifique

La gestion du site doit permettre d'atteindre l'objectif fixé :

- s'il s'agit de préserver une espèce ou un groupement pionnier*, les stades initiaux de la succession* écologique devront être entretenus en les rajeunissant régulièrement. A 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... ;
- *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.

Le suivi des populations*, le contrôle de leur évolution et la régénération des biotopes* constituent les orientations principales de la gestion du site.

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.

4.5.1. Le 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. Il permet aussi d'ajuster les interventions et la gestion à l'évolution réelle du site.

Enfin il décrit de nouveaux exemples et étaye les théories de cette science en devenir qu'est l'écologie de la restauration. Le suivi des populations* animales et végétales renseigne sur le développement des biocénoses* sur le site, sur la « dynamique » des populations* : équilibres, interactions, apparition d'espèces nouvelles... Il permet d'analyser l'évolution en terme de progrès ou non de la valeur écologique de l'ensemble.

Réalisés par des scientifiques expérimentés, ces observations et leur analyse permettent de définir les actions à entreprendre pour orienter l'évolution de l'écosystème.

4.5.2. L'entretien et la gestion du site

Avant tout, la maîtrise du site doit être acquise par le gestionnaire, l'idéal restant une collectivité locale (Conseil général - Taxe départementale des Espaces Naturels Sensibles, Commune et conseil scientifique d'une association naturaliste) 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).

Comment conserver les milieux fragiles ?

Pour 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 ;
- décaper le carreau ;
- d'instaurer un pâturage ou un fauchage réguliers. 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 n° 9) un certain nombre de problèmes et propose des solutions.

| Tableau n° 9 : 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 | Erosion 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 | Evolution ralentie | Aider les plantes vigoureuses qui favorisent l'activité racinaire et les substrats organiques |
| 8. Réduction de toxicité | Excès d'acidité | Introduire des espèces tolérantes, apport de chaux |
| | Excès de métaux | 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 : Arrêté de Protection de Biotope (par exemple des carrières du massif de l'Estaque près de Marseille pour la présence de plantes rares), Réserve Naturelle Volontaire (Peresson & Grangé, 2000), Réserve biologique gérée par l'ONF (Thomas, 1992)..., tout en informant le public des raisons de la limitation d'usages de cet espace. Lecoinge (1993) montre 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.

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 terme de pratiques de gestion.

4.5.3. L'évaluation des coûts

Difficiles à évaluer, les coûts du réaménagement écologique 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 au début de cette partie, 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. C'est ainsi que la réflexion et l'organisation relatives au projet de valorisation écologique permettront, si elles sont effectuées très en amont, de réaliser d'importantes économies.

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 Chalandruie nécessite 4 jours d'ouvrier par an (50 €/jour) + 1 journée ingénieur par an pour validation (150 €/jour) (Cuénot, communication orale).

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 isoler ; 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.

PROPOSITION D'INVESTIGATIONS : COMMENT ABORDER LA PHASE TERRAIN ?

L'organisation de la démarche relative à l'étude des potentialités écologiques des carrières calcaires à laquelle se rapporte cette étude bibliographique prévoit une deuxième phase constituée de prospections sur le terrain.

Cette deuxième phase est d'autant plus nécessaire que l'étude bibliographique a mis en évidence le faible nombre des travaux scientifiques réalisés dans le domaine des carrières calcaires. La thèse de Decocq (1994) sur des carrières de craies du nord de la France, le rapport de stage de Brunaud (1997a) sur les carrières bourguignonnes, l'étude de Sauveterre (1985) sur l'évaluation des potentialités écologiques des carrières après exploitation (études s'appuyant entre autres sur des travaux de Robert sur des carrières francomtoises et de Thinon sur des carrières de la région de Marseille) constituent les principaux ouvrages à caractère scientifique proposant une réflexion sur les carrières calcaires. Les données consultées portent en majorité sur des sites inexploités, souvent anciens (20 ans d'abandon et plus), n'apportant en définitive qu'une vision partielle de la faune et de la flore rencontrées.

La phase terrain est indispensable pour compléter les connaissances sur l'écologie des carrières calcaires.

1. La sélection des sites à expertiser

1.1. L'approche menée sur le Massif armoricain

L'établissement d'une typologie des habitats naturels comme celle conduite sur le Massif armoricain (Voeltzel & Paillat, 2003) s'appuie sur l'étude de 55 sites répartis sur 3 régions. Elle a permis de connaître de façon assez précise la nature, la représentation et l'organisation des habitats dans les carrières armoricaines, ainsi que les caractéristiques physiques des substrats sur lesquels cette végétation se développe.

C'est sur la base de ce travail que s'est opérée ultérieurement une sélection d'une douzaine de sites, dans la mesure du possible représentatifs de la région étudiée, pour y réaliser des expertises écologiques.

Une telle démarche ne paraît pas envisageable dans le cas des carrières calcaires. La couverture géographique est en effet nettement plus importante, s'étendant sur le territoire national et concernant au moins 15 régions. Elle nécessiterait inévitablement une présélection (sur quels critères ?) de nombreux sites pour mener à bien une typologie analogue à celle du Massif armoricain, sans oublier le temps nécessaire à sa réalisation, reportant d'autant les échéances établies.

1.2. La démarche proposée de sélection des sites

Pour les raisons énoncées précédemment, la sélection des sites à expertiser dans le cadre de la deuxième phase ne pourra s'opérer sur la base d'une représentativité des sites de carrières calcaires. Le parti retenu est de s'appuyer sur les facteurs fondamentaux agissant sur le potentiel écologique des carrières. Ainsi 3 critères principaux de sélection sont proposés :

- **Le facteur macroclimatique** : compte tenu du caractère national, c'est le premier critère de sélection retenu. La sélection des sites devra recouper autant que possible les 4 régions biogéographiques* de France caractérisant 4 grands ensembles climatiques : atlantique, continental, méditerranéen et montagnard.
- **Le facteur nature du substrat** : la diversité des roches de nature calcaire est telle qu'il n'est pas envisageable de les échantillonner toutes. Il est néanmoins possible de réduire cette diversité à deux grands ensembles, les calcaires compacts et durs (calcaires dolomitiques, oolithiques, récifaux...) d'une part, les calcaires plus tendres (de types marneux et craies) d'autre part. Le rôle de la fragmentation et de la fracturation de la roche, important dans l'aptitude de la végétation à coloniser un site pourra de cette manière être abordé.
- **Le facteur âge de la carrière** : si les stades pionniers*, les plus récents, s'avèrent dans de nombreux cas les plus intéressants sur le plan patrimonial, les stades plus évolués tels que les pelouses*, les fourrés et les bois participent au fonctionnement écologique de la carrière et à son intégration dans son environnement. Ainsi la prise en compte du facteur temps est essentielle pour la compréhension des mécanismes successionnels se déroulant en carrières. Sur les sites actuels les zones réaménagées ou délaissées sont souvent trop jeunes pour offrir une vision complète des successions* écologiques. Pour apprécier au mieux ce facteur âge, il est proposé d'étudier des sites en doublon. A un site carrière « récent » sera associé un site « ancien ». Les carrières dites « récentes » correspondent à des sites en activité. Elles devront posséder des zones délaissées ou réaménagées où s'observent des successions* écologiques. Les carrières dites « anciennes » seront des sites abandonnés. Le choix de ces doublons devra respecter des conditions géologiques sinon identiques, au moins analogues au site « récent » (roches « massives » ou « tendres ») ainsi qu'une certaine proximité géographique (rayon de 5 à 20 km). Un site en exploitation de longue date pourra avantageusement offrir toutes les conditions d'âge recherchées.

Les autres facteurs susceptibles d'agir sur la diversité des carrières comme le mésoclimat et le microclimat, la superficie et la sinuosité de la carrière, son environnement écologique... pourront le cas échéant aider à la sélection de sites similaires.

2. L'établissement d'une typologie des milieux pour identifier les biocénoses potentielles

Dans le cadre des expertises des différents sites, il est proposé de reprendre l'approche méthodologique développée dans le cadre de la typologie des carrières du Massif armoricain

(Voeltzel & Paillat, 2003). Les biocénoses* colonisent les carrières selon la capacité d'accueil de ces sites, selon la nature et la variété des habitats qu'ils présentent.

En établissant une typologie des milieux rencontrés en carrière, des conclusions pourront directement être tirées pour évaluer quels ensembles d'espèces peuvent être amenés à fréquenter tel ou tel site. Car, même si les informations bibliographiques relatives à l'écologie des anciennes carrières calcaires sont plus nombreuses que pour le Massif armoricain, celles-ci demeurent très partielles, attachées à la sensibilité et à l'espace de prospection de tel ou tel naturaliste. Par exemple, les bryophytes* ne sont décrites que par de rares auteurs tels que Lecoing (1993) dans sa région de Caen. Il est pourtant certain que ce groupe colonise bien d'autres carrières.

Un milieu ou « habitat » se définit comme une combinaison de paramètres abiotiques et des formations végétales associées. Les sites de carrière visités seront ainsi décrits sous l'angle des **facteurs physiques** (Tableau n° 10A) et des **habitats** (Tableau n° 10B). Par habitats, il faut entendre ici biotopes* ou milieux de vie pour la faune et la flore (et non le sens de la typologie CORINE Biotopes de la directive européenne Habitats). Leur identification et caractérisation permettra de mieux comprendre les relations existant entre les différentes formations végétales et leurs conditions d'installation.

| Tableau n° 10 : Liste des descripteurs pour une typologie des habitats naturels | |
|---|---|
| A - Descripteurs physiques du site | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques du site : <ul style="list-style-type: none"> • Superficie, profondeur, largeur, longueur, profil, pente... • Age du site et des aménagements • Nature de la roche exploitée • Nature de la découverte • Présence d'eau (suintement, mare temporaire, permanente) • Caractéristiques de l'exploitation : <ul style="list-style-type: none"> • Mode d'exploitation (en flanc de coteau, en fosse, en galeries, sur éboulis, en souterrain) • En activité ou abandonné • Présence de secteurs réaménagés • Caractéristiques environnementales : <ul style="list-style-type: none"> • Occupation du sol alentour (forestier, agricole, prairial, garrigue, pelouse, combinaisons diverses...) • Existence de corridors et/ou connexions entre milieux (haies, chemins, fossés...) • Présence de milieux aquatiques (mare, fossé, cours d'eau...) • Repérage biogéographique* | |
| B - Habitats naturels identifiables en carrières calcaires | |
| <p><u>Selon le substrat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Roche compacte en place (falaises, carreau, gradins...) • Substrat plus ou moins meuble à éléments grossiers (éboulis, pierriers, talus, carreau, gradins...) • Substrat terreux (remblais, merlons, talus...) • Substrat à eau temporaire, permanente... <p>Des paramètres descriptifs complémentaires seront utilisés pour distinguer les habitats comme l'inclinaison du substrat, l'exposition, la granulométrie dominante et secondaire, la compaction du sol, la présence d'une couche humifère, l'existence d'anfractuosités...</p> | <p><u>Selon le stade de développement de la végétation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Absence de végétation • Substrat colonisé par des végétaux inférieurs • Pelouse/friche ouverte à annuelles • Pelouse/friche ouverte à vivaces • Pelouse/friche fermée basse • Pelouse/friche fermée haute • Ourlet • Fourré, hallier, manteau* pré-forestier • Boisement |

Pour mener cette approche « habitats », des expertises écologiques seront menées afin de décrire les biocénoses*. Les méthodes d'observation s'organiseront autour de relevés **botaniques** et **ornithologiques** systématiques sur toute carrière visitée, **complétés par des investigations adaptées** à des milieux particuliers plus originaux en carrière calcaire tels que zones humides, anfractuosités ou pierriers.

3. La mesure 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.

3.1. Approche multicritères

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 œuvre. Sionneau (1993), après analyse des facteurs de variabilité, retient comme déterminants pour la valeur écologique d'un site de carrière les critères suivants :

- ceux 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 ;
- ceux liés à **l'environnement de la carrière** : ouverture sur l'extérieur, originalité du site par rapport aux milieux environnants, communication avec la nappe... ;
- ceux liés à **la diversité de la biocénose*** : nombre d'espèces et groupements représentés, degré de relations entre espèces (chaînes alimentaires, concurrence...)
- ceux liés à **la présence d'espèces rares**, rareté reconnue à différentes échelles régionales, locales... ;
- ceux liés à **l'existence de facteurs limitants** : assèchement des mares, absence de sol, surface du site...

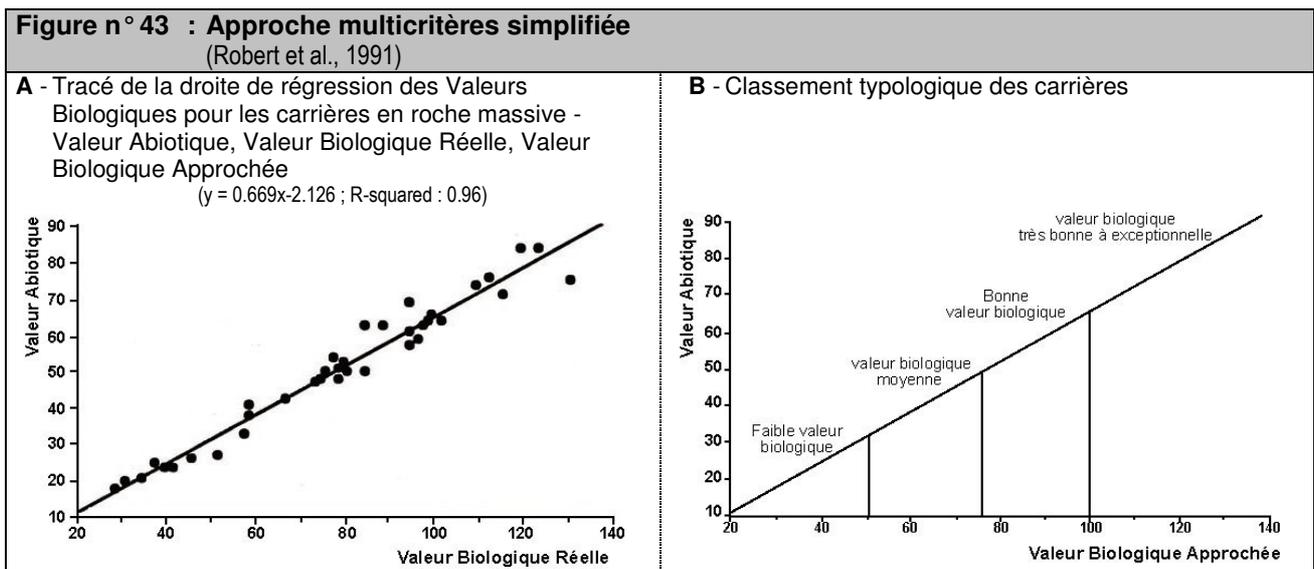
Cette approche quasi exhaustive, mais encore lourde à mettre en œuvre (expertises écologiques approfondies nécessaires au renseignement de certains critères), est utilisée par Robert et al. (1991) sur les carrières de Franche-Comté pour bâtir un référentiel. L'idée développée reprend en effet l'ensemble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

3.2. 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 se base 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 n° 43A).

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 n° 43B).



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 n° 44 et Figure n° 45). Un mode d'emploi permet de chiffrer un « degré d'intervention humaine » sur un site, ou autres paramètres plus difficiles à quantifier. A partir de la VA ainsi déterminée, le calcul de la Valeur Biologique Approchée (VBA) s'effectue par report sur une abaque, fournie 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 3 années de travail à l'équipe de Robert (de 1980 à 1983), avec des compléments sur 4 années de plus (jusqu'en 1987). Elle a nécessité de mettre en place une équipe pluridisciplinaire (botanistes, ornithologues, entomologues spécialisés – 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).

| Tableau n° 11 : Comparaison de bio-indicateurs | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|---|
| | Végétaux vasculaires | Oiseaux | Insectes (Coléoptères) | Batraciens et reptiles | Espèce emblématique (Faucon pèlerin, Hibou grand-duc, Orchidée...) | Valeur biologique approchée |
| Caractère du bioindicateur | Colonisation rapide (modes de prospection variés) ; Formes multiples adaptées à différentes conditions physico-chimiques et large amplitude d'habitats ; Premiers maillons des chaînes alimentaires. | Beaucoup d'espèces dans chaque milieu, à chaque stade ; Large amplitude d'habitats. | Grand nombre d'espèces ; Grande aptitude de colonisation de tous les supports ; Présence souvent liée aux plantes hôtes ; Caractérisent des micro-habitats (même petites surfaces). | Episodiques sur un site donné ; La présence de batraciens est conditionnée par l'existence d'eau au moins temporaire. | 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 bio-géographique donnée. |
| Source d'information | Conservatoires botaniques nationaux ; Associations botaniques, Sociétés de Sciences Naturelles... | Université de Bourgogne ; Associations ornithologiques... | Naturalistes entomologues ; Université de Franche-Comté ; OPIE, associations... | Conservatoire des sites bourguignons. | Ex. Autoroutes : orchidées sur les aires de repos. | Université de Franche-Comté, J.C. Robert. |
| Méthode standardisée | Relevés phyto-écologiques méthode de Braun-Blanquet ; Echantillonnage par placettes (25 m ²) sur transects répartis sur la surface du site. | Indices Ponctuels d'Abondance ; Echantillonnage par quadrats allégés... | Plusieurs types de pièges ont été mis au point : lumineux, colorés, composite ; Méthodes de capture +/- standardisées. | Cf. guide des amphibiens de France, Belgique et Luxembourg, 2003 ; piégeage. | Non | Renseignement de fiches pré-établies décrivant le milieu physique et l'environnement de la carrière. |
| Principe de la méthode | 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. | Temps d'observation proportionnel à la surface du site : présence ou traces de l'espèce. | |
| Bon descripteur de... | Etat du milieu (conditions physico-chimiques, biologiques) ; Evolution du milieu (maturation des groupements* végétaux*). | 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. | Exploitation du caractère intégrateur d'une espèce exigeante en qualité de milieu. | Décrit un potentiel d'accueil du site pour les êtres vivants (notamment variété des habitats). |
| Mauvais descripteur de... | 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. | La relation de la carrière avec son environnement ; Méthode généralement destructives, posant des problèmes éthiques. | Milieux sans eau au moins temporaire. | Analyse difficile de l'information "présence/absence d'une espèce". | Ne mesure pas la colonisation effective par les êtres vivants. |
| Répétitivité | Bonne ; Nombreux botanistes praticiens de ce type d'inventaires. | Assez bonne ; Existe un Certificat des techniques de recensement d'oiseaux (Université de Bourgogne, depuis 1999). | Assez mauvaise ; Les entomologues 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. |
| Intensité d'échantillonnage | Par site : 2 passage / an au Printemps et en été. | Par site : 2 passage / an au Printemps et en été. | Indicateur très sensible à l'intensité d'échantillonnage. | Par site : 2 passage / an au Printemps. | Rapide, à répéter. | 1 passage / site. |
| Temps de renseignement | 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... |
| "Popularité" (communication) | 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 entre dans le patrimoine culturel local. | Faible : ce n'est qu'une prévision de spécialistes ; Aspect cartésien de la méthode, séduisant pour des initiés. |

3.3. Approche par les bio-indicateurs

Une autre méthode d'évaluation de l'intérêt écologique d'une carrière peut être fondée sur **les « bio-indicateurs »**, 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 n° 11, 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*.

Végétaux et insectes décrivent plus l'état du milieu que son fonctionnement dans un paysage donné. Contrairement aux végétaux, les insectes sont mal connus, notamment pour ce qui est de l'écologie des espèces inventoriées. Les végétaux sont plus souvent l'objet d'inventaires par des botanistes praticiens, nombreux et compétents. Par ailleurs, selon les spécialistes (Bonnet et al., 1997 ; UEF & AIDEC, 1998), les insectes semblent très liés à la végétation en place. La densité et la diversité des orthoptères sont reconnues comme directement liées à la densité et à la diversité des peuplements de graminées, cypéracées et joncacées. Aussi est-il proposé de **retenir les végétaux vasculaires** plutôt que certains groupes d'insectes, comme indicateur.

Les botanistes belges utilisent cet indicateur « végétation » pour décrire et comparer les valeurs écologiques des terrils de charbonnage (Figure n° 46). Ils mettent en œuvre 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 n° 46 : Méthode d'évaluation de la valeur écologique des terrils

(Ghio, 1978)

barème de cotation :

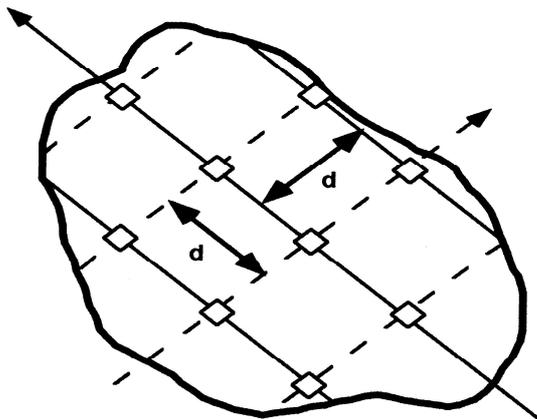
- (10 points) - richesse floristique : nombre d'espèces phanérogames notées de 1 (< 13 espèces) à 10 (< 120 espèces)
- (10 points) - rareté floristique : coefficient régional donné par les botanistes 1 (très commune) à 10 (rare)
- (10 points) - diversité des groupements : de 0 (sol nu) à 10 (> 10 groupements 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 n° 47 : 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 n° 47).

Cette méthode, adaptée aux anciennes petites carrières de l'échantillonnage retenu (27 des 30 carrières étudiées s'étendait 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.

Face à toutes ces méthodes, développées dans le cadre d'études spécifiques, il est proposé de mettre en œuvre une **méthode phytoécologique classique**. Elle est basée sur des **relevés phytosociologiques*** (avec identification des différentes strates de végétation, leur recouvrement, les espèces dominantes...) et la **description des paramètres physiques** (substrat, granulométrie, pente...) dans les différentes formations identifiées.

➤ **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. **C'est pourquoi il est proposé de retenir les oiseaux pour tous les sites à étudier.**

L'inventaire ornithologique s'inspirera de la méthode classiquement pratiquée, les IPA (Indices Ponctuels d'Abondance). Cette méthode consiste à identifier les oiseaux (à vu ou par le chant) à partir de points fixes.

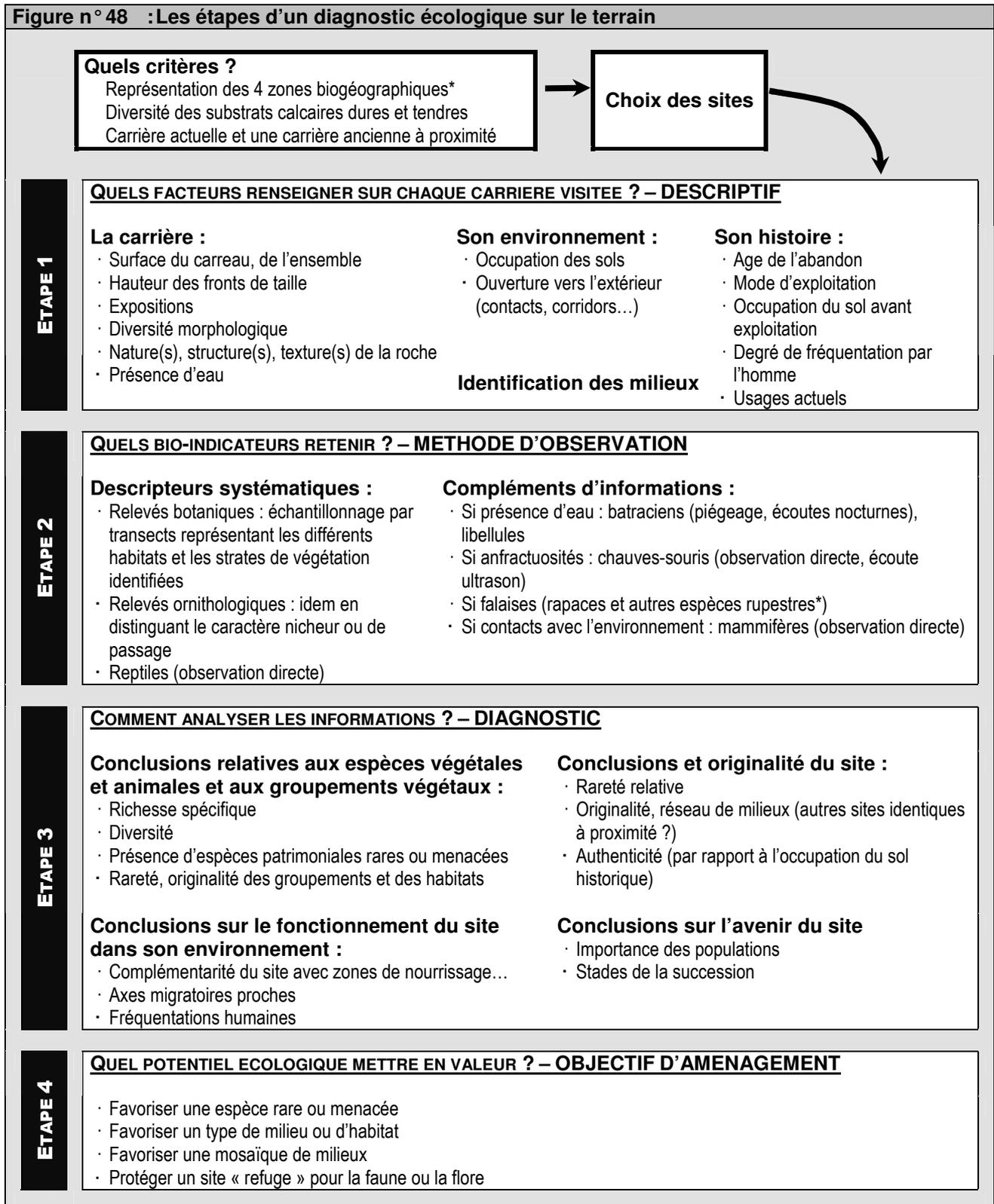
➤ **Les reptiles** sont davantage représentés par des espèces liées aux milieux évolués et aux mosaïques (lisières, fourrés, pelouses) que par des espèces pionnières liées à un habitat uniforme. Peu cités en carrière, il paraît ainsi opportun de les étudier systématiquement lors des inventaires floristiques et ornithologiques.

➤ **Les batraciens, les chauves-souris, les oiseaux non ubiquistes**, sont occasionnels en carrière calcaire. 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 : relevés floristiques ou ornithologiques s'appliquent ainsi à tout type de milieu. Certes assez longs à renseigner mais 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.

D'autres démarches plus intégratrices ont été mises en œuvre 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 paraissent davantage à réserver à des comparaisons entre sites.



4. Quel potentiel écologique mettre en valeur ?

L'analyse des *Potentialités écologiques des carrières calcaires* à travers la bibliographie existante a souligné le fort potentiel de ces carrières vis-à-vis de la flore et de la faune sauvage. Mais elle révèle également des lacunes dans la connaissance de ce potentiel. De nombreux facteurs agissant sur la diversité et le potentiel écologiques des carrières calcaires sont proposés dans la littérature, mais les références étudiant leurs influences et leurs interactions sont pour ainsi dire inexistantes.

Il apparaît ainsi nécessaire d'approfondir les connaissances sur le sujet par une phase terrain, dans le même esprit que les études lancées par la profession sur :

- les carrières alluviales, Charte UNPG*/ECOSPHERE (Kovacs et al., 2001) ;
- les carrières de roches massives siliceuses du Massif armoricain, Charte UNPG* Pays-de-Loire, Bretagne, Normandie ; ENCEM ; Ouest-Aménagement (Paillat, 2001).

Cette phase terrain va consister en des inventaires écologiques pratiqués sur des **carrières calcaires** selon une méthodologie élaborée en collaboration avec le Comité Scientifique du projet :

- mise en place d'une base de données de sites carrières connus ou reconnus pour leur potentiel écologique ;
- échantillonnage des sites à étudier à partir de cette base de données. L'échantillon comportera aussi bien des carrières d'intérêt écologique avéré, que des carrières plus classiques, en activité ou non ;
- expertise de terrain sur les sites retenus selon une méthodologie préalablement définie permettant l'étude de la biocénose* (faune et flore) et des facteurs susceptibles d'agir sur les richesses, la diversité et la composition de cette biocénose*.

Le diagramme figurant ci-après (Figure n° 48) résume les différentes étapes à réaliser pour identifier le ou les potentiels écologiques d'un site.

La première étape consiste à renseigner les paramètres abiotiques. Elle permet également de repérer des milieux des habitats naturels de référence. La deuxième étape permet de mettre en application les bio-indicateurs commentés au chapitre précédent. Les deux dernières étapes analysent les potentialités écologiques et permettent de conclure à un ou des objectifs d'aménagement.

Il repose sur les premières phases de renseignement des paramètres descriptifs abiotiques, l'identification des habitats existants et l'observation éventuelle des biocénoses*.

Ce diagramme n'explicite pas le choix des sites à visiter. Celui-ci peut en effet répondre à des critères très variés de répartition géographique des sites sur le territoire français, de représentation de tel ou tel type de roches calcaires, modes d'exploitation... Le Comité d'encadrement de cette étude effectuera ce choix.

Un diagnostic des informations rassemblées lors de la phase descriptive permettra de définir quel est(ont) le(s) potentiel(s) écologique(s) du site. Plusieurs scénarii s'offriront alors pour formuler un ou des objectifs de réaffectation écologique de la carrière.

CONCLUSION

Ces 50 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 XX 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 d'espèces menacées. Après exploitation des matériaux, les carrières calcaires 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 au caractère rupestre* des carrières. Dès que ces milieux vieillissent, leurs sols s'enrichissent et leur écologie évolue en général vers celle de milieux plus banals.

Le potentiel écologique des carrières calcaires apparaît comme particulièrement précieux dans le contexte actuel 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.

La bibliographie analysée permet 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. La nécessité de s'adapter au(x) potentiel(s) écologique(s) de chaque site doit primer.

L'influence des facteurs agissant sur la diversité et le potentiel écologiques, les interactions entre ces facteurs et leur importance intrinsèque sont rarement analysés, voire méconnus.

A l'image des études entreprises par l'UNPG* pour les carrières alluviales et les carrières du massif Armoricaïn, cette nouvelle démarche s'inscrit dans un cadre d'amélioration des connaissances du fonctionnement écologique des carrières. Elle a révélé des lacunes dans la connaissance de leurs potentiels.

Ce document de synthèse d'avis scientifiques multiples et généralement convergents 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 œuvre, 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 va se poursuivre par une phase d'observation de terrain.

Cette deuxième phase débutera par la mise en place d'une **base de données** de sites carrières connus ou reconnus pour leur potentiel écologique. Cette base de données, constituée à partir des informations déjà collectées par l'étude bibliographique, mais également des fichiers ZNIEFF, France 2000 et d'une enquête auprès de la profession, servira par la suite à **échantillonner** des sites carrières sur lesquels des **expertises écologiques** (faune, flore, sol...) seront menées. Les critères servant à cet échantillonnage et la méthodologie retenue pour les expertises de terrains ont été définis en concertation avec le Comité Scientifique du programme.

L'ensemble de cette phase de terrain devra apporter les éléments nécessaires à une meilleure compréhension des potentialités écologiques des carrières calcaires. Elle aboutira 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.

GLOSSAIRE

Ce glossaire a été établi d'après :

- o Delpech R., Dumé G. & Galmiche P., 1985. Typologie des stations forestières – Vocabulaire. IDF.
- o Rameau J.C., MANSION D. & Dumé G., 1993. Flore forestière française, tome 2 : montagne. IDF.
- o Le Petit Robert 2003 – Dictionnaire de la langue française.
- o Le dictionnaire Larousse 2003

| | |
|-----------------------------|---|
| <u>Acidiphile</u> | : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles acides (sols et eaux); par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes. |
| <u>Alliance</u> | : Unité dans la classification des groupements* végétaux en phytosociologie* |
| <u>Anémochorie</u> | : Se dit d'une plante dont la graine ou le fruit est disséminée par le vent |
| <u>Anthropique</u> | : Qualifie les phénomènes qui sont provoqués ou entretenus par l'action consciente ou inconsciente de l'homme. |
| <u>Bétulaie</u> | : Bois de bouleaux ou riche en bouleau. |
| <u>Biocénose</u> | : Ensemble des organismes vivants occupants un biotope* donné ; une biocénose et son biotope* constituent un écosystème*. |
| <u>Biogéographie</u> | : Etude de la répartition géographique des organismes vivants. |
| <u>Biotope</u> | : Ensemble théorique des conditions physico-chimiques définissant un écosystème* donné. |
| <u>Bryophytes</u> | : Groupe de végétaux cryptogames chlorophylliens comprenant les mousses, les hépatiques et les sphaignes. |
| <u>Calcicole</u> | : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en calcium. |
| <u>Climax</u> | : Etat d'un écosystème* (d'une succession*) ayant un stade d'équilibre relativement stable en dehors de toute intervention humaine. Notion controversée.. |
| <u>Ecologie</u> | : Rapport d'une espèce avec son milieu, ensemble des conditions préférentielles de ce milieu dans lequel se rencontre cette espèce ; science étudiant les interactions qui déterminent la distribution et l'abondance des organismes vivants. |
| <u>Ecosystème</u> | : Système ouvert défini approximativement dans l'espace et dans le temps, modélisant l'ensemble des relations des êtres vivants entre eux et avec leur environnement physico-chimique. |

- Eutrophe** : Riche en éléments nutritifs, généralement non ou faiblement acide, et permettant une forte activité biologique.
- Formation végétale** : Type de végétation défini plus par sa physionomie que sa composition floristique (e.g. prairie*, roselière*, friche, lande*, etc...).
- Friche** : Formation végétale* se développant spontanément sur un terrain perturbé puis abandonné
- Groupe végétal** : Ensemble d'espèces végétales constituant une unité de végétation homogène colonisant un milieu donné.
- Habitat** : Environnement physico-chimique et biologique dans lequel vit et se reproduit une espèce.
- Héliophile** : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui ne peut se développer complètement qu'en pleine lumière (contraire de sciaphile*); par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.
- Hygrophile** : 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); par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.
- Manteau** : Végétation essentiellement arbustive située linéairement en lisière de forêt.
- Mésophile** : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions moyennes, en particulier d'humidité et de sécheresse ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.
- Mésoxérophile** : 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); par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.
- Métapopulation** : 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.
« Méta » est un préfixe signifiant supérieure (d'un point de vue abstrait).
- Nitrophile** : Se dit d'un organisme ou d'un groupement d'organismes croissant sur des sols riches en composés azotés ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.
- Oligotrophe** : Très pauvre en éléments nutritifs et ne permettant qu'une activité biologique réduite.
- Pelouse** : 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*.
- Perturbation** : Événement aléatoire et brusque, d'origine diverse (forte crue, gel, sécheresse, destruction par l'Homme...).

| | |
|-------------------------------|---|
| <u>Pétitionnaire</u> | : personne ou entité juridique signataire de la demande d'autorisation, en d'autre terme c'est le maître d'ouvrage exploitant la carrière |
| <u>Phytosociologie</u> | : Etude 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. |
| <u>Pionnier</u> | : Relatif à une espèce ou un ensemble d'espèces aptes à coloniser des terrains nus. |
| <u>Population</u> | : Ensemble des individus appartenant à la même espèce vivant généralement dans des conditions de milieu homogènes, dans une région donnée, à un moment donné. |
| <u>Prairie</u> | : Formation* végétale herbacée*, fermée et dense, dominée par les graminées et faisant l'objet d'une gestion agricole par fauche ou pâturage. |
| <u>Propagule</u> | : Organe assurant la multiplication en particulier végétative des plantes. |
| <u>Rudéral</u> | : Relatif à un organisme caractéristique de terrains fortement transformés par les activités humaines. |
| <u>Rupestre</u> | : Relatif à un organisme se développant sur les rochers. |
| <u>Saxicole</u> | : Se dit d'une espèce ou d'un groupement d'organismes se développant sur des rochers. |
| <u>SN-ROC</u> | : Syndicat National des Industries de Roches Ornementales et de Construction |
| <u>Spontané</u> | : Se dit d'une espèce ou d'un groupement d'organismes se développant à l'état sauvage, naturellement, sans introduction par l'homme. |
| <u>Succession</u> | : Remplacements successifs et spontanés des groupements d'organismes au cours du temps en un lieu donné, qui constituent une série évolutive. |
| <u>Thermophile</u> | Se dit d'une espèce ou d'un groupement d'organismes exigeant en chaleur. |
| <u>UNICEM</u> | : Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction |
| <u>UNPG</u> | : Union Nationale des Producteurs de Granulats |
| <u>Xérophile</u> | : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant en milieu sec à très sec. |

ANNEXE : LISTE BIBLIOGRAPHIQUE THEMATIQUE

- 1 - Expériences en carrières calcaires (sauf exceptions)
- 2 - Ecologie de la restauration
- 3 - Généralités sur les carrières
- 4 - Généralités sur l'environnement

1 - Expériences en carrières calcaires (sauf exceptions)

- | | |
|--|---|
| Allion Y., 1985. | Lecoïnte A., 1979. |
| Allion Y., 1989. | Lecoïnte A., 1993. |
| Allion Y., 1993. | Lecoïnte A., Boudier P. & Hunault G., 1991. |
| Anonyme, 2003. | Lemoine G., 1999. |
| ANTEA, 1996. | Lemoine G., 2000. |
| Arnal G. & Lamade E., 1987. | Lemoine G., 2002. |
| Baudoit G., 1993. | Livory A., 1999. |
| Béton et Granulats Sylvestre, 1999. | Livory A., Lepertel N., Brunet L., Guérard P. & Quinette J.-P., 2000. |
| Blancher P. & Paquet P., 1999. | Maubert P., à paraître. |
| Boulet L., 1996. | Millarakis P. & Parent G.H., 1995. |
| Boulet L., 1999. | Moore N.P., Kelly P.F., Lang F.A., Lynch J.M. & Langton S.D., 1997. |
| Brunaud E., 1997a. | Morhain E., 1992. |
| Brunaud E., 1997b. | Morhain E., 1993. |
| Chambaud F., 1993. | ONF (83) & BEPA, 1997. |
| Coppe J.L. & Noiret C., 1995. | Peresson J.P. & Grangé P., 2000. |
| Cuénot E., 1993. | Petit D., 1977. |
| Danais M. & Montfort D., à paraître. | Picaud F. & Petit D., 1998. |
| Decocq G., 1994. | Riout J.P., Riout M. & Campion M.N., 2002. |
| Duret J.L. & Chiffaut A., 2000. | Robert J.C., Cretin J.Y. & Prouteau C., 1991. |
| ENCEM, 1996. | Robert J.C., Cretin J.Y. & Prouteau C., 1993. |
| ENCEM, 2001a. | Russell W.B. & La Roi G.H., 1986. |
| ENCEM, 2001b. | Saout M. & Tréhen P., 1984. |
| ENCEM, 2002. | Schneider N. & Wahis R., 1998. |
| Etude environnement, 1998. | SIEE, 1997. |
| Floraine, 2003. | Société Méridionale de Carrières, 1997. |
| Frain M., 1984. | Sud Aménagement Agronomie, 1999. |
| Frain M., 1991. | Thievent P., 1993a. |
| Frochot B., 1993. | Thievent P., 1993b. |
| Gauthie C., 1998. | Thinon M., 1984. |
| Granulats et matériaux de la Cote, 1987. | TP Para Lucien, 1995. |
| Guichardon P., 1988. | VICAT, 1998. |
| INRA Châlons-sur-Marne, 1984. | Vinay T., 1983. |
| Khater C., à paraître. | Wattez J.R., 1977. |
| Ladet A. & Bauvet C., 2002. | |
| Lazard S.A., 2001. | |

2 -Ecologie de la restauration

- AFIE, 1993.
- AFIE, 1999.
- Alard D., 2002.
- Anderson P., 1995.
- Armstrong K.N. & Nichols O.G., 2000.
- Arnal G., 1984.
- Arnal G., Griveaux B. & Robert J., 1985.
- Aronson J. & Le Floc'h E., 1996a.
- Aronson J. & Le Floc'h E., 1996b.
- Aronson J., Dhillon S. & Le Floc'h E., 1995.
- Aronson J., Dhillon S. & Le Floc'h E., 1999.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1993a.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1993b.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1995.
- Ash H.J., Gemmill R.P. & Bradshaw A.D., 1994.
- Barnaud G., 1995.
- Bell L.C., 2001.
- Bell S.S., Fonseca M.S. & Motten L.B., 1997.
- Berube M.E. & Lavoie C., 2000.
- Booth D.T., Gores J.K., Schuman G.E. & Olson R.A., 1999.
- Box J., 1993.
- Box J., 1996.
- Bradshaw A.D. & Chadwick M.J., 1980.
- Bradshaw A.D. & Hutt R.F., 2001.
- Bradshaw A.D., 1983.
- Bradshaw A.D., 1984.
- Bradshaw A.D., 1993.
- Bradshaw A.D., 1997.
- Bradshaw A.D., 2000.
- BRGM-SGR Ile-de-France, 1985.
- Brofas G. & Karetos G., 2002.
- Brofas G. & Varelides C., 1999.
- Brown V.K. & Gange A.C., 1992.
- Brown V.K., 1982.
- Brown V.K., 1984.
- Brun J.J. & Guichardon P., 1991.
- Brun J.J., 1987.
- Cairns J., 1998.
- Cairns J., 2000.
- Caparroy P., 1989.
- Chassany J.P., Crossenier C., Cohen M., Lardon S., Lhuillier C. & Osty P.L., 2002.
- Choi Y.D. & Wali M.K., 1995.
- Clements F.E., 1916.
- Clewell A., Rieger J. & Munro J., 2000.
- Connell J.H. & Slatyer R.O., 1977.
- Conservatoire des sites du Nord et du Pas-de-Calais, 2003.
- Coppin N.J. & Box J., 1998.
- Coppin N.J., 1982.
- Coumoul H. & Mineau H., 2002.
- Davis B.N.K., 1986.
- Davis M.A. & Slobodkin L.B., sous presse.
- Decocq G., 1999.
- Delarze R., 1994.
- Donadieu P. & Rumelhart M., 1983.
- Donadieu P., 2002.
- Dragovich D. & Patterson J., 1995.
- Dunger W., 1989.
- Folgarait P.J., 1998.
- Franklin J.F., 1993.
- 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. & Heinkele T., 2001.
- Galan P., 1997.
- Gawn P.E., 1982.
- Geist C. & Galatowitsch S.M., 1999.
- Häge K., Drebenstedt C. & Angelov E., 1996.
- Halla Y. & Kouki J., 1994.
- Halle S., 1993.
- Hannes G.P. & Hannes S.M., 1984.
- Harris J.A., Birch P. & Palmer J.P., 1996.
- Harvey H.J., 1982.
- Heckman J.R. & Cairns J., 1998.
- Higgs E.S., 1997.
- Hobbs R.J. & Norton D.A., 1996.
- Holl K.D. & Cairns J., 1994.
- Huxel G.R. & Hastings A., 1999.
- Ireland T.T., Wolters G.L. & Schemnitz S.D., 1994.
- Jochimsen M.E.A., 1996.
- Jochimsen M.E.A., 2001.
- Johnson C.D. & Skousen J.G., 1995.
- Khan A.G., Kuek C. Chaudhry T.M. Khoo C.S. & Hayes W.J., 2000.
- Le Floc'h E. & Aronson J., 1995.
- Le Floc'h E., Neffati M., Chaieb M., Floret C. & Pontanier R., 1999.
- Le Houérou H.N., 2000.
- Le Roux C., 2002.
- Lefevre J.C. & Leduc J.P., 1981.
- MacKay W.P., 1993.
- Majer J.D., 1989.
- Mentis M.T., 1999.
- Miao Z. & Marrs R., 2000.
- Michener W., 1997.
- Miles J. & Walton D.W.H., 1993.
- Naveh Z., 1994.
- Palik B.J., Goebel P.C., Kirkman L.K. & West L., 2000.
- Pietsch W.H.O., 1996.
- Prach K. & Pysek P., 2001.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1999.
- Schulz F. & Wiegand G., 2000.
- SERAVERT, 1991.
- Silva B., Prieto B., Rivas T., Sanchez-Biezma M.J., Paz G. & Carballeda R., 1997.
- Sionneau J.M., 1993.

Skotte Moller H., 1995.
 Skousen J.G., Johnson C.D. & Garbutt K., 1994.
 Snazell R. & Clarke R., 2000.
 Steffan-Dewenter I. & Tschamtko T., 2001.
 Strong W.L., 2000.
 Urbanek R.P., 1989.
 Usher M.B. & Jefferson R.G., 1990.
 Usher M.B., 1979.

Van Andel J., Bakker J.P. & Grootjans A.P., 1993.
 Wali M.K., 1999.
 Ward S.C., Koch J.M. and Ainsworth G.L., 1996.
 Webb J.K. & Shine R., 2000.
 Wiegleb G. & Felinks B., 2001a.
 Wiegleb G. & Felinks B., 2001b.
 Young T.P., Chase J.M. & Huddleston R.T., 2001.

3 - Généralités sur les carrières

Ames M., 1993.
 Barnaud G., 1998.
 Blanc V., 1993.
 Bouffort J.M., 1996.
 Bradshaw A.D., Marrs R.H. & Roberts R.D., 1982.
 BRGM Orléans, 1990.
 BRGM, 1994.
 Bruhier S., 1992.
 Brunet Y., 1983.
 CEMAGREF, 1983.
 CEMAGREF, 1984.
 Chépeau C., 1981.
 CNC-UNPG, 1998.
 Collectif, 1996.
 Collette J., 2003.
 Comité national de la charte, 1999.
 Coppin N.J. & Bradshaw A.D., 1982.
 Cordoleani M. & Cordoleani C., 1979.
 CPIE Pays de l'Oise, 2003.
 Dasnias P., 2002.
 Davis B.N.K., 1982.
 Donnez D., 1995.
 Down C.G., 1982.
 English Nature, Quarry products Association and Silica & Moulding Sands Association, 1999.
 Fernandez T., 1993.
 Finegan B.G. & Harvey H., 1982.
 Frochot B., 2000.
 Frochot B. & Godreau V., 1995.
 Frochot B., 2002.
 Gray H., 1982.
 Hodgson J.G., 1982.
 Humphries R.N., 1979.
 Humphries R.N., 1982.

Jefferson R.G., 1984.
 Juffard I., 1997.
 Kirmer A. & Mahn E.G., 2001.
 Kovacs J.C., Dasnias P., Barde S. & Le Bloch F., 2001.
 Lebahy C., 1983.
 Lecomte P., 2002.
 Lefeuvre J.C., Derain J.M.N. & Horgnies M., 1979.
 Malaval C., 1997.
 Meyer B., 1982.
 Odent B. & Lansiaert M., 1999.
 Organisation et Environnement, 1993a.
 Organisation et Environnement, 1993b.
 Paillat G., 2001.
 Park D.G., 1982.
 Ranson C.E. & Doody J.P., 1982.
 Ratcliffe D.A., 1974.
 Repérages, 1997.
 Sauveterre, 1985.
 Sengupta M., 1993.
 Sionneau J.M., 1987.
 Thomas H., 1992.
 Topp W., Simon M., Kautz G., Dworschak U., Nicolini F. & Prückner S., 2001.
 Union Européenne des Producteurs de Granulats, 2002.
 Union Nationale des Producteurs de Granulats, 1979.
 Vanpeene-Bruhier S. & Delory I., 2000.
 Vanpeene-Bruhier S., 2002a.
 Vanpeene-Bruhier S., 2002b.
 Vanpeene-Bruhier S., 2003.
 Vigne J.P., 1980.
 Voeltzel D. & Paillat G., 2003.
 Wheeler C.P., Cullen W.R. & Bell J.R., 2000.

4 - Généralités sur l'environnement

AEE - Agence Européenne de l'Environnement, 1999.
 Alard D., 2000.
 Amicale Européenne de Floristique, à paraître.
 Aronson J. & Le Floc'h E., 1996c.
 Barbault R., 1995.
 Barnaud G. & Chapuis J.L.
 Beebee T.J.C., Denton J.S. & Buckley J., 1996.

Bertrand A., 1997.
 Biggs J., Corfield A., Walker D., Whitfield M. & Williams P., 1994.
 Billeter R., Hooftman D.A.P. & Diemer M., 2003.
 BIOTOPE, 2002.
 Block W.M., Brennan L.A. & Gutierrez R.J., 1987.
 Blondel J., 1976.
 Blondel J., 1986.

- Bonnet E., Vilks A., Lenain J.F. & Petit D., 1997.
- Box E.O., 1996.
- Brunaud A., Cervaux P. & Bert G.D., 1988.
- Burel F. & Baudry J., 1999.
- Cassan S., Cambecèdes J. & Largier G., 2001.
- Cauderon A., 1996.
- Chapin III F.S., 1993.
- Cullen W.R., Wheather C.P. & Dunleavy P.J., 1998.
- 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.
- Dasnias P., 1996.
- Dasnias P., Gaultier C. & Le Bloch F., 1997.
- De Foucault B., 1979.
- De Foucault B., 1981.
- Debout G., 2001.
- Dinger F., 1997.
- Duhautois L., 1998.
- Dutoit T., 1996.
- Duval T., 1993.
- Etienne M., Aronson J. & Le Floc'h E., 1998.
- Felinks B., Pilarski M. & Wiegleb G., 1998.
- Frain H., Loiseau P. & Merle G., 1986a.
- Frain H., Loiseau P. & Merle G., 1986b.
- Friday L.E., 1987.
- Ghio C., 1978.
- Godron M., 1984.
- Hidvegi F.
- Holl, K.D., 1995.
- Humphrey C.L., Faith D.P. & Dostine P.L., 1995.
- Jefferson R.G. & Usher M.B., 1986.
- Johnson D.B., 1998.
- Khater C., 1999.
- Kjoss V.A. & Litvaitis J. A., 2001.
- Kryuchkov V.V., 1993.
- Landres P.B., Verner J. & Thomas R.W., 1988.
- Lecomte J., Legay J.M., Barre V. & Berlan-Darqué M., 1995.
- Lefevre J.C. & Barnaud G., 1988.
- Lefevre J.C., 1990.
- Legrand A., 1994.
- Lepart J. & Escarre J., 1983.
- Lévy-Bruhl V. & Coquillart H., 1998.
- Loppi S. & Pirintsos S.A., 2000.
- Luken J., 1990.
- Marrs R.H. & Bradshaw A.D., 1993.
- Massé L., 1964.
- Matheson J.D. & Larson D.W., 1998.
- Mazzolini S. & Ricciardi M., 1993.
- Mooney H., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E. & Schulze E.D., 1996.
- Moysan G., 1980.
- Mulligan D.R., 1996.
- Nicolis G., 1991.
- Noss R.F., 1990.
- Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 2002.
- Petit D., 1980.
- Picaud F., 1998.
- Pickett A., Kolasa J. & Jones C.G., 1994.
- Pickett S.T.A. & Parker V.T., 1994.
- Prach K. & Pysek P., 1994a.
- Prach K. & Pysek P., 1994b.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1993.
- Prach K., Pysek P. & Smilauer P., 1997.
- Reading C.J., 1997.
- Rochefort L., 2000.
- Royer J.M., 1977.
- Sänger H., 1995.
- Smith R.I.L., 1993.
- Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group, 2002.
- Somson P., 1984.
- Stott P.A., 1975.
- Tucker G.M. & Heath M.F., 1994.
- UEF & AIDEC, 1997.
- Urbanska K.M., Webb N.R. & Edwards P.J., 1997.
- Ursic K.A., Kenkel N.C. & Larson D.W., 1997.
- Usher M.B., 1993.
- Walton D.W.H., 1993.
- Western D., 1992.
- Whisenant S.G., 1999.
- Williams D.D., Tavares-Cromar A., Coleman J.R., Kushner D.J. & Happey-Wood C.M., 1994.
- Williams P., Biggs J., Corfield A., Fox G., Walker D. & Whitfield M., 1997.