Ce travail a été financé et réalisé sous l'égide des
COMITES REGIONAUX DE LA CHARTE BRETAGNE, BASSE-NORMANDIE ET PAYS DE LA LOIRE et du COMITE NATIONAL DE LA CHARTE

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 BIORET	Université de Bretagne Occidentale - BREST
Monsieur LECOEUR	Ecole National Supérieur d'Agronomie de Rennes – RENNES
Monsieur MONNAT	Université de Bretagne Occidentale - BREST

Comité de suivi	
Monsieur CHARIER	Charier CM - Président UNICEM Pays de la Loire
Monsieur CORLAY	UNICEM Bretagne
Monsieur COUVRAT	Carrière de Fréhel - CR Charte Bretagne
Monsieur de MAUPEOU	CN Charte
Monsieur DEVAUX	ENCEM - Nantes
Monsieur DUFFAUD	DIREN Basse-Normandie
Monsieur DUVAL	SCNG - CR Charte Bretagne
Monsieur du PEYROUX	Président CN Charte
Monsieur FRION	UNICEM Pays de la Loire
Monsieur GUINET	UNICEM Basse-Normandie
Monsieur JANOT	Morillon Corvol
Monsieur LANSIART	BRGM - Min. Environnement et Aménagement du Territoire
Monsieur LEBOSSE	DIREN Pays de la Loire
Monsieur LECOMTE	GSM - Ouest
Monsieur MAUBERT	Lafarge Granulats
Monsieur PIGNET	Girard & Fossez et Cie – Président CR Charte Basse-Normandie
Monsieur PREVERT	DIREN Bretagne
Monsieur RUELLAND	Charier CM
Monsieur RUNGETTE	DIREN Basse-Normandie
Monsieur VERDIER	ENCEM - Paris

L'organisation, le suivi et la coordination de l'étude ont été pilotés par François Maubert (Lafarge Granulats) & Patrick Lecomte (GSM-Ouest) et réalisés par les sociétés ENCEM et Ouest Aménagement :

Didier VOELTZEL	ENCEM - Nantes	Supervision, coordination
Gilles PAILLAT	ENCEM - Nantes	Synthèse, rédaction
Didier MONTFORT	Ouest Aménagement	Supervision

© PAILLAT, G., [2001]. Carrières de roche éruptive - Potentialités écologiques et réaffectations. Analyse bibliographique et réflexions. ENCEM & CNC - UNPG.

Carrières de Roche Éruptive
Potentialités Écologiques et Réaffectations

PRESENTATION DE L'ETUDE 1

OBJECTIFS 1

MISE EN PLACE DU PROGRAMME D'ETUDES 1

LE DOCUMENT 2

MAINTIEN DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE ET CARRIERES DE ROCHE ERUPTIVE 3

DE LA PROTECTION DE LA NATURE A LA BIOLOGIE DE LA CONSERVATION 4

LE CADRE REGLEMENTAIRE ET INCITATIF 6

Les mesures réglementaires de la protection des milieux naturels 6

Les obligations réglementaires de l'industrie d'extraction de matériaux 7

Anticiper la législation européenne : les industriels partenaires de son évolution 8

L'EVOLUTION DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE 10

La situation en Europe 10

La situation dans le Massif armoricain 15

LA VALEUR PATRIMONIALE DES CARRIERES ARMORICAINES 26

Les habitats 27

La flore 28

La faune 30

Conclusion : des connaissances insuffisantes 32

L'ECOLOGIE DES CARRIERES DE ROCHE ERUPTIVE 33

TYPOLOGIE DES CARRIERES DE GRANULATS 33

La fosse 34

Les stocks et dépôts 36

Les bassins 36

Les annexes 36

LES FACTEURS DE LA DIVERSITE DES CARRIERES 37

La nature de la roche mère des sites d'extraction 37

L'eau dans les carrières 37

La configuration, l'orientation… des carrières 39

La dimension des exploitations 40

L'âge des carrières 42

La diversité morphologique des substrats dans les carrières 44

Des lithosols aux sols évolués 49

Les modalités d'exploitation 53
Les perturbations 54
La carrière : lieu de quiétude et de refuge ? 55
Combinaison des facteurs de la diversité des carrières 55
LES TRAJECTOIRES DES MILIEUX DE CARRIERES 57
Quelques éléments généraux des trajectoires 57
Les facteurs de colonisation 60
Les trajectoires des milieux de carrières de roche éruptive 65
L'ECOLOGIE DE LA RESTAURATION 79
AU-DELA DE LA REGLEMENTATION 79
DEFINITION DES CONCEPTS DE BASE, APPLICATION AUX CARRIERES DE ROCHE MASSIVE 80
LA DIVERSITE DES ORIENTATIONS DE REAFFECTATION 83
Des orientations les plus artificielles…/… 83
…/… Aux orientations les moins dirigées 84
LA REAFFECTATION ECOLOGIQUE DES CARRIERES EN FRANCE 86
CONCEVOIR, ORGANISER ET CONDUIRE DES PROGRAMMES DE REAFFECTATION 88
Cadre général 88
Diagnostic des potentialités écologiques du site 89
Choix des objectifs écologiques de la réaffectation 90
Des objectifs modulables 91
Des objectifs intégrés 91
Aménagement et gestion 92
Un modèle pour la réaffectation écologique des carrières 92
CONCLUSION 94
BIBLIOGRAPHIE 95
LE TRAVAIL DE RECHERCHE DOCUMENTAIRE 106
LES SOURCES EXPLOREES 106
Les courriers, les e-mails… 106
La recherche sur serveurs télématiques 107
La recherche sur l'internet 107
Le travail avec la Bibliothèque Universitaire de Nantes 107
Les services de documentation *107*
LES DOCUMENTS EXPLOITES 107
GLOSSAIRE 110

PRESENTATION DE L'ETUDE

OBJECTIFS

Les Comités Régionaux de la Charte des producteurs de granulats de Bretagne, de Basse-Normandie et des Pays de la Loire ainsi que le Comité National de la Charte (C.N.C.) ont lancé depuis février 2001 un programme de recherches sur les **potentialités écologiques des carrières de roche éruptive du Massif armoricain**.

Ce programme s'inscrit dans la même logique que l'étude précédemment réalisée pour le C.N.C, et qui cherchait à évaluer le rôle et l'intérêt écologique des carrières en eau en tant que zones humides (Ecosphère, 2001). Il fait également suite à une étude menée dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats qui portait sur l'évaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation ainsi que sur les modalités de leur restauration écologique (Sauveterre, 1985). L'ensemble de ces démarches engagées à l'instigation des producteurs de granulats constitue autant de recherches de réponses aux questions que se posent les différents acteurs (exploitants, propriétaires, collectivités locales, associations…) sur le devenir des sites de carrières. Elles manifestent également la volonté de prise en compte du sujet par la profession.

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

Les trois principaux objectifs fixés pour le présent programme sont les suivants :

- inventorier les connaissances sur la valeur patrimoniale actuelle ou potentielle en matière de faune, de flore et d'habitats naturels et semi-naturels présents dans les carrières de roche éruptive du Massif armoricain ;
- dresser une synthèse des connaissances sur l'écologie des carrières de roche éruptive du Massif armoricain afin de mettre en évidence les facteurs importants déterminant leurs propriétés écologiques ;
- mieux maîtriser la mise en œuvre des programmes de réaffectation de ces carrières afin d'optimiser l'utilisation des techniques d'aménagement à vocation écologique lors des opérations de remise en état des sites.

MISE EN PLACE DU PROGRAMME D'ETUDES

Comme pour l'étude "carrières et zones humides" (Ecosphère, 2001), dès l'origine, la démarche des Comités Régionaux et du Comité National de la Charte s'est voulue transparente. Pour ce faire, le caractère objectif et scientifique du programme a été affirmé. Un comité de pilotage comprenant des scientifiques, des représentants des professionnels de l'industrie du granulat et du Ministère de l'Environnement a été mis en place, avec pour vocation le suivi technique, scientifique et financier du déroulement des études.

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

- réalisation d'une synthèse bibliographique et d'une réflexion sur l'état des connaissances concernant l'écologie des carrières de roche éruptive ;
- réalisation d'une expertise écologique d'un échantillon de sites de carrières du Massif armoricain ;
- rédaction d'un rapport de synthèse et d'un guide technique pour la restauration des carrières à destination de la profession et des partenaires.

LE DOCUMENT

Le présent document concerne le premier volet du programme de recherche, c'est-à-dire l'analyse bibliographique destinée à faire le bilan des connaissances disponibles sur l'écologie des carrières de roche massive, tant au niveau du Massif armoricain qu'à une échelle internationale. Cette analyse est étoffée d'une réflexion introduisant les modalités de réaffectation des sites d'extraction de granulats dans le cadre d'une écologie de la restauration appliquée aux carrières.

Le document comporte 3 chapitres :

1. **Un rappel de la conception actuelle de la biologie de la conservation et de la situation de la diversité biologique en Europe et dans le Massif armoricain.**
   Ce rappel permet de replacer la problématique dans son contexte européen et régional, autant sur le plan de la réglementation que sur celui des aspects naturalistes et écologiques.
2. **Une analyse des connaissances de l'écologie des carrières de roche éruptive.**
   Cette analyse met en évidence les principaux facteurs écologiques, connus, des carrières de roche éruptive. Elle montre que la rupture dans le paysage et la mise à nu de roches que provoque l'activité d'extraction, sont les éléments majeurs qui ressortent de la spécificité écologique des carrières de roche massive.
3. **Une réflexion portant sur le contexte réglementaire et volontaire de mise en œuvre de programmes de réaffectation des carrières de roche massive.**
   À partir de considérations scientifiques, réglementaires, techniques, économiques, foncières, etc., ce chapitre propose une réflexion sur la conception et la mise en œuvre de programmes de réaffectation écologique appliqués aux carrières de roche massive.

MAINTIEN DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE ET CARRIERES DE ROCHE ERUPTIVE

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

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

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

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

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

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

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

Aujourd'hui une part importante de la population a pris conscience de la réalité que représente la chute spectaculaire du nombre d'espèces présentes sur la planète. Cette érosion de la biodiversité dont la médiatisation s'est surtout faite à travers l'exemple des conséquences de la destruction des grandes forêts de l'hémisphère sud, constitue également pour l'Europe et la France une réalité quotidienne et de proximité qui se concrétise par une perte continue d'habitats et d'espèces (AEE, 1999).

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

D. Voeltzel

Ancienne carrière des Deux-Sèvres

DE LA PROTECTION DE LA NATURE A LA BIOLOGIE DE LA CONSERVATION

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

Si le concept de "protection de la nature" date au moins du 19ème siècle, pour la France, les premiers pas significatifs datent du début du 20ème. Jusqu'au début des années soixante-dix, conserver la nature revenait essentiellement à créer des parcs et des réserves pour préserver des morceaux de nature, des éléments ponctuels du paysage (Loi de 1930 relative à la protection des monuments naturels et des sites), des communautés ou des espèces "phares". Cette démarche très naturaliste (l'Homme agresseur) va évoluer sous l'influence conjointe de la prise en compte de l'espace dans son ensemble, des relations Homme-Nature et des avancées de l'écologie (Lefeuvre, 1990 ; Barnaud, 1995).

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

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

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

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

Concrètement, cette évolution s'est traduite en France, jusqu'aux années 80, par une quasi-absence de rigueur dans les démarches de conservation des espèces et des espaces, les actions étant essentiellement le fruit d'opportunités et de volontés individuelles (Barnaud, 1998). Ensuite, avec la création du Secrétariat Faune-Flore du Muséum National d'Histoire Naturelle et le développement et l'organisation des têtes de réseaux d'espaces protégés (Parcs nationaux et régionaux, Réserves naturelles, Conservatoires Régionaux d'Espaces Naturels…) intégrant des partenaires gestionnaires impliqués directement dans les politiques locales, des mesures de conservation moins "fixistes" ont été mises en place.

L'aboutissement actuel de cette évolution se traduit, sous l'impulsion de mesures incitatives émanant de l'Europe, par la volonté de conservation de sites ou de territoires tout en maintenant les activités économiques, sociales et récréatives qui y ont cours. On retiendra notamment la constitution et la conservation d'un véritable réseau de sites "spéciaux", dit réseau "NATURA 2000"[1] ou la mise en place de "contrats territoriaux d'exploitation" (CTE) dans le cadre des activités agricoles.

Les conditions nécessaires à la réalisation d'une véritable politique de biologie de la conservation, qui permettrait de faire face à l'effondrement généralisé et accéléré de la biodiversité, ne sont pourtant pas suffisamment souvent réunies. Les "traditionnels" conflits d'usages et d'intérêts, le

[1] Le réseau NATURA 2000 a pour objectif de contribuer à préserver la diversité biologique sur le territoire de l'Union européenne. Il assurera le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des habitats naturels et des habitats d'espèces de la flore et de la faune sauvage d'intérêt communautaire. Il est composé de sites désignés spécialement par chacun des États membres en application des directives européennes dites "Oiseaux" et "Habitats" de 1979 et 1992.

manque, de la part des scientifiques, d'effort de transfert des avancées théoriques vers des applications pratiques, le manque d'intégration de cette dimension systémiste par les naturalistes, l'inadéquation entre le moyen ou long terme inhérent à tout programme de conservation et la durée des mandats électoraux… ne fournissent généralement pas, que ce soit à un niveau local ou régional, les bases nécessaires à l'installation d'une réflexion sereine autour des questions de conservation.

LE CADRE REGLEMENTAIRE ET INCITATIF

Les mesures réglementaires en matière de conservation de la nature sont nombreuses. Elles peuvent être utilisées comme outils législatifs en tant que telles mais leur champ d'action opère également largement à travers la réglementation des différentes activités industrielles.

LES MESURES REGLEMENTAIRES DE LA PROTECTION DES MILIEUX NATURELS

Le corpus législatif permettant la protection des milieux naturels est issu de réglementations très diverses : urbanisme, législation forestière, protection de la nature, législation de la chasse et de la pêche, droit de la propriété… La diversité des mesures envisageables permet non seulement de s'adapter à de nombreuses situations, mais aussi de saisir des opportunités ou de répondre à des besoins locaux (Lévy-Bruhl & Coquillart, 1998). Certaines mesures favorisent des protections d'espaces limités (parc nationaux, réserves naturelles…) ; d'autres correspondent plus à la mise en œuvre d'une politique foncière (actions des conservatoires, politique des espaces naturels sensibles des départements…) ; d'autres encore explicitent plutôt le contenu des prescriptions de protection découlant de la loi (loi montagne, loi littoral…).

Rossolis à feuilles rondes

G. Paillat

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

Enfin, les ZNIEFF[2] et les ZICO[3] ne sont pas de véritables mesures de protection mais des "porter à connaissance", alors que les zones "spéciales" (ZPS, ZSC)[4] définies par les Directives

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

[3] Les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) délimitent des sites d'intérêt majeur qui hébergent des effectifs d'oiseaux sauvages jugés d'importance communautaire ou européenne.

Européennes "Oiseaux" et "Habitats" et devant aboutir à la construction du réseau NATURA 2000 peuvent se traduire dans certaines situations par des clauses réglementaires et contractuelles.

Ces différentes modalités de protection et de gestion des milieux naturels peuvent être classées en fonction de plusieurs critères proposés par Lévy-Bruhl & Coquillart dans leur document intitulé "La gestion et la protection de l'espace en 36 fiches juridiques" (1998) : objectifs, champs d'application, nature de la protection et possibilité de gestion.

LES OBLIGATIONS REGLEMENTAIRES DE L'INDUSTRIE D'EXTRACTION DE MATERIAUX

La remise en état des carrières est une obligation juridique depuis une trentaine d'années.

En effet, la première réforme du régime de l'exploitation des carrières, datée du 2 janvier 1970 (loi modifiant le Code Minier) a posé les bases de ce principe pour la première fois.

- L'article 83 du Code Minier, dans sa rédaction résultant de la loi de 1977, l'a confirmé en disposant que "la remise en état des sites…" est obligatoire dans les carrières.
- Le texte de référence suivant, qui a servi de base
- jusqu'alors (décret n° 79.1108 du 20 décembre 1979), stipulait dans son article 24 que "l'exploitant est tenu de remettre en état les lieux, compte tenu des caractéristiques du milieu environnant".
- Ce même article, en son alinéa 2, distinguait, outre la remise en état "élémentaire", le nettoyage, le régalage* et la remise en place des terres de découverte*.
- Sans autre précision, le décret n° 94.484 du 9 juin 1994, pris pour l'application de la loi du 4 janvier 1993 sur les carrières et modifiant le décret général s'appliquant aux installations classées (n° 77.1133 du 21 septembre 1977 modifié), indique que :
  - ✓ Article 17.1 –
    "Les autorisations relatives .../… aux carrières .../… fixent .../… les conditions de remise en état du site…/…".
  - ✓ Article 34.1 –
    "Lorsqu'une installation classée est mise à l'arrêt définitif, son exploitant remet son site dans un état tel qu'il ne s'y manifeste aucun des dangers ou inconvénients mentionnés à l'article 1er de la loi du 19 juillet 1976", à savoir les dangers ou inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature et de l'environnement, soit encore pour la protection des sites et des monuments.
- Enfin, l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières prévoit en son article 12.2 que :
  - ✓ "L'exploitant est tenu de remettre en état le site affecté par son activité, compte tenu des caractéristiques essentielles du milieu environnant. La remise en état du site doit être achevée au plus tard à l'échéance de l'autorisation, sauf dans le cas de renouvellement de l'autorisation d'exploiter.
  - ✓ Elle comporte au minimum les dispositions suivantes :
    - 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 la remise en état du site,

[4] La Directive "Oiseaux" et la Directive "Habitats" sont des instruments communautaires qui définissent un cadre commun pour le maintien de la diversité biologique par la conservation des habitats naturels, ainsi que la faune et la flore sauvage. Elles prévoient la mise sur pied d'un réseau de zones de protection spéciales (ZPS) et de zones spéciales de conservation (ZSC), appelé NATURA 2000.

- l'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation dans le paysage, compte tenu de la vocation ultérieure du site."

- La circulaire ministérielle du 2 juillet 1996 portant application de l'arrêté du 22 septembre 1994 précise que "la remise en état doit être coordonnée à l'exploitation du gisement".
- L'article 3 du décret n° 77.1133 du 21 septembre 1977 modifié prévoit que les conditions de remise en état doivent être présentées dans le dossier de demande. C'est l'arrêté préfectoral qui fixe en lui-même, précisément les conditions de remise en état du site.
- A l'arrêt définitif de l'activité, l'exploitant adresse au préfet une déclaration de fin de travaux au moins 6 mois avant la date d'expiration de l'autorisation (art. 34-1 du décret du 21 septembre 1977). Cette déclaration est accompagnée d'un dossier comprenant un plan et un mémoire sur la remise en état du site. Après consultation du maire de la commune et constatation de la conformité des travaux de remise en état par l'inspecteur des installations classées, un procès-verbal de récolement* est établi.
- Toutefois, après obtention de ce procès verbal de récolement*, l'exploitant reste responsable administrativement et civilement, notamment en cas d'incident mettant en cause la sécurité publique (éboulement…) ou de pollution.
- Notons également que depuis décembre 1995, en vertu de l'article 4.2 de la Loi du 19 juillet 1976, la remise en état du site après exploitation est garantie par le dépôt, dès la déclaration de début d'exploitation, de garanties financières par phases quinquennales qui permettent, en cas de défaillance de l'entreprise, de financer les travaux. Les articles 23.3 à 23.7 du décret du 21 septembre 1977 modifié définissent le régime de ces garanties financières.

Cette évolution a non seulement été prise en compte par la profession mais, cette dernière a même précédé la réglementation puisque, bien avant la mise en place de ces garanties financières légales, la Charte Professionnelle de l'Industrie des Granulats (en 1993) a posé les bases d'une telle évolution.

Les entreprises d'exploitation de granulats vont d'ailleurs bien souvent au-delà de la simple remise en état, et de véritables projets de réaménagement voient le jour. La mise en place des garanties financières constitue l'avancée la plus notable de ces dernières décennies dans le domaine de la réglementation de la remise en état des carrières.

Outre l'obligation d'obtenir une caution financière, cette réglementation impose à l'exploitant de fournir des évaluations de montants de garanties par phases quinquennales et oblige donc à une remise en état coordonnée. L'administration peut désormais demander des plans quinquennaux de remise en état lors des demandes d'autorisation.

ANTICIPER LA LEGISLATION EUROPEENNE : LES INDUSTRIELS PARTENAIRES DE SON EVOLUTION

Il existe toute une panoplie d'instruments conçus pour intégrer la dimension environnementale dans le processus de prise de décision économique. Par exemple, l'étude d'impact sur l'environnement (EIE : Directive 85/337 modifiée par la Directive 97/11/CE) pour réduire les dommages occasionnés par les grands projets d'aménagement est aujourd'hui une procédure bien établie, notamment en France (au début des années 90, on estimait à 7000 le nombre d'EIE par année au sein de l'Union Européenne, dont plus de 70 % en France) (AEE, 1999).

L'importance de l'intégration des considérations écologiques dans les décisions économiques et sectorielles est officiellement reconnue par l'article 6 de la version consolidée du Traité

d'Amsterdam, qui établit l'obligation d'intégrer les exigences de la protection de l'environnement dans toutes les politiques et actions communautaires.

- Le Traité d'Amsterdam –

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

Cette obligation s'est traduite dans le cadre du cinquième programme communautaire d'action pour l'environnement (5PAE) par la reconnaissance de quatre grandes catégories d'instruments : les instruments législatifs, les instruments liés au marché (instruments économiques et fiscaux et accords volontaires notamment), les instruments horizontaux d'appui (recherche, information, éducation…) et les mécanismes de soutien financier (Tableau 1).

- **Tableau 1 : Eventail des instruments de la politique environnementale (AEE, 1999)**

	Co-audits/management	
	Labellisation des produits	
Stratégies fondées sur l'information	**Information/éducation du public**	**Corriger le manque d'information**
	Prix/récompenses	
	Analyse coûts-bénéfices	
	Comptabilité verte	
	Recherche et développement	
	Étude d'impact sur l'environnement	
Législation sous forme de Directives	**Évaluation stratégique des incidences environnementales**	**Imposer des comportements spécifiques**
	Normes d'émission	
	Autorisations/permis/interdictions	
	Partage des responsabilités	
	Écologisation des marchés publics	
	Accords volontaires	
Instruments incitatifs	**Réformes des aides de l'état**	**Mesures d'encouragement**
	Permis négociables	
	Fiscalité environnementale	
	Permis transférables/mise en œuvre conjointe	

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

En examinant les instruments financiers de l'Union Européenne, on constate qu'ils comportent tous un volet concernant directement ou indirectement l'environnement. LIFE (L'instrument Financier pour l'Environnement) est précisément l'instrument spécifique du soutien au développement et à la mise en œuvre de la politique communautaire de l'environnement. Plus

particulièrement, LIFE-Environnement finance des actions novatrices de démonstration visant entre autres à l'intégration des considérations environnementales dans l'aménagement et la mise en valeur du territoire, ainsi qu'à la minimisation des incidences environnementales des activités économiques.

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

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

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

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

L'EVOLUTION DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE

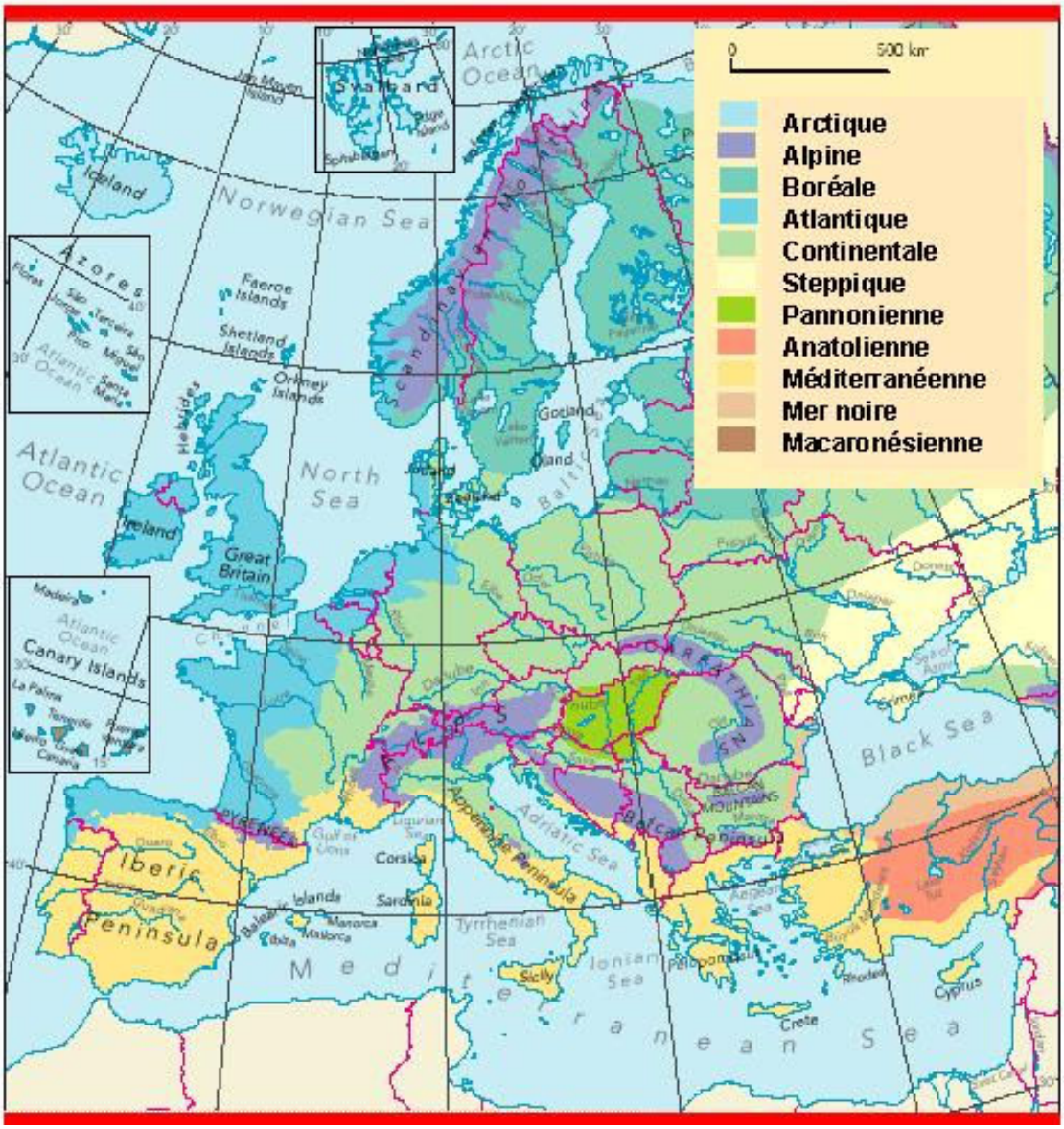
La perception de l'évolution de la diversité biologique nécessite une approche à l'échelle des unités biogéographiques plutôt qu'a celle des entités administratives. C'est pourquoi deux niveaux de perception sont proposés ici : celui de l'Europe et celui du Massif armoricain. Ils permettent d'une part d'appréhender la réalité des changements en terme de diversité biologique et d'autre part de mieux comprendre les répercussions de ces derniers en termes de réglementation émanant de l'Union Européenne, comme NATURA 2000. Enfin, les informations rapportées ici doivent fournir la base des critères de références permettant de situer l'intérêt écologique et patrimonial des carrières de roche massive du Massif armoricain.

LA SITUATION EN EUROPE

Bien que la biodiversité soit mieux documentée en Europe que dans beaucoup d'autres régions du monde, de nombreuses lacunes subsistent sur le plan de la connaissance et de la compréhension des problèmes.

LE CONTEXTE BIOGEOGRAPHIQUE EUROPEEN

Onze grandes régions biogéographiques définies par leur climat, leur géomorphologie et leur histoire, caractérisent la diversité biogéographique de l'Europe (Figure 1). Comparée à d'autres continents, cette diversité biogéographique se traduit par une richesse relativement peu importante, principalement en raison des effets des successions de périodes de glaciations.



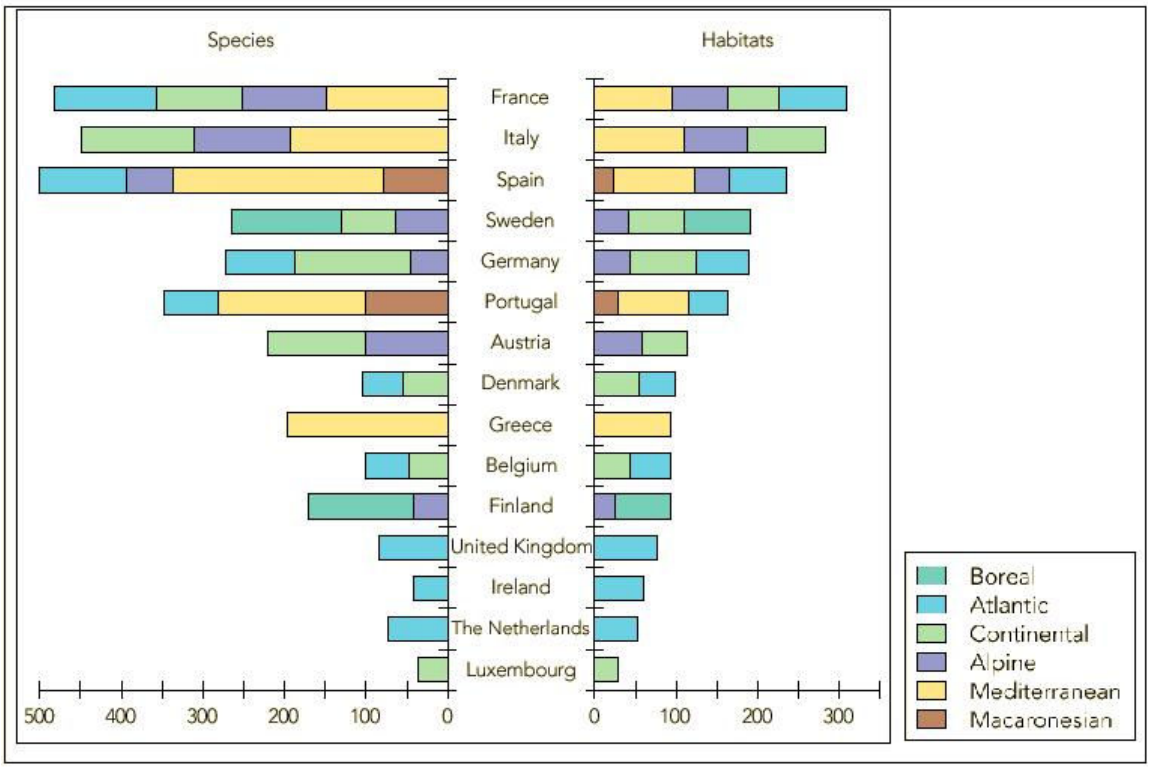
- **Figure 1 : Régions biogéographiques de l'Europe reconnues dans le cadre de la Directive "Habitats" de l'Union Européenne et dans celui de la convention de Berne (AEE, 1999)**

Néanmoins la proportion des espèces rencontrées uniquement en Europe est très élevée pour la plupart des groupes biologiques (Tableau 2). Cette situation souligne l'importance du continent européen et en particulier des régions méditerranéennes, pour la conservation des espèces et des habitats à l'échelle de la planète.

- **Tableau 2 : Participation de l'Europe à la biodiversité mondiale (connue ou estimée). (AEE, 1999).**

	Espèces connues dans le monde	Espèces connues en Europe	Proportion des espèces connues dans le monde présentes en Europe	Nombre d'espèces présentes uniquement en Europe	Proportion des espèces connues en Europe présentes uniquement en Europe
Reptiles	6500	198	3 %	90	45 %
Amphibiens	4000	75	2 %	56	75 %
Mammifères	4300	270	6 %	78	29 %
Poissons d'eau douce	8400	334	4 %	200	58 %
Oiseaux nicheurs	9600	514	5 %	30	6 %
Papillons	30000	575	2 %	189	33 %
Plantes vasculaires	260000	12500	5 %	3500	28 %

La part de responsabilité de la France pour la conservation de la biodiversité en Europe est très importante puisqu'elle occupe l'une des premières places des états de l'Union Européenne pour le nombre d'habitats et d'espèces rencontrés sur son territoire (Figure 2).



- **Figure 2 : Part de responsabilité des pays de l'Union Européenne dans la conservation des habitats de l'Annexe I[5] et des espèces de l'Annexe II[6] et pour chaque région biogéographique. La France se place dans le pool de tête des 4 pays les plus concernés. (AEE, 1999).**

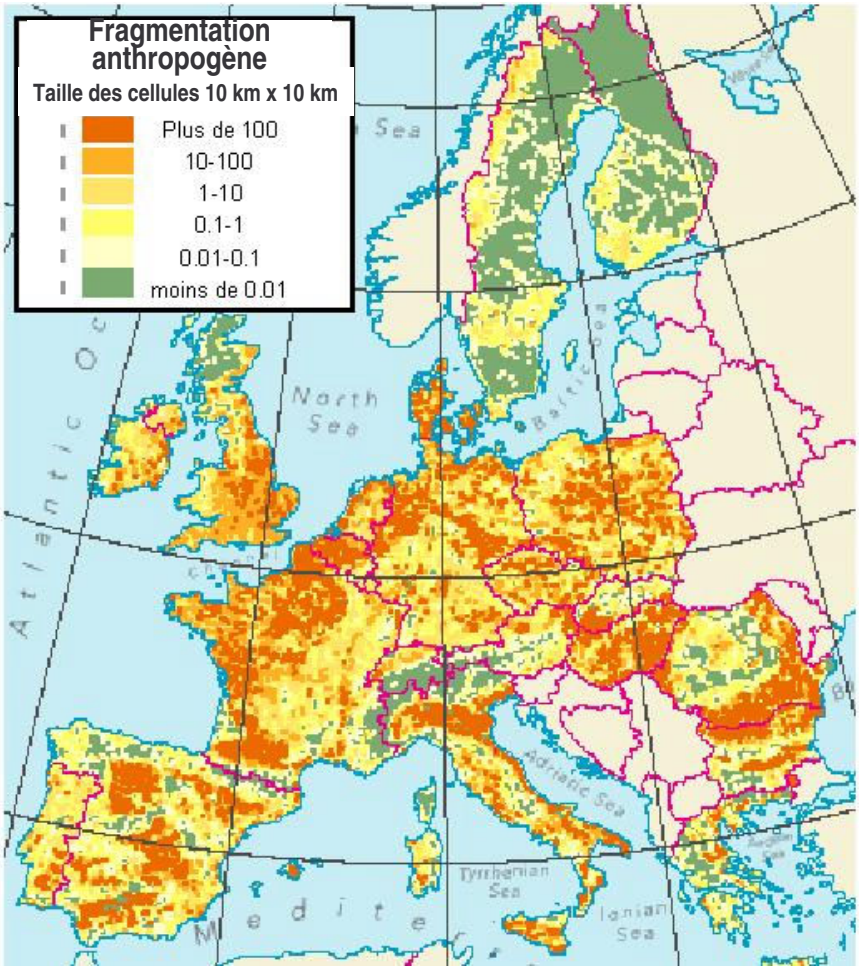
[5] L'Annexe I de la directive "Habitats" liste les types d'habitats naturels d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation.

[6] L'Annexe II de la directive "Habitats" liste les espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation. L'Annexe II est complémentaire de l'Annexe I pour la réalisation d'un réseau cohérent de zones spéciales de conservation.

L'ETAT DE LA BIODIVERSITE EN EUROPE

Le second rapport triennal sur l'état de l'environnement de l'agence européenne de l'environnement (AEE, 1999) et en particulier le chapitre 3.11 rédigé par le Centre thématique européen pour la protection de la nature et de la biodiversité (CTE/PNB) dresse un bilan de l'état de la biodiversité en Europe. Les principales conclusions de ce rapport sont :

- Quel que soit le niveau considéré (génétique, espèces écosystèmes, habitats), la biodiversité reste menacée au sein de l'Union Européenne. La perte et la fragmentation des habitats mettront en danger des populations* d'espèces autochtones, rares, endémiques et spécialisées, ainsi que des fonctions assurées par les écosystèmes*, alors que des espèces généralistes et envahissantes continueront de prospérer.
- S'il est vrai que les préoccupations liées à la protection de la nature commencent à être prises en compte dans les politiques sectorielles, des effets négatifs se feront encore sentir sur la biodiversité. Ils découlent notamment de l'intensification de l'agriculture, de la déprise agricole (cela peut être bénéfique pour des zones de culture intensive), de la monoculture forestière, du développement des infrastructures urbaines et de transports (Figure 3), des changements climatiques et de l'introduction d'espèces exotiques.



- **Figure 3 : L'augmentation de la demande d'espace (agriculture, foresterie, loisir, tourisme, transport, urbanisation, industrie) entraîne une fragmentation des habitats et une augmentation de l'influence des espaces utilisés intensivement sur les habitats semi-naturels et naturels. Les effets sur la biodiversité sont : une réduction de la taille des habitats et une augmentation de la distance entre les habitats favorables à certaines espèces (AEE, 1999).**

- Sur une note plus positive, des progrès sont prévus en matière d'acidification et d'eutrophisation*, ce qui devrait permettre une certaine amélioration de l'état des habitats et des espèces concernés. Il ne s'agira toutefois pas d'un retour à la situation d'avant la pollution, même après 2010.
- D'ici 2010, plus de 10 % du territoire de l'Union Européenne devrait faire l'objet d'une protection environnementale dans le cadre du Réseau NATURA 2000.
- La Stratégie de la Communauté Européenne pour la biodiversité (dans le cadre de la Convention sur la diversité biologique) sera mise en œuvre par des plans d'action conçus pour intégrer la biodiversité dans les activités de la Commission Européenne, ainsi que dans les politiques et les programmes où s'exerce la compétence communautaire.

Les habitats en Europe

Dans une grande partie de l'Europe, les habitats naturels et semi-naturels sont fortement affectés par l'urbanisation et le développement des infrastructures, l'intensification et la déprise agricole, la pollution, l'introduction d'espèces.

Un grand nombre d'habitats jouant un rôle important dans le maintien de la biodiversité – habitats semi-naturels – dépendent d'une gestion extensive à long terme. Ainsi, sur les 198 types d'habitats[7] reconnus par la Directive "Habitats", 29 sont partiellement d'origine anthropique* et leur maintien dépend de celui de leur gestion. Des changements dans l'usage des territoires vers une intensification ou un abandon représenteraient un danger pour ces habitats. Les écosystèmes* et les habitats sont de plus en plus pris en compte pour leur rôle fonctionnel (Mooney *et al.*, 1996), et la nécessité de soutenir leur gestion et leur utilisation est devenue une ligne directrice du bagage incitatif et réglementaire de l'Union Européenne.

Les espèces en Europe

Actuellement la diversité des espèces en Europe résulte de la combinaison complexe des espèces présentes naturellement et de celles introduites au cours des siècles pour des intérêts économiques ou pour des préoccupations de loisir (agriculture, horticulture, chasse, pêche…). Beaucoup d'espèces autochtones sont encore bien répandues et, pour certaines, leurs effectifs sont en augmentation, parfois en raison des lois de protection de la nature et de programmes de conservation ou de réintroductions (Skotte Moller, 1995). Certaines espèces bénéficient de nouvelles conditions environnementales (création de nouveaux habitats ou d'habitats de substitution comme dans les zones urbaines, augmentation de la ressource trophique) ce qui se traduit parfois pour des espèces opportunistes et généralistes par des phénomènes de pullulation.

Cependant de nombreuses espèces autochtones sont en déclin, même si le nombre d'espèces totalement disparues (extinction) a été faible en Europe, à l'exception des espèces endémiques :

- depuis les années 80, 17 plantes endémiques d'Europe se sont éteintes (certaines ont été sauvées sous forme cultivée) ;
- 38 % des espèces d'oiseaux sont menacées (Tucker & Heath, 1994) ;
- 45 % des espèces de papillons sont menacés ;

[7] Le sens d'« habitat » peu présenter certaines ambiguïtés. Historiquement, « habitat » signifie l'ensemble des facteurs écologiques qui caractérisent le lieu ou se développe une espèce ou une communauté biologique. Il comprend le biotope (milieu physique) et la biocénose (ensemble des êtres vivants). Ensuite, avec la publication de la Directive "Habitats" qui énumère une liste de type d'habitats sur la base de leur typologie hiérarchisée réalisée par le projet européen CORINE biotopes, il tend à se rapprocher de la définition de groupements* végétaux ou d'associations végétales.

- sur les 3200 espèces de mollusques terrestres et d'eau douce, 145 sont menacées (Bouchet et al, 1999) ;
- sur les 1697 espèces et sous-espèces de mousses présentes en Europe, au moins 24 % sont en danger (ECCB, 1995).

La part de la France dans la conservation de certaines de ces espèces est importante mais difficile à assumer, du fait qu'une proportion non négligeable des espèces françaises est menacée : 39 % des mammifères, 28 % des oiseaux, 33 % des reptiles, 33 % des amphibiens, 33 % des poissons, 10 % des plantes vasculaires (Tableau 3).

- **Tableau 3 : Richesse floristique et faunistique de la France métropolitaine et statut des espèces (Maurin & Keith , 1994 ; Olivier *et al.*, 1995 ; Simon, 1996 ; mise à jour SPN-IEGB-MNHN, 1997, *in* Barnaud, 1998).**

	Diversité actuelle	Espèces éteintes	Espèces menacées
Mammifères	119	3	46 dont 9 en danger, 15 vulnérables
Oiseaux	281	2	78 dont 22 en danger, 29 vulnérables
Reptiles	36	1	12 dont 2 en danger, 4 vulnérables
Amphibiens	37	0	18 dont 3 en danger, 8 très vulnérables
Poissons d'eau douce + cyclostomes	73	2	24 dont 2 en danger, 16 vulnérables
Invertébrés			
Insectes	34600	?	18 Lépidoptères, 52 Coléoptères en danger
Mollusques	1400	?	
Plantes vasculaires	4800	34	461 espèces ou sous-espèces en danger

De plus en plus d'espèces, essentiellement des plantes, sont introduites à des fins économiques ou de loisirs, avec parfois des conséquences dramatiques dans le cas d'espèces envahissantes, particulièrement dans les écosystèmes* marins, d'eaux douces et prairiaux.

Les interactions entre espèces sont perturbées et en particulier les relations proies/prédateurs (herbivores/carnivores, hôtes/parasites), entraînant des changements dans les chaînes trophiques et des altérations des écosystèmes*. Les espèces associées aux habitats anciens régressent alors que les espèces des habitats jeunes se répandent.

LA SITUATION DANS LE MASSIF ARMORICAIN

LE MASSIF ARMORICAIN : UNE UNITE DIVERSIFIÉE

Le Massif armoricain constitue un grand ensemble biogéographique caractérisé par son unité géologique et climatique. Cette vaste région, au climat de type atlantique et au relief aujourd'hui peu marqué du fait de l'érosion, recouvre totalement ou partiellement 13 départements et s'étend sur 4 régions jusqu'à la presqu'île du Cotentin, le Maine-et-Loire et la Vendée (Figure 4).

Corillion (1971) fournit une description détaillée des principaux traits de la géographie, de la géologie et du climat du Massif armoricain. Nous n'en restituons ici qu'un résumé succinct afin de rappeler les facteurs de spécificité de cette région naturelle.

• **Figure 4 : Le Massif armoricain**

Le Massif armoricain est formé par un ensemble où l'érosion a tout nivelé. Les crêtes appalachiennes, les plateaux et dômes granitiques, les collines schisteuses constituent les principaux éléments du relief. À l'opposé, une large dépression résultant d'un affaissement ancien du golfe Normand-Breton s'étend de Saint-Malo à Rennes et Angers,.

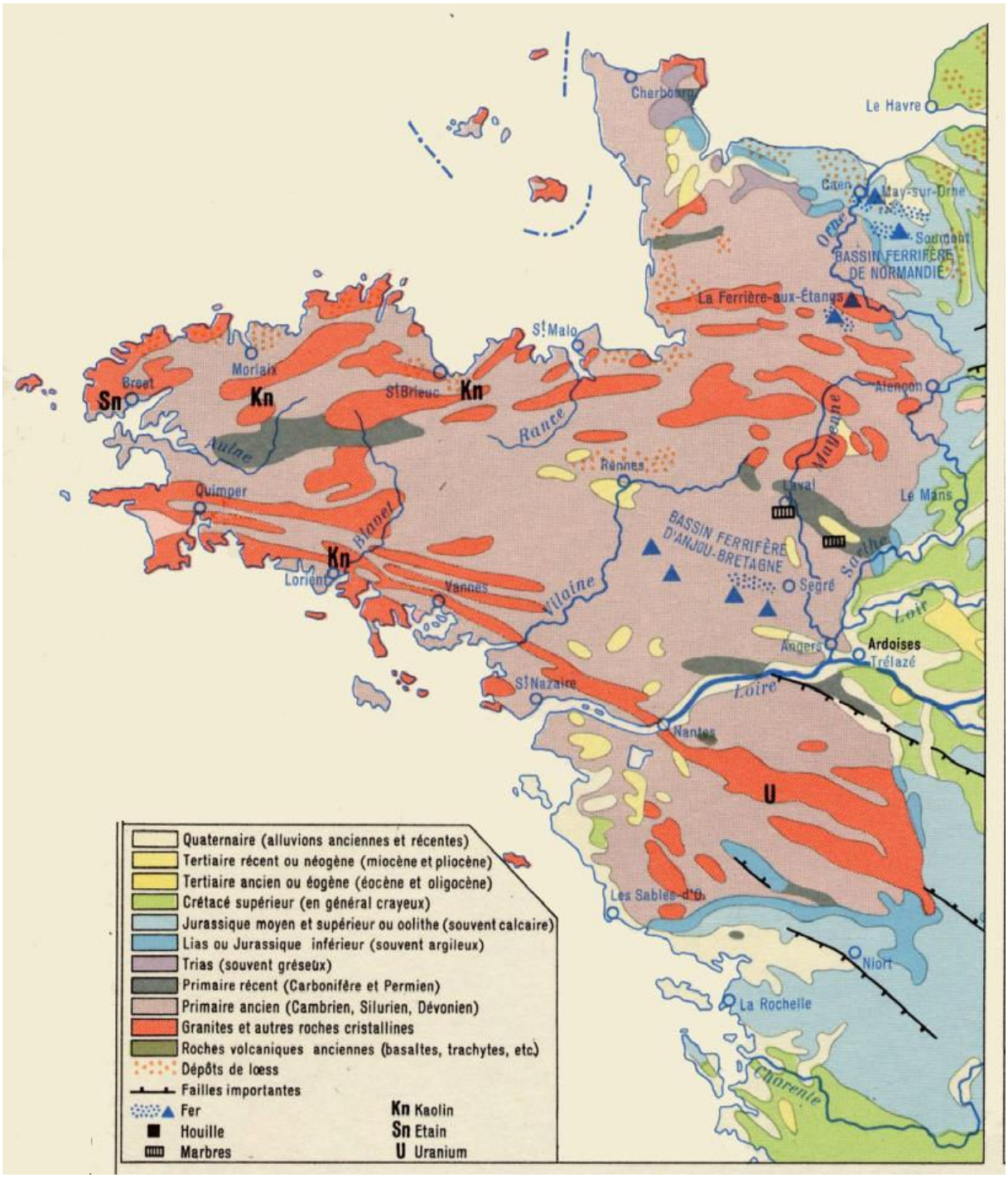
L'omniprésence de la mer constitue également un élément important de la topographie de la région. Pénétrant de tous côtés, elle fait du Massif armoricain un assemblage de presqu'îles. À cela s'ajoute l'effet de barrière imposé par l'estuaire de la Loire qui isole presque la Vendée de la Bretagne. Les traits de côtes sont variés : quasi rectiligne du Cotentin au Mont-Saint-Michel avec alternance de hautes falaises et de cordons dunaires, le littoral se poursuit au nord de la Bretagne par une côte à rias*, baies à faciès vaseux et îlots émiettés, puis par des falaises abruptes et découpées à l'ouest, pour se terminer dans sa partie méridionale (sud de la Bretagne, Vendée) par une forte représentation des ensembles sableux et vaseux.

Le fait le plus saillant de l'hydrographie armoricaine est le passage, à travers l'Anjou et le sud de la Bretagne, du plus long des fleuves français, la Loire. Le régime irrégulier de la Loire, l'importance des faciès sablonneux, la largeur de la vallée et son orientation même, ont de profondes répercussions sur la distribution des espèces animales et végétales. Par ailleurs, les cours d'eau sont nombreux, et l'un des aspects les plus courants du paysage armoricain est la profondeur et l'étroitesse d'un grand nombre de vallées. Dans les secteurs au relief plus doux, on observe parfois de vastes étendues de marais dont le maintien en zones humides est en grande partie dépendant de l'action de l'homme

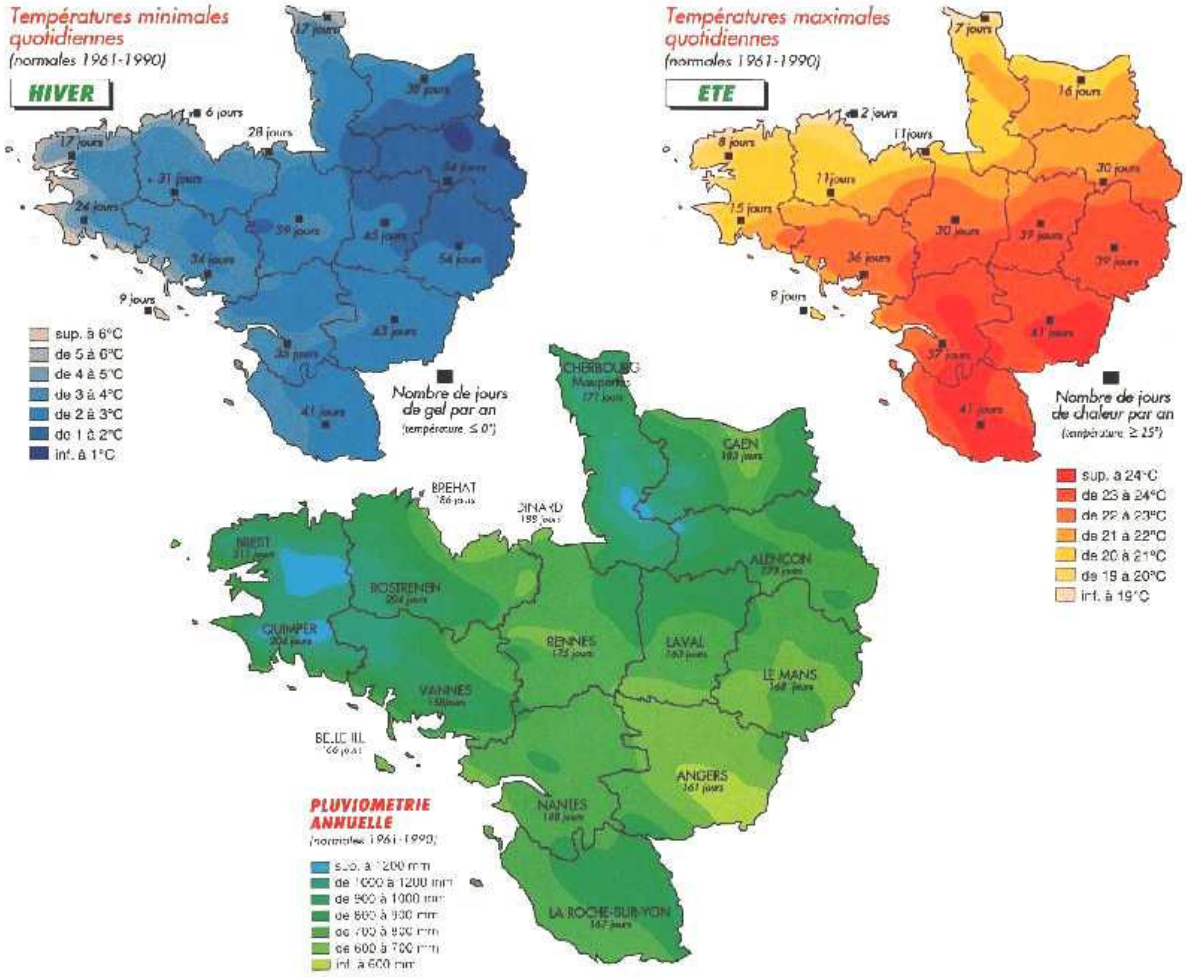
Le Massif armoricain doit surtout son unité à la composition d'un sous-sol formé, dans sa quasi-totalité, de **roches primaires acides** (en dehors de quelques lentilles calcaires, il n'y a guère que la frange littorale basse constituée de dunes et de marais littoraux qui présente des teneurs en calcaire plus élevées du fait de l'accumulation de sédiments coquilliers). De plus, limité du côté continental par le Bassin de Paris, le seuil du Poitou et le Bassin aquitain, où prédominent les

assises secondaires riches en calcaires tendres, il se trouve isolé des autres régions d'Europe occidentale au sous-sol analogue.

D'autre part l'atlanticité du climat (douceur et humidité atmosphérique importante) accentue l'opposition avec les régions limitrophes au climat subcontinental et contribue à sa grande originalité géographique. Néanmoins, il existe localement des variations sensibles de la pluviométrie, des températures et de l'ensoleillement (Figure 6) qui peuvent s'avérer importantes notamment pour la végétation.



• **Figure 5 : Principaux traits géologiques du Massif armoricain (d'après Serryn, 1977).**



- **Figure 6 : L'influence des courants et des vents marins modère les variations diurnes et saisonnières des températures de l'ouest de la France (climat tempéré océanique). Cependant, dans cette région habituée aux brusques changements de temps, les collines, très arrosées, contrastent avec le littoral et certains bassins dont la pluviométrie est l'une des plus faibles de France (d'après Météo France. Le climat de l'Ouest, 1995).**

La combinaison de tous ces facteurs écologiques offre finalement une diversité de situations (importante) dans le Massif armoricain, diversité responsable de l'existence de nombreux milieux différents dont certains sont particulièrement originaux et ne se retrouvent nulle part ailleurs en France.

L'ETAT DE LA BIODIVERSITE DU MASSIF ARMORICAIN

Faire un bilan de l'état de la biodiversité du Massif armoricain à partir des sources documentaires disponibles à ce jour n'est pas chose facile, voire possible. Il n'existe en effet que très peu d'études à long terme sur l'état et l'évolution des habitats de la flore et de la faune à l'échelle du Massif armoricain.

Cette discipline de l'observation, de l'inventaire et du suivi est en effet encore balbutiante et se confronte à un ensemble de difficultés méthodologiques. Du fait de l'absence de données anciennes chiffrées, les naturalistes manquent généralement de recul pour interpréter les évolutions des effectifs des populations*. Il est impossible de suivre individuellement la dynamique de chacune des espèces et il est nécessaire de faire des choix en identifiant des espèces indicatrices pertinentes. Sauf exception, la mise en place de protocoles permettant d'identifier objectivement une augmentation ou une diminution d'effectifs sur l'ensemble d'un territoire

nécessite l'élaboration de plans d'échantillonnages rigoureux dont l'application est extrêmement coûteuse en temps et en personnel compétent.

L'absence d'un observatoire de la biodiversité à cette échelle biogéographique (mais aussi à l'échelle nationale, Duhautois, 1998), constitue réellement un handicap à la compréhension des facteurs d'évolution de la biodiversité.

Cependant, la mise en place d'outils de connaissance tels que les ZNIEFF, le réseau NATURA 2000, les listes rouges[8], les atlas nationaux et régionaux[9], quelques travaux de suivis menés par des naturalistes et des scientifiques permettent malgré tout d'établir un **bilan partiel de la biodiversité du Massif armoricain**.

Avant cela il nous semble pourtant important de préciser ce qu'implique ici le terme de biodiversité. En effet l'ensemble de ces références fait plus état de bilans patrimoniaux que d'un réel diagnostic de la biodiversité qui doit nécessairement intégrer une dimension fonctionnelle, c'est-à-dire la nature des relations qui existent entre les espèces (Noss, 1990). La notion de patrimoine naturel en France est marquée par une forte connotation subjective : on parle de *"valeur ou bien patrimonial"* pour des entités disparates (flores, faunes et milieux naturels) assimilées parfois de façon approximative à des œuvres d'art dans le but de conforter une responsabilité nationale ou mondiale pour leur transmission aux générations futures (Lefeuvre, 1990 ; Barnaud, 1998). Les méthodes de cotation des milieux et du lancement des ZNIEFF en 1982 constituent autant d'éléments caractérisant cette approche patrimoniale. Si son intérêt tient à la facilité de communiquer les arguments au public et aux décideurs, son inconvénient majeur vient du caractère statique donné aux entités méritant protection. En effet, elle nécessite de faire des choix qui peuvent être arbitraires (il n'est pas possible de protéger toutes les espèces et tous les habitats pris individuellement) et de faire abstraction de toute notion de changement et de dynamique (le vivant n'est ni unique, ni immuable contrairement à l'œuvre d'art). Or, comme nous l'avons vu précédemment, la biologie de la conservation doit maintenant être conçue dans une optique évolutive.

Les paysages et les habitats

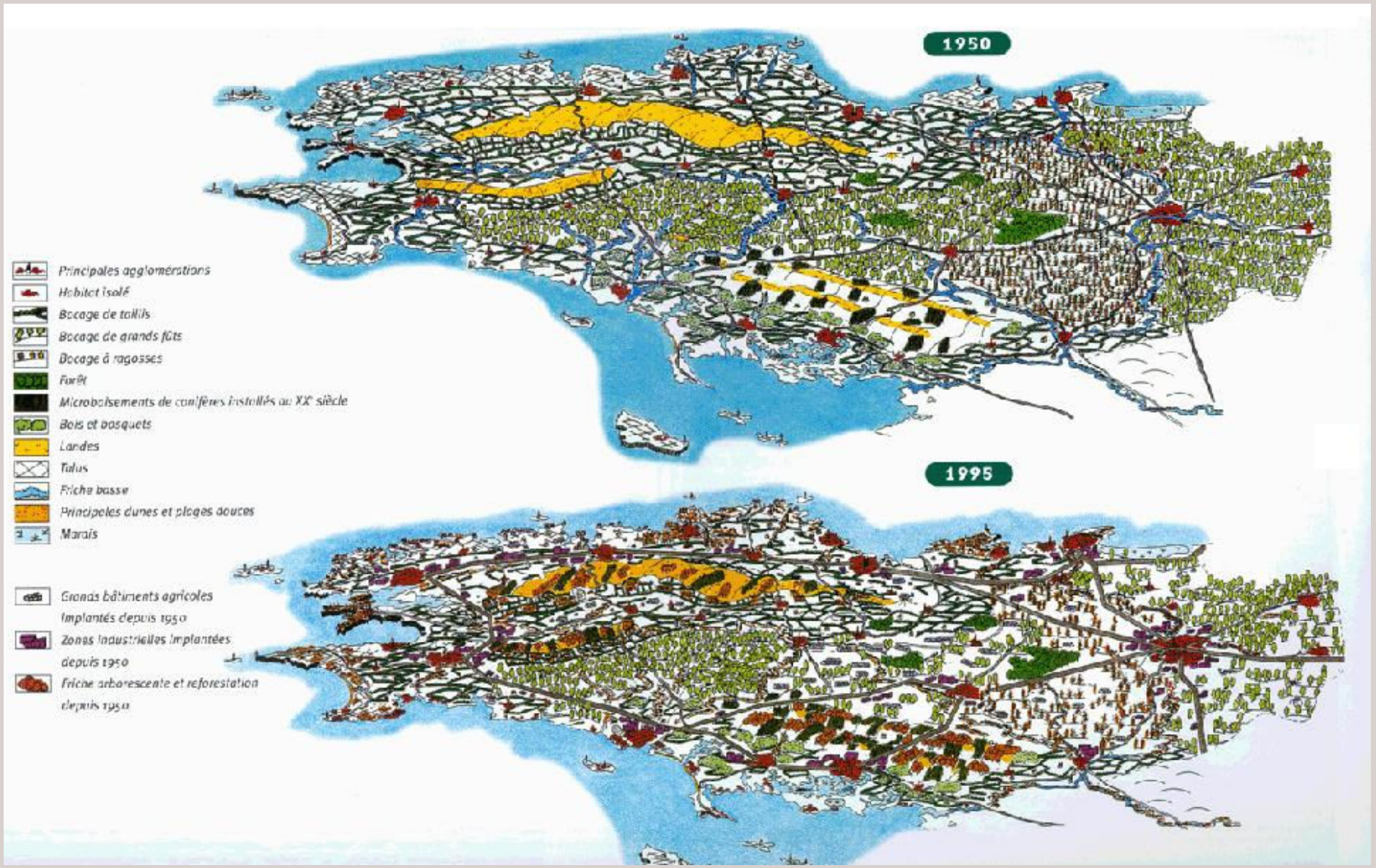
Annezo *et al.* (1999) soulignent pour la Bretagne que la diversité des paysages et des milieux est importante et que l'imbrication de tous ces milieux par le biais du réseau hydrographique relativement dense, renforce cette impression.

Dans un tel contexte, l'importance et la diversité des espaces naturels doivent être appréciées à plusieurs échelles. D'une part on distingue des grands ensembles, tels la Baie du Mont-Saint-Michel, les Monts d'Arrée, les landes* de Lanvaux, la vallée de la Loire *etc.,* et d'autre part des sites de faible superficie qui accueillent des milieux bien caractérisés et délimités (étangs, dunes, tourbières*, vasières, cordons de galets…) de grand intérêt pour des espèces végétales et animales inféodées à des conditions écologiques très particulières.

Concernant les espaces où les activités humaines, telle que l'agriculture, sont intégrées à un degré plus élevé, les paysages sont avant tout marqués par une structure bocagère développée, constituée d'un réseau plus ou moins dense de haies, structurant une mosaïque de bois, de landes*, de prairies*, de tourbières* et de terres cultivées. L'ensemble de ces milieux a subi ces dernières décennies de fortes transformations sous l'influence du développement des secteurs urbanisés, des infrastructures linéaires et de l'industrialisation des activités agricoles (DIREN Bretagne, 1999).

[8] Les listes rouges sont des études permettant d'identifier les espèces végétales et animales menacées sur le territoire national, leur répartition, leur statut par rapport aux menaces, leur écologie…

[9] Les cartes de répartition d'espèces constituent un outil précieux d'évaluation patrimoniale permettant, de visualiser la présence et parfois l'abondance relative des espèces à l'échelle de la zone cartographiée.



Essentiellement du fait des mutations agricoles, du développement agro-industriel et touristique qui ont eu lieu à partir des années 1950, la Bretagne présente de nouveaux paysages et une nouvelle diversité (DAT conseil *in* DIREN Bretagne, 1999).

Le développement des zones d'activité aux abords des grands axes routiers et en périphérie des villes contribue à uniformiser le paysage quotidien. Les nouvelles infrastructures de transport se substituent à des éléments du paysage préexistant (haies, boisements, prairies…) et les contraintes techniques induisent des mouvements de terres (déblai, remblai) pouvant avoir une grande incidence sur le paysage. De plus, l'évolution du paysage s'étend bien au-delà de l'emprise de la route : une voie nouvelle est généralement accompagnée d'un remembrement.

Depuis 1960, l'intensification agricole a également conduit à l'abandon de l'exploitation des sols les plus contraignants (fortes pentes, fonds de vallées…) qui tendent à s'enfricher. L'amélioration des conditions d'exploitation et le développement des cultures fourragères (notamment la culture du maïs) ont entraîné un élargissement et une détérioration de la trame bocagère (plus des deux tiers des talus, haies et taillis ont été arasés) qui marquent fortement le paysage. Cette évolution présente malgré tout de fortes variations géographiques, essentiellement dépendantes des orientations de politiques agricoles choisies par les régions administratives, les communes, les individus.

Malgré l'impact de ces aménagements sur les paysages et les habitats (remembrement et drainage de zones humides, enrésinement), la flore et la faune du Massif armoricain présentent, par de nombreux caractères, une originalité remarquable (DIREN & Conseil Régional Bretagne, 1995)

La flore

Notre description des principaux groupes floristiques du Massif armoricain s'est principalement appuyée sur trois ouvrages récents :

- La synthèse préliminaire de l'atlas de la flore vasculaire du massif armoricain intitulée "Le bilan régional de la flore bretonne" (Annezo *et al.*, 1999) ;
- la récente publication de "L'atlas floristique de la Loire-Atlantique et de la Vendée" (Dupont, 2001) ;
- l'ouvrage proposé par la DIREN et le Conseil Régional de Bretagne (1995) : "Curieux de nature – Patrimoine naturel de Bretagne" ;

Cependant, dès 1971, Corillion, dans sa "Notice détaillée des feuilles armoricaines - Phytogéographie et végétation du Massif armoricain", soulignait que l'homogénéité édaphique* et climatique du Massif armoricain et, en particulier l'absence de faciès calcaires importants, expliquent la relative pauvreté numérique de la flore vasculaire (la flore vasculaire bretonne regroupant les fougères et les plantes à fleurs ne compte environ qu'un quart de la flore française) et que l'intérêt de cette flore provient moins du nombre des espèces recensées que de la variété et de la distribution des éléments qui la composent.

De plus, la comparaison des connaissances actuelles avec celles fournies par la Flore du Massif armoricain de des Abbayes *et al.* (1971) nous montre que, sous l'action d'introductions, d'extensions d'aires et surtout de l'amélioration des connaissances botaniques, plus de deux cents nouveaux taxons* ont récemment été découverts (2209 taxons* étaient connus en 1996). Cette augmentation essentiellement liée à une sous-évaluation en raison de l'absence de données disponibles dans les années 1960 ne doit pas cacher que 20 % de la flore (soit une plante sur cinq) est jugée menacée en Bretagne et que près de deux plantes menacées sur trois (63,2 %) ne sont pas légalement protégées. Environ 5 % de la flore spontanée* sont présumés avoir disparu du massif armoricain (Tableau 4).

- **Tableau 4 : Diversité des plantes vasculaires spontanées* de Bretagne et de l'ensemble de la Loire-Atlantique et de la Vendée (d'après Magnanon, 1993 ; Annezo *et al.*, 1999 ; Dupont, 2001).**

	Diversité actuelle	*Espèces disparues*	*Espèces menacées ou très rares*
Massif armoricain	2209	57	445
Loire-Atlantique et Vendée	1700	101	325

La flore armoricaine est également remarquable par ses plantes "sans fleur" (cryptogames). Ainsi, pour la Bretagne, la flore lichénique est estimée à environ 1000 à 1200 espèces fortement représentées par le cortège* atlantique, mais également enrichie par l'élément méditerranéen et les espèces à affinités montagnardes. On pourra également retenir la présence de quelques fougères typiquement armoricaines. La Basse-Normandie et la Bretagne sont en effet les seules régions de France à abriter simultanément les deux espèces d'hyménophylles existant dans notre pays : *Hymenophyllum tunbridgense* et *Hymenophyllum wilsonii*, protégées sur l'ensemble du territoire national. La fougère des puits (*Trichomanes speciosum*) est également une espèce remarquable du Massif armoricain (elle fait aussi partie de la flore du Pays Basque et des Vosges). Elle s'observe dans certains puits, dans des chaos rocheux, des grottes marines et d'anciennes carrières de schiste. Enfin, on notera la présence du lycopode (*Huperzia selago*) qui affectionne les milieux très frais et humides, et les sols acides. Il a été redécouvert en 1994 sur un affleurement rocheux du centre Bretagne, alors qu'il était considéré disparu.

M. Baffray (in Danton & Baffray, 1995)

L'**Hyménophyllum de Tunbridge** (*Hymenophyllum tunbridgense*) est une petite plante vivace* à rhizome traçant d'où partent des feuilles pendantes de 3 à 8 cm de longueur. Cette fougère se rencontre parfois en populations* denses, formant des tapis sur des surfaces moussues, mais pour la Bretagne et la Basse-Normandie, il s'agit le plus souvent d'individus isolés. Elle s'observe sur des parois rocheuses fraîches et moussues, les chaos granitiques, et les côtes schisteuses en situation ombragée et humide.

La faune

Dans le "Dictionnaire du patrimoine breton" (Croix & Veillard, 2000), Jean-Yves Monnat nous rappelle que ce n'est ni dans l'existence d'espèces endémiques, ni dans le nombre d'espèces qu'il faut chercher l'originalité faunistique de la Bretagne. « Promontoire de l'Europe dans l'Atlantique, la Bretagne subit ce que les biogéographes nomment l'*effet de péninsule,* diminution progressive de la diversité vers l'extrémité des continents. À l'inverse, la position de proue dans l'océan et le climat qui en découle (humidité, faibles écarts thermiques) favorisent les animaux ayant des affinités pour les ambiances océaniques. De plus, la situation médiane entre nord et sud permet,

comme nulle part ailleurs en Europe, la cohabitation des espèces nordiques les plus tolérantes au soleil, et des animaux du midi les moins frileux. Profondément ancrée au nord-ouest dans les faunes atlantiques et arctiques, régulièrement pénétrée au sud-est par les cortèges continentaux et méridionaux, la Bretagne réalise le mariage réussi entre le nord et le sud. Là réside l'essentiel de son originalité ».

S'agissant de la faune, un diagnostic de son évolution est délicat à établir, par manque de documents de synthèse à l'échelle du Massif armoricain d'une part et même à celles des régions administratives d'autre part. Nous avons donc utilisé pour illustrer notre propos, même si cela est réducteur, l'inventaire des zones importantes pour la conservation des oiseaux (Rocamora, 1993) et le catalogue des espèces de la Directive "Habitats" présents en Bretagne (Bioret, 1994) complété par le bilan des connaissances des insectes de la même Directive (Fouillet, 1996). Pour mémoire, l'Annexe II de la directive "Habitats" liste les espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation. Elle est complémentaire de l'Annexe I (liste des habitats d'intérêt communautaire) pour la réalisation d'un réseau cohérent de ces zones spéciales appelé NATURA 2000.

Les reptiles

La distribution des reptiles évolue sensiblement le long du gradient Sud-Est à Nord-Ouest : on rencontre deux fois plus d'espèces en Loire Atlantique, dont la faune a une tendance relativement méridionale, que dans le Nord du Finistère qui présente une faune de type britannique. Aucune de ces espèces n'est inscrite dans l'Annexe II de la Directive "Habitats"

Les amphibiens

Des 27 amphibiens français, une quinzaine seulement atteignent la Bretagne et parmi eux, plusieurs ne parviennent pas au Finistère. Le triton crêté (*Triturus cristatus*) est la seule espèce d'amphibien du Massif armoricain qui soit prise en considération par l'Annexe II de la Directive "Habitats". Cette espèce, encore bien représentée au sud et à l'est du Massif armoricain, est absente du Nord-Ouest de la Bretagne. Elle tend globalement à se raréfier fortement, sans doute en raison de la réduction du nombre de mares dans le cadre des opérations de remembrement.

Jaromir & Libuse Knotek (*In* Lanka *et al.*; 1985)

Le Triton crêté (*Triturus cristatus*)

Les oiseaux

L'originalité de l'avifaune* du Massif armoricain est profondément marquée par l'omniprésence de la mer qui limite les deux tiers du massif armoricain et par l'importance des zones humides continentales. Ainsi, seulement deux des 34 zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO), identifiées pour le Massif armoricain par Rocamora (1993) sont de caractère boisé (forêt du Gavre en Loire Atlantique et forêt d'Olonne en Vendée). Les autres se répartissent entre les îles (Chausey, Sept Iles, Molène…), les baies et estuaires (Mont Saint-Michel, Loire…), les falaises et caps (Fréhel, Crozon…), les marais salants (Guérande, Noirmoutier), les marais et lacs d'eau douce (Brière, Grand-Lieu…).

La diversité et la qualité de ces milieux font du Massif armoricain, une région privilégiée par le nombre d'espèces d'oiseaux et leurs effectifs et un secteur biogéographique essentiel au niveau international pour le maintien d'*hivernants* et *nicheurs*. Depuis les années 1970, selon Rocamora & Yeatman-Berthelot (1999), plusieurs espèces semblent avoir des effectifs *nicheurs* en augmentation : le grèbe huppé (*Podiceps cristatus*), le petit gravelot (*Charadrius dubius*)…; d'autres ont en revanche des effectifs en régression : fuligule milouin (*Aythya ferina*), effraie des clochers (*Tyto alba*). Même si les causes exactes du déclin ou de l'augmentation d'une espèce sont sans aucun doute le fruit de la conjonction de plusieurs facteurs, de toute évidence, les agressions venues de la mer (pollutions chroniques, marées noires), la disparition et la dégradation de certains habitats (haies, landes*…), sont autant de facteurs qui fragilisent le statut privilégié de l'avifaune* armoricaine.

Les mammifères

Si on se restreint aux mammifères terrestres, on peut d'abord déplorer l'extinction récente du vison d'Europe (*Mustela lutreola*) alors que la loutre d'Europe (*Lutra lutra*), même si sa situation reste fragile, dispose d'un statut privilégié en comparaison de nombreuses régions de France. Huit[10] des douze espèces de chauves-souris prises en compte dans l'Annexe II de la Directive "Habitats" sont présentes dans le Massif armoricain. Pour la Bretagne, à l'exception du grand murin (*Myotis myotis*) qui semble assez répandu, au moins dans l'est de la région, toutes ces espèces sont considérées rares ou en régression. On retiendra par exemple le cas du grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*) dont des colonies fortes de 500 individus en 1954, comptabilisent actuellement des effectifs de 200 individus au maximum.

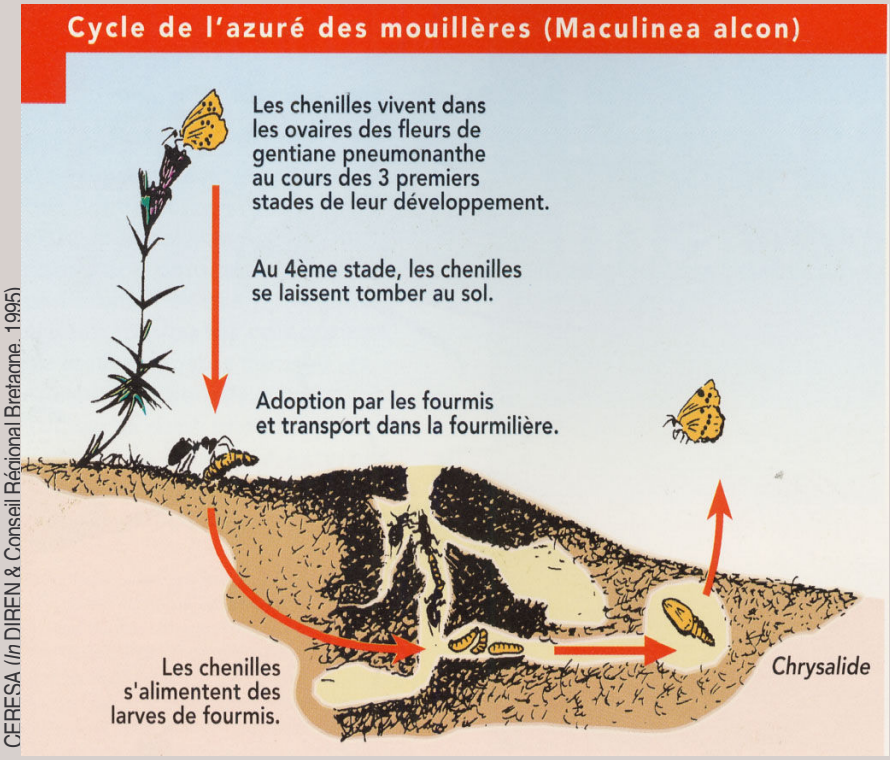
Didier Montfort

Le Grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*)

[10] Le petit rhinolophe, le grand rhinolophe, le murin à oreilles échancrées, le murin de Bechstein, le grand murin, la barbastelle auxquelles s'ajoutent le rhinolophe euryale et le mMinioptère de Schreibers observés à de très rares occasions.

Les invertébrés

Le territoire de la Bretagne compte actuellement au moins 9 espèces d'insectes inscrites sur les listes de la Directive "Habitats". Si l'écaille chinée (*Euplagia quadripunctaria*) et le lucane cerf-volant (*Lucanus cervus*) sont des espèces de papillons et de coléoptères encore assez communes, les autres espèces sont localisées dans un nombre peu important de sites : un à quelques dizaines (le damier de la succise –*Euphydryas aurinia*-, le grand capricorne –*Cerambyx cerdo*-, les libellules agrion de mercure –*Coenagrion mercuriale*- et cordulie à corps fin –*Oxygastra curtisii*-). À cette liste d'insectes il faut ajouter celle des espèces protégées à l'échelle nationale mais non prises en compte dans le cadre de la Directive "Habitats". Ce sont l'azuré des mouillères (*Maculinea alcon*) (aujourd'hui très raréfié) et le carabe à reflets d'or (*Chrysocarabus auronitens ssp subfestivus*), sous-espèce endémique des forêts de feuillus de la Bretagne centrale. Enfin, concernant les invertébrés, on ne pourra omettre la présence en Bretagne de l'une des dernières populations* de moule perlière (*Margaritifera margaritifera*) et du célèbre escargot de Quimper (*Elona quimperiana*) .



CERESA (*In* DIREN & Conseil Régional Bretagne, 1995)

L'Azuré des mouillères (*Maculinea alcon*) est un papillon diurne maintenant très localisé à de minuscules stations* du littoral des Côtes d'Armor, des landes* d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan. Cette espèce en voie de disparition entretient des relations complexes avec ses fourmis hôtes. La modification d'un seul facteur du milieu a des répercussions immédiates sur la survie de l'espèce.

Les facteurs d'érosion de la biodiversité du Massif armoricain

De manière générale, c'est dans les conséquences des activités humaines que résident les causes principales des menaces et de l'appauvrissement de la diversité biologique, qu'il s'agisse d'atteintes spatiales aux habitats (réduction, fragmentation, altération, uniformisation) ou de l'évolution des usages et de la gestion du territoire. On retiendra notamment comme facteurs de réduction de la biodiversité (DIREN Bretagne, 1999 ; Annezo *et al.*, 1999 ; Dupont, 2001) :

- la **consommation de l'espace**, nécessaire aux nouveaux équipements et à la progression de l'urbanisation
- à laquelle s'associe souvent une **fragmentation du territoire** qui peut induire une réduction des possibilités de mouvement des espèces entre les milieux.
- l'évolution des **pratiques agricoles**, qu'elles se soient traduites spatialement par l'élargissement de la taille des parcelles et un élargissement du maillage bocager, par

l'utilisation de biocides, par un fort accroissement de l'épandage des résidus de production hors-sol, ou par une profonde transformation des assolements (augmentation des surfaces en maïs au détriment de la prairie). Elles ont entraîné une homogénéisation des systèmes de production, source de réduction de la diversité des habitats et des espèces associées.

- la **dégradation de la qualité des eaux** courantes et stagnantes…

Si l'industrie d'extraction de granulats de roche massive peut dans certaines conditions participer à l'érosion de la diversité biologique armoricaine, les nuisances induites sont aujourd'hui mieux comprises, contrôlées et surtout fortement réduites du fait de l'évolution de la législation (mise en place des schémas départementaux de carrières, garanties financières[1]…), de la volonté affichée des professionnels de s'inscrire dans une politique de développement durable (Plan Environnement Entreprise en partenariat avec l'ADEME…), de la réalisation d'études "environnementales" par les Comités National et Régionaux de la Charte des Producteurs de Granulats *etc.* Les habitats remarquables sont exclus des périmètres d'exploitation, la production de matériaux est planifiée en accord avec l'estimation des besoins (les périmètres autorisés à l'extraction pour la Bretagne ne représentent que 0.36 % du territoire)…

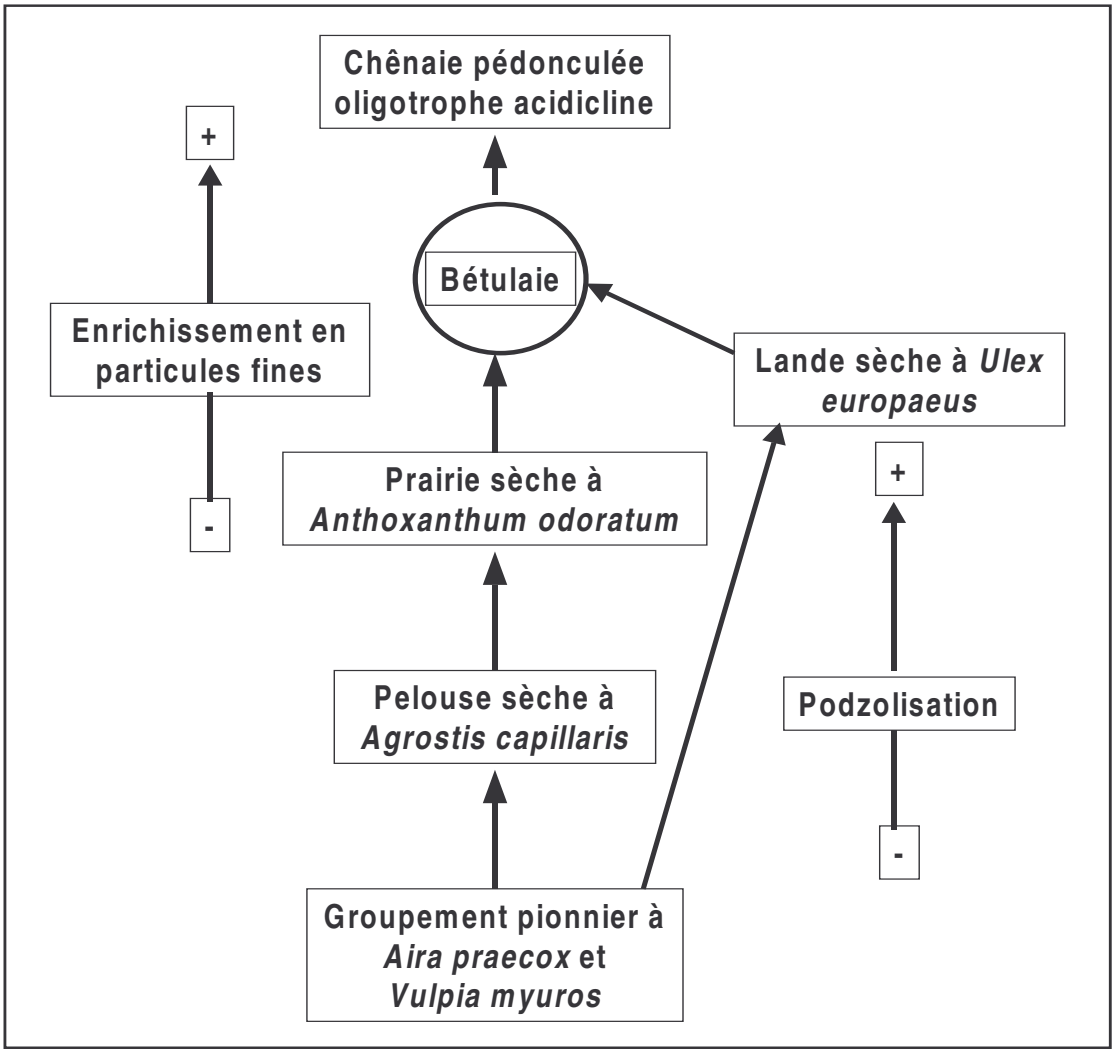
Cette volonté de progrès ne doit pourtant pas cacher les nombreux problèmes qui persistent dans les domaines de l'épuration des rejets industriels (boue et eau acide…), des émissions sonores, de poussières… L'ouverture d'un site, même s'il ne concerne que des habitats "ordinaires" reste une atteinte à un paysage en place, entraîne nécessairement la fragmentation et la disparition de milieux, la création de nouvelles infrastructures.

LA VALEUR PATRIMONIALE DES CARRIERES ARMORICAINES

Un bilan de la valeur patrimoniale (liste d'espèces et d'habitats) des carrières de roche éruptive du Massif armoricain est difficile à établir. Cependant les quelques éléments qui ont été recueillis dans la littérature et les informations communiquées par des scientifiques et des naturalistes (ou associations de naturalistes) nous permettent d'affirmer que si les carrières sont souvent banales sur le plan écologique, certaines accueillent des espèces animales et végétales ainsi que des habitats peu répandus sur le reste du territoire. Il semble également que l'intérêt écologique des carrières dépasse la simple valeur patrimoniale, en proposant par exemple, sur une faible surface, un grand nombre d'habitats et des schémas fonctionnels originaux. Cette diversité aura par ailleurs un grand intérêt pédagogique.

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

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



- **Figure 7 : Évolutions possibles de la végétation sur carreaux*. Le point commun des pelouses* à *Aira praecox* et à *Agrostis capillaris* est leur grande aptitude à résister à la sécheresse. Le lithosol* est formé d'un substrat* de sable et de gravier très filtrant et pauvre en matière organique. Sous certaines conditions (formation d'un micro-ranker* de quelques centimètres), la pelouse* pionnière* ouverte à *Aira praecox* cède la place à une pelouse* mésoxérophile* à *Agrostis capillaris* qui se ferme (d'après Boulet, 1999).**

Boulet (1996) a notamment étudié 40 carrières de roche massive acide sèches (grès, schiste, granite) de Basse-Normandie armoricaine, pour lesquelles il a pu identifier un nombre important de groupements* végétaux (14) par rapport à la surface totale prospectée. Cela est lié à la diversité topographique des carrières et à l'hétérogénéité des substrats* qui induit à quelques mètres près des conditions écologiques très différentes (Boulet, 1999 ; Chépeau, 1981). Des groupements* xérophiles* et des groupements* hygrophiles* peuvent se côtoyer sur un même site de quelques hectares. On retiendra plus particulièrement que les anciennes aires de stockage des graviers et des sables des carreaux* de carrières permettent l'installation successive de pelouses* acidiphiles* remarquables telles que les associations à canche précoce (*Aira praecox*) et à l'agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) (Figure 7).

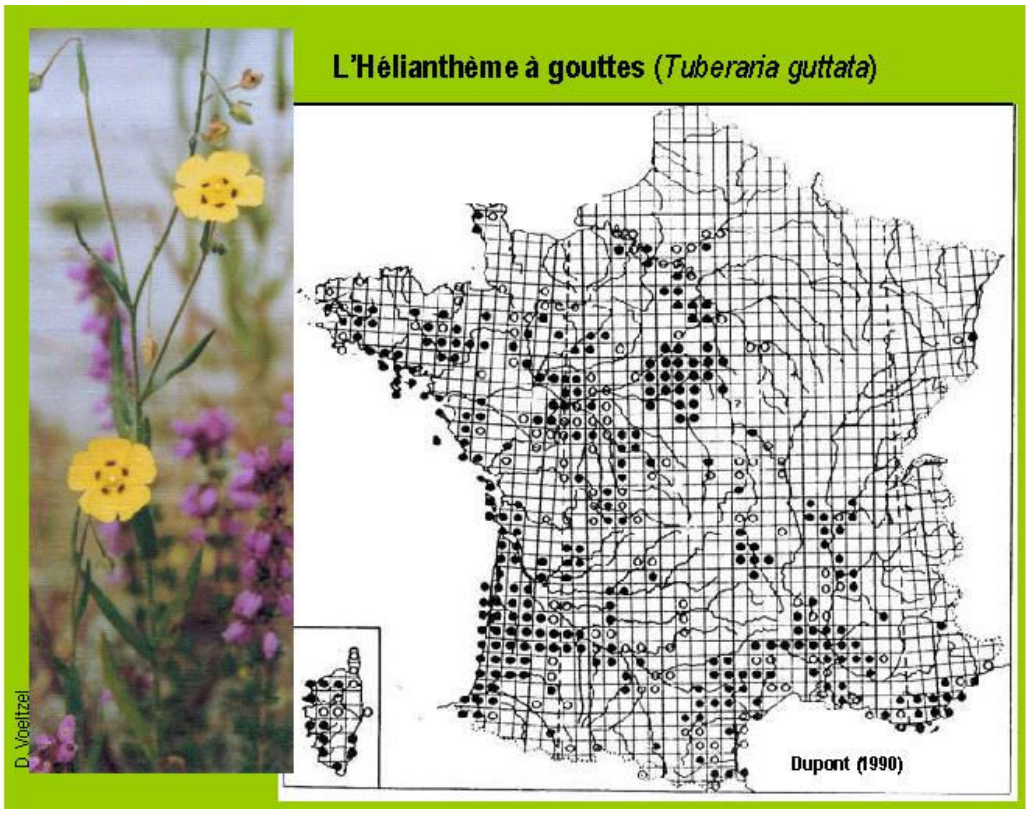
Des études plus ponctuelles telles que celles d'ENCEM (1997) et de Dupont (1992) sur des carrières qui se distinguent des précédentes par la présence d'eau, confirment cette diversité des habitats sur un espace restreint (chênaie-hêtraie, dépressions tourbeuses, chaos rocheux humides, suintements, prairies*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

On notera qu'aucun groupement* décrit par l'ensemble de ces auteurs n'est assimilable à un habitat d'intérêt communautaire. En effet, leur description ne semble pas correspondre à l'un de ceux repris par l'Annexe I de la Directive "Habitats", comme par exemple : "Formations* herbacées* mésoxéroclines sur silice à *Nardus stricta* et riches en espèces" ou "Végétations chasmophytiques des pentes rocheuses ; les sous-types silicicoles".

La recherche d'une éventuelle correspondance entre les habitats répertoriés dans les carrières et ceux de l' Annexe I de la Directive "Habitats" reste à faire de manière plus précise.

LA FLORE

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



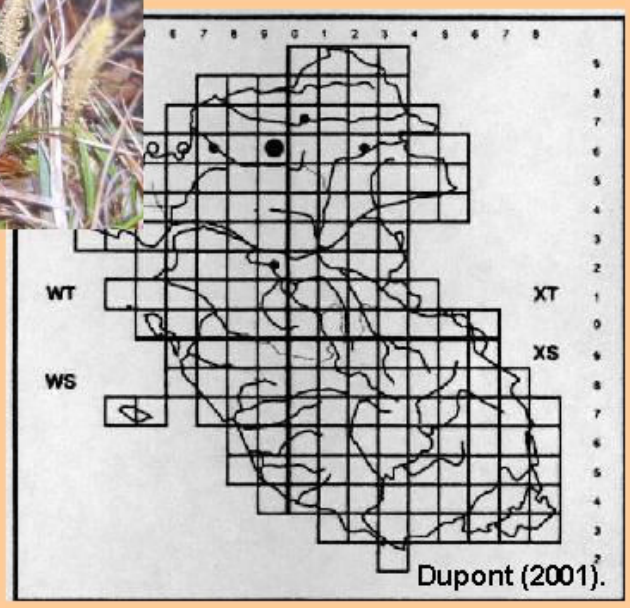
C'est aussi un environnement très sélectif, qui ne retient que les espèces adaptées à de telles conditions, difficiles dans l'ensemble. Chépeau (1981) ajoute que les anciennes carrières de Loire-Atlantique sur sol siliceux présentent généralement une flore assez banale en raison de l'abondance de ces terrains dans la région. Néanmoins, l'ouverture du milieu peut être l'occasion d'une colonisation par une flore intéressante.

Boulet (1996, 1999) souligne ainsi que pour la Basse-Normandie, parmi tous les groupements* végétaux qu'il a étudiés, les pelouses* acidiphiles*, héliophiles* et xérophiles* présentent des taxons* peu communs dans la région. C'est le cas de l'hélianthème à gouttes (*Tuberaria guttata*), espèce protégée régionalement en Basse-Normandie et qui, selon Provost (1993), est devenue

très rare et ne se rencontre plus que sur les falaises littorales de l'ouest du Cotentin ; de *Ditriticum lineare*, mousse observée pour la première fois en Normandie dans la carrière de grès de la Grande Noée (50) ou du millepertuis à feuilles linéaires (*Hypericum linarifolium*), qui peut parfois coloniser des fronts de taille ou des éboulis à fort ensoleillement.

Pour les carrières sèches de Loire-Atlantique, Chépeau (1981) retient la présence d'espèces d'intérêt moindre telle l'andryale sinueuse (*Andryala integrifolia*), espèce méridionale en nette expansion vers le Nord-Ouest. En revanche, A. Lachaud & J.Y. Bernard (com. pers.) notent lors d'inventaires effectués en 2001 dans l'ancienne carrière de Sandun (44), la présence d'espèces figurant sur la liste des espèces menacées en Pays de la Loire : jonc nain (*Juncus pygmaeus*), illecèbre verticillé (*Illecebrum verticillatum*), hélianthème à gouttes (*Tuberaria guttata*), sabline des montagnes (*Arenaria montana*), millepertuis à feuilles linéaires (*Hypericum linarifolium*). Dupont (2001), mentionne la présence du lycopode des tourbières* (*Lycopodiella inundata*) dans une carrière de Loire-Atlantique, ce site représentant actuellement la seule station* connue de cette espèce protégée dans le département.

G. Paillat



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

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

Enfin l'ancienne carrière de Villepail en Mayenne constitue l'une des carrières les plus intéressantes du Massif armoricain. Son carreau* a évolué vers une tourbière* comprenant quatre plantes protégées : deux au niveau national (le rossolis à feuilles rondes, *Drosera rotundifolia*, le lycopode des tourbières*, *Lycopodiella inundata*-) et deux au niveau régional (le narthécie des marais, *Narthecium ossifragum*, la grassette du Portugal, *Pinguicula lusitanica*) et de nombreuses espèces typiques de tourbières*. L'ensemble de ces observations a justifié l'inscription du site en arrêté de biotope et la délimitation d'une ZNIEFF.

LA FAUNE

La singularité de la topographie, de la nature des substrats*, du microclimat et parfois des conditions de quiétude qui se rencontrent souvent dans les sites de carrières, permet parfois leur colonisation par une faune remarquable. Les carrières peuvent alors, sous certaines conditions, constituer des sites essentiels pour le maintien de certaines espèces.

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

F. Desbordes (*In* Dubois *et al.*, 2000)

Le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*)

Nicheur quasi exclusif des grandes falaises naturelles, le pèlerin peut s'accommoder d'une carrière sèche, à condition d'y trouver un front de taille vertical d'une hauteur suffisante, présentant une vire ou cavité convenable (Frochot, 1993). Des cas sont connus pour le Massif armoricain (Debout, 2001). De tous les oiseaux susceptibles d'habiter les carrières, c'est probablement l'un des plus rares et des plus médiatiques.

Les fissures des fronts de taille et les galeries qui subsistent parfois peuvent être des lieux d'accueil pour certaines espèces de mammifères, et pour les chauves-souris notamment. Un nombre important de galeries de mines sont connues pour être des sites d'hivernage de chauves-souris, mais à notre connaissance, aucune carrière du Massif armoricain n'est connue comme site d'hibernation (si l'on excepte les exploitations de calcaire, les ardoisières exploitées en galeries souterraines et les carrières ayant fait ultérieurement l'objet d'aménagements miniers indépendants de l'industrie extractive). La présence en été d'individus dans des fissures et l'utilisation des carrières comme territoire de chasse ne fait aucun doute, mais l'importance de ces sites pour les chauves-souris et éventuellement pour leur sauvegarde reste à évaluer.

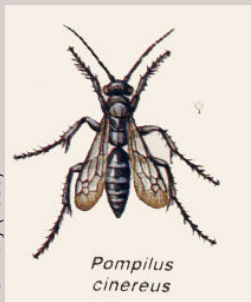
Les éboulis et les terrils* présentant des conditions thermiques sensiblement plus propices sont autant de milieux favorables à l'installation de reptiles. Les conditions trophiques ne permettent pas toujours le maintien d'adultes d'espèces telles que la couleuvre à collier (*Natrix natrix*) mais les éboulis et les buissons peuvent fournir des zones propices à l'incubation des œufs (ENCEM, 1997).

Lorsque le site comprend un espace en eau permanente, peu profond et à pentes douces (mare, étang), de nombreuses espèces d'amphibiens peuvent y effectuer tout ou partie de leur cycle de vie. On retiendra notamment l'importance des carrières pour des espèces pionnières* telles que le crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*) et le crapaud calamite (*Bufo calamita*) (Le Garff, comm. pers.). Ces deux espèces trouvent des conditions favorables à leur installation dans les carrières où les points d'eau sont peu végétalisés. Lorsque la végétation prend trop d'importance, elles quittent le site pour en coloniser un nouveau lorsqu'il s'en trouve un à proximité.

Jaromir & Libuse Knotek (*In* Lanka *et al.*; 1985)

Le crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*).)

La présence d'eau s'accompagne également d'une colonisation par de nombreux insectes aquatiques et plus particulièrement d'odonates. Et comme pour les reptiles, certaines espèces thermophiles* d'orthoptères peuvent trouver des conditions favorables à leur développement. Finalement, concernant la faune invertébrée, peu d'éléments de connaissance sont disponibles et des inventaires portant sur les mollusques, araignées, papillons *etc.*, seraient à entreprendre. Le travail de Schneider & Wahis (1998) contribuant à la connaissance des guêpes (Vespiformes et Pompilides) des carrières du Grès de Luxembourg est encourageant. Ces auteurs ont notamment identifié plusieurs espèces strictement associées aux carrières de Grès (*Pompilus cinereus*, *Agenioideus usurarius*, *Allyson spinosus*…).



Chinery (1988)

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

CONCLUSION : DES CONNAISSANCES INSUFFISANTES

La contribution des carrières au maintien de la biodiversité armoricaine est difficile à établir. S'il est évident que certaines espèces profitent des nouvelles conditions environnementales créées par la mise à nu de roches, la création de falaises *etc.*, il est en revanche beaucoup plus difficile de replacer ce constat dans un contexte plus large intégrant l'ensemble des facteurs (positifs et négatifs) d'évolution de la biodiversité et de mesurer la contribution quantitative des carrières dans ce domaine. Un diagnostic approfondi du fonctionnement écologique des carrières de roche massive et des espèces qui y trouvent une partie ou toutes les ressources nécessaires à leur existence s'impose. Il devrait permettre d'aboutir à un bilan plus objectif et fondé de la contribution des carrières au maintien de la biodiversité armoricaine.

L'ECOLOGIE DES CARRIERES DE ROCHE ERUPTIVE

Ce chapitre constitue une tentative de synthèse des connaissances de l'écologie des carrières de roche éruptive du Massif armoricain. Il s'appuie, comme pour le chapitre précèdent consacré au bilan patrimonial des carrières armoricaines, sur un faible effectif de références, qui pour l'essentiel sont celles de Boulet (1996) et de Sauveterre (1985). Cette synthèse représente donc autant un état du savoir qu'un état des lacunes se rapportant à l'écologie de ces carrières. Lorsque cela nous a semblé pertinent, elle s'est étoffée des enseignements tirés de travaux effectués dans d'autres régions ou portant sur d'autres types d'extraction (calcaires, pouzzolane, terrils* schisteux de mines…) et pouvant être raisonnablement transposés aux carrières de roche éruptive du Massif armoricain dans une première approche. Il s'agit entre autres des travaux de Petit (1980), Frain (1991) et Frochot *et al.*, (2000).

Il est important de signaler que l'ensemble des éléments bibliographiques auxquels nous avons accédé porte d'une part sur des études de carrières postérieures à leur exploitation et d'autre part sur des carrières dont les techniques d'extraction peuvent parfois être assez éloignées de celles pratiquées aujourd'hui. Nous ne disposons donc d'aucun élément sur les processus écologiques se déroulant pendant les phases d'extraction de matériaux telles qu'elles sont pratiquées actuellement. "L'écologie des *anciennes* carrières de roche éruptive" aurait donc été un titre plus adapté à ce chapitre.

TYPOLOGIE DES CARRIERES DE GRANULATS

Deux principaux types de carrières de roche massive peuvent être distingués :

- les carrières à flanc de coteau, dont l'exploitation débute en pied de versant pour entamer progressivement le coteau sur toute sa hauteur, cette dernière dépassant rarement une cinquantaine de mètres dans le Massif armoricain.

D. Voeltzel

Carrière à flanc de coteau

- les carrières en fosse (ou en « dent creuse ») qui exploitent un gisement de plateau en creusant une cavité de plus en plus large et de plus en plus profonde. Les profondeurs maximales sont de l'ordre d'une centaine de mètres.

D. Voeltzel

Carrière en fosse.

La principale caractéristique des carrières en fosse est leur remplissage par les eaux superficielles et souterraines, qui nécessite un pompage constant durant l'exploitation et provoque inéluctablement l'ennoiement de la fosse après arrêt de l'activité.

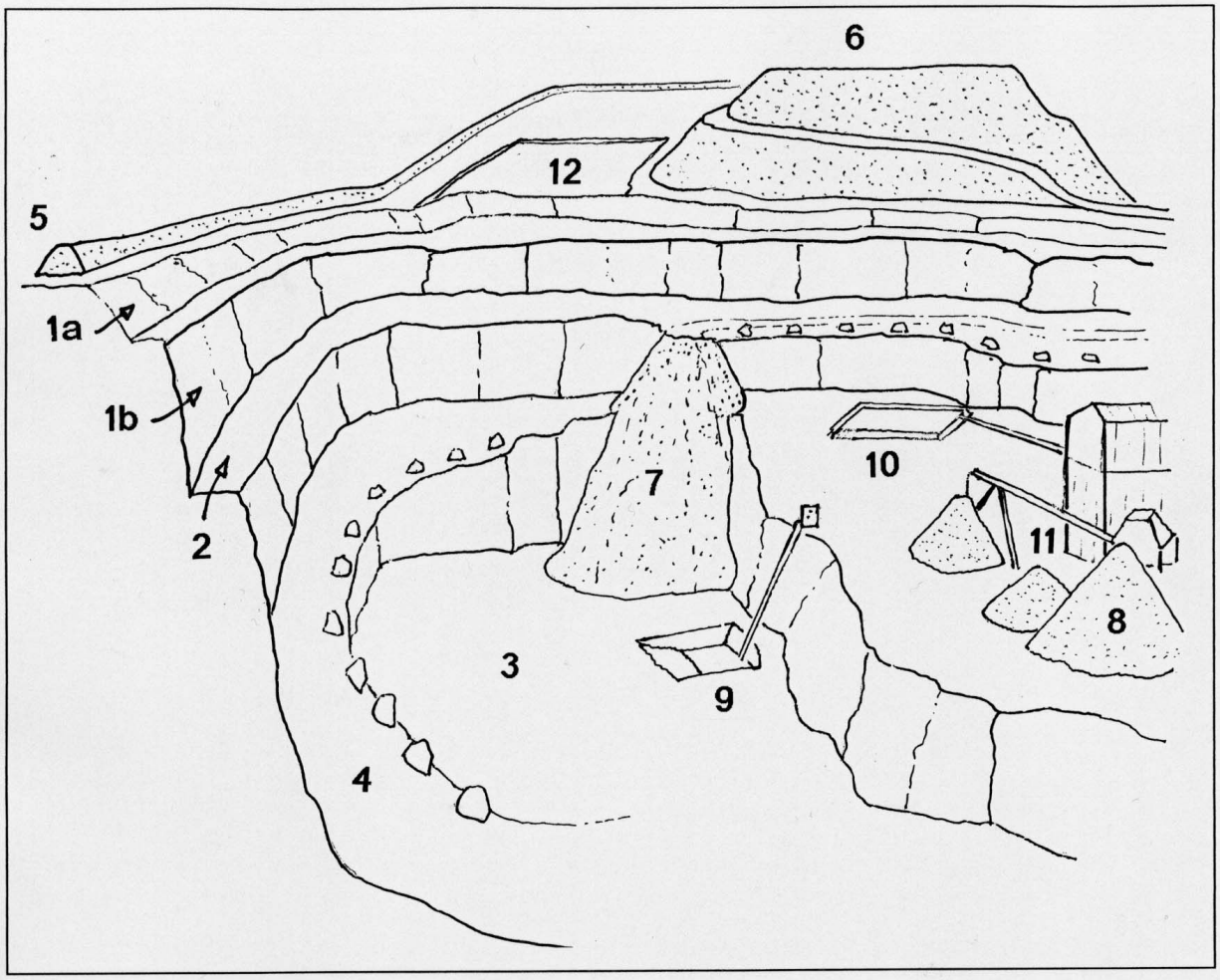
Ces deux types sont souvent associés, l'exploitation pouvant débuter sur un versant de vallon plus ou moins marqué pour ensuite s'approfondir. De ce fait, les carrières en fosse sensu lato sont les plus nombreuses dans le Massif armoricain.

Les principaux éléments qui constituent une carrière de granulats en activité sont figurés sur le schéma ci-joint. Les carrières de pierre de taille du Massif armoricain (granite) sont exploitées globalement selon le même principe. Les différences essentielles sont l'absence d'installation de traitement, la présence de stocks importants de blocs inexploitables (déchets) et une superficie généralement nettement plus réduite.

LA FOSSE

1. Les **fronts de taille*** sont les parois verticales de la carrière, obtenues par abattage de la roche à l'explosif (tirs de mines). La hauteur maximale réglementaire de chaque front (c'est à dire le gradin situé entre deux banquettes) est actuellement de 15 m.
   On distingue les **fronts inférieurs** (ou fronts sains) du **front de découverte** constitué de matériaux superficiels altérés (matériaux de découverte).
2. La **banquette*** est la partie horizontale qui sépare deux fronts de taille* (le front et sa banquette inférieure constituent un gradin). La largeur des banquettes* en exploitation (au pied d'un front en exploitation) est de plusieurs dizaines de mètres. En position ultime, les banquettes dites « résiduelles » excèdent rarement une largeur de 5 m.
3. Le **carreau*** est la partie horizontale formée par l'avancée progressive des fronts et donc localisée en fond de fosse. Sur les plus grandes carrières, le carreau atteint une surface de plusieurs dizaines d'hectares.
4. Les **pistes** relient entre elles les différentes parties de la carrière. Elles permettent notamment l'accès des engins aux fronts en exploitation. Leur largeur est souvent d'une dizaine de mètres.

SCHEMA D'UNE CARRIERE EN EXPLOITATION



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
- 8 Stock de granulats

Bassins

- 9 Bassin d'exhaure
- 10 Bassin de décantation

Annexes

- 11 Aire des installations de traitement
- 12 Zone décapée

LES STOCKS ET DEPOTS

5. Un **merlon*** est un dépôt linéaire de faible dimension (souvent 2 à 4 m de haut sur 5 à 10 m de large), édifié généralement comme élément de protection en périphérie de la carrière (sécurité du public, bruit, etc.). Les merlons sont constitués de matériaux de découverte* : terre végétale et/ou roche altérée.
6. Un **terril*** est un dépôt volumineux de matériaux non commercialisables appelés "**stériles***". On distingue les stériles de découverte (roche superficielle altérée) et les stériles de production correspondant à la partie non commercialisable du gisement après traitement.
   Le volume de stériles* produit est très variable d'une carrière à l'autre.
7. Les matériaux stériles peuvent être mis en **remblais** dans la fosse même quand les conditions d'exploitation le permettent (présence de fronts en position ultime).
8. La roche est concassée et criblée au niveau de l'installation de traitement pour la production de **granulats** de dimensions variables en fonction des besoins (ballasts ferroviaires, couches routières, mortiers, enduits,…). En attendant d'être évacués vers les chantiers, les granulats sont stockés en dépôts de plusieurs mètres de hauteur sur des surfaces parfois importantes (plusieurs hectares).

LES BASSINS

9. Le **bassin d'exhaure*** (ou de fond de fosse) est destiné à recueillir les eaux pluviales et souterraines collectées par la fosse (eaux d'exhaure) afin de pouvoir les évacuer par pompage vers l'extérieur (après passage dans un bassin de décantation). Sa superficie est souvent de l'ordre de 100 à 200 m2.
10. Les **bassins de décantation** permettent le traitement des eaux par simple gravitation pour réduire leur taux de matière en suspension (MES). Ils servent soit au traitement des eaux de lavage des matériaux en circuit fermé, soit au traitement des eaux d'exhaure avant rejet dans le milieu naturel. Leur nombre varie en fonction des capacités de l'installation de traitement et du volume d'exhaure.
    Les bassins sont curés régulièrement à la pelle mécanique. Les boues récupérées sont généralement stockées avec les matériaux stériles.

LES ANNEXES

11. La zone qui porte l'**installation de traitement** et les stocks de granulats constitue le secteur de plus grande activité de la carrière puisque c'est à ce niveau qu'aboutissent tous les matériaux extraits et que repartent les matériaux traités. Ce secteur abrite également, le plus souvent, diverses structures annexes telles que les ateliers, le pont-bascule, les réserves de carburants, *etc*.
12. L'exploitation du front de découverte nécessite d'enlever préalablement les différents horizons humifères qui constituent le sol. Cette opération fait apparaître des **zones décapées** sur des surfaces plus ou moins importantes en fonction de la fréquence des travaux de décapage.
    La terre végétale décapée est stockée en merlons avant d'être réutilisée pour la remise en état du site.

LES FACTEURS DE LA DIVERSITE DES CARRIERES

Une carrière, du fait de son étendue et de sa singularité dans le paysage environnant, constitue un système écologique en soi. Des échanges de matières et d'individus des différentes espèces l'ayant colonisée peuvent se produire entre ses différentes composantes (fronts de taille, carreau*, éboulis…) et participer à la constitution d'un système écologiquement fonctionnel.

Les principaux facteurs écologiques liés aux caractéristiques de la carrière elle-même, sont à rattacher aux propriétés géologiques du site, à sa configuration, la présence d'eau, son âge…

LA NATURE DE LA ROCHE MERE DES SITES D'EXTRACTION

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

L'EAU DANS LES CARRIERES

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

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

Le groupement* à jonc bulbeux (*Juncus bulbosus*) occupe de faibles superficies (quelques mètres carrés) du carreau* des carrières armoricaines. Il tend à se développer dans les ornières de chemins et dans les dépressions où l'eau est retenue par une mince couche de particules fines. Il profite des alternances de sécheresse et d'humidité.

Le groupement* à jonc acutiflore (*Juncus acutiflorus*) est comme le précédent, strictement acidiphile*. Il occupe toujours des portions mal drainées, où demeurent, d'une manière quasi permanente, des flaques d'eau peu profondes, même en période estivale.

La typhaie (*Typha latifolia*) se retrouve aussi bien sur roche acide que sur roche calcaire. Un substrat* fangeux (bassins de décantation…) et de l'eau permanente (mares et fossés peu profonds) sont les conditions nécessaires à son apparition et à son développement. La massette (*Typha latifolia*) manque généralement dans les très anciennes carrières car elle occupe souvent des zones inondées peu profondes et se trouve rapidement éliminée par la concurrence de la végétation ligneuse* hygrophile* (saules, bouleaux).

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

D. Voeltzel

Portion de carreau* inondé en permanence où se développe une végétation hygrophile* : massette (*Typha latifolia*)**, renoncule flammette** (*Ranunculus flammula*)**, jonc acutiflore** (*Juncus acutiflorus*).

Finalement, ces trois groupements* se distinguent par leurs exigences particulières : la forme sous laquelle l'eau est présente et l'épaisseur du substrat* (Tableau 5).

- **Tableau 5 : Exigences écologiques des groupements* hygrophiles* (d'après Boulet, 1996).**

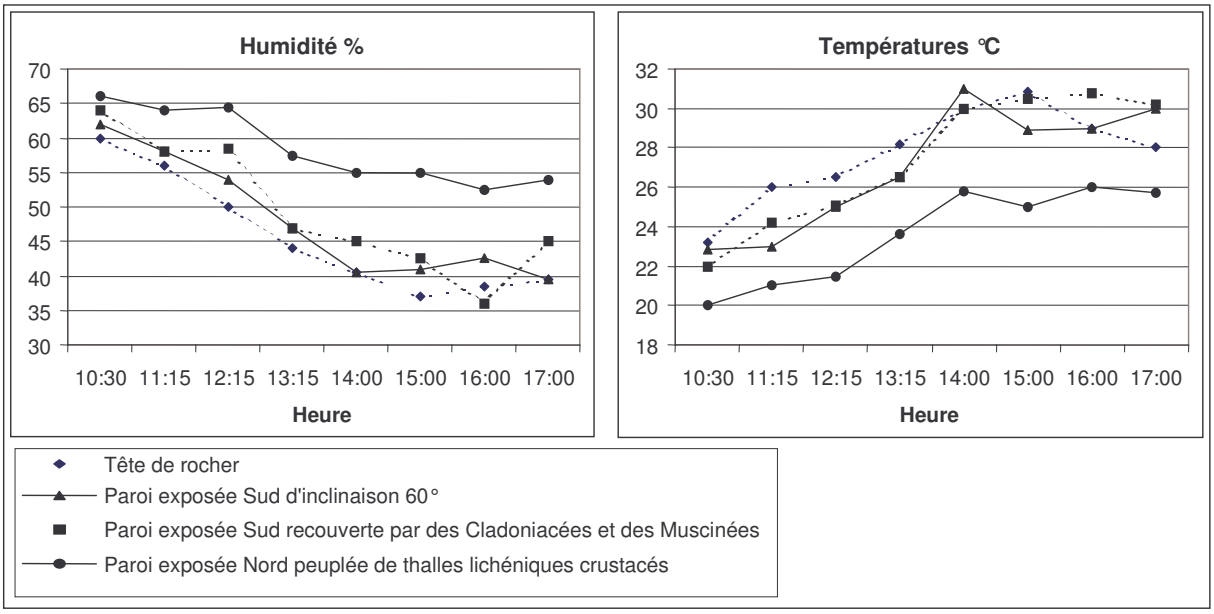
	Eau temporaire	*Eau permanente*	
		Avec écoulement	*Stagnante*
Substrat* fangeux, faible couche de particules fines (< 5 cm)	Groupement à jonc bulbeux		
Substrat* fangeux, couche épaisse de particules fines (> 5 cm)		Groupement à jonc acutiflore	Groupement à massette

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

LA CONFIGURATION, L'ORIENTATION… DES CARRIERES

La variété des orientations et des configurations des sites d'extraction (en forme de cirque, en dent creuse, à flanc de coteau…) , du fait de la diversité des conditions microclimatiques qu'elles créent, sont autant de facteurs qui influent sur l'écologie des carrières.

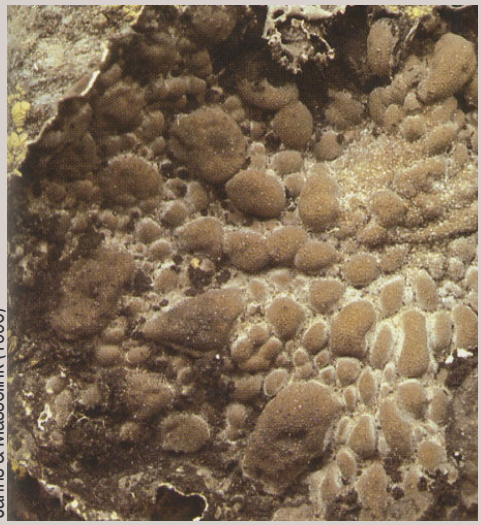
Les roches constituent de supports sur lesquels l'amplitude des températures (diurne notamment) est beaucoup plus élevée que dans l'environnement. Les effets sélectifs sur les espèces sont déterminants : élévation thermique de 40°C à 0.2 cm au-dessus du sol "létale pour de nombreuses espèces" (Tort, 1987 et Paul 1977, *in* Petit, 1991) (Figure 8).



- **Figure 8 : Mesures de l'humidité relative et de la température pendant une journée sur des versants rocheux d'Ille-et-Vilaine (d'après Massé 1964).**

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

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



Jahns & Masselink (1996)

Umbilicaria pustulata.

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

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

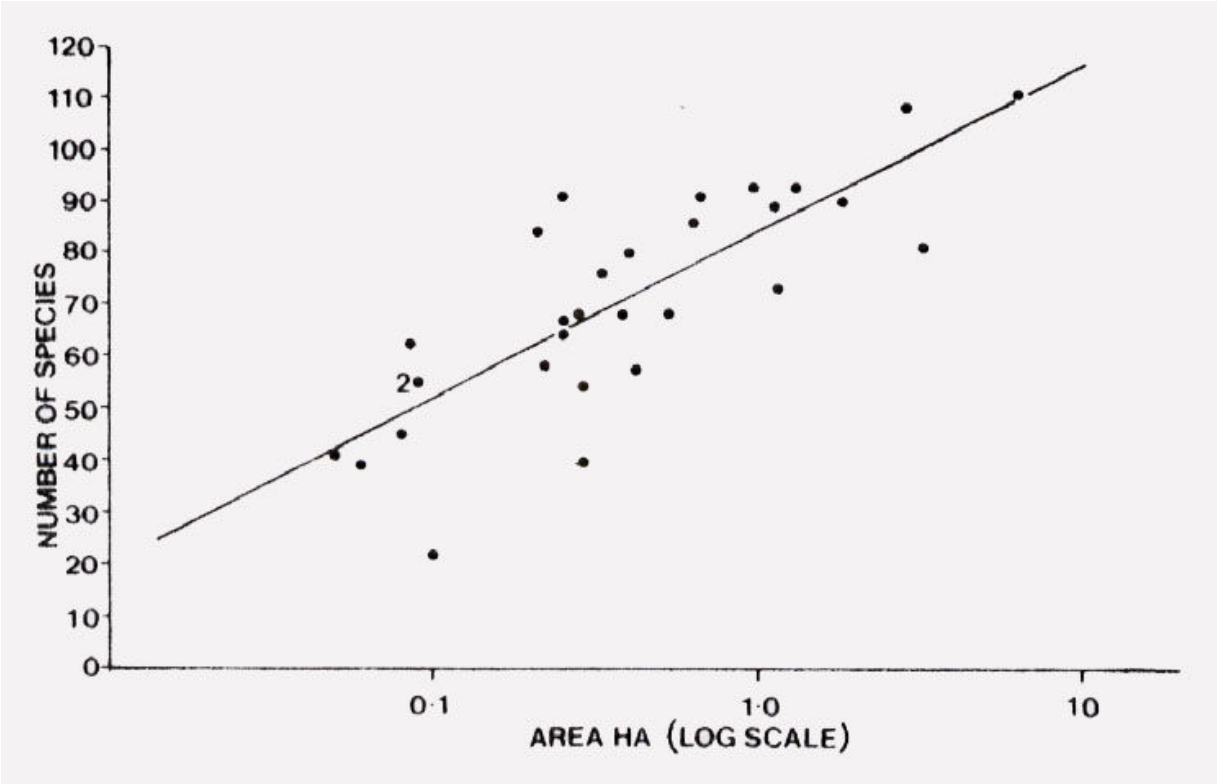
Sauveterre (1985) observe que la colonisation des roches dures lisses (fronts de taille, gros blocs…) par les lichens, algues et mousses est ralentie dès lors que les faciès à coloniser sont exposés au Sud. Selon Frain (1991), sur les blocs de pouzzolane dirigés vers le Sud, les mousses (comme *Racomitrium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

La physionomie de la carrière et son orientation peuvent également influencer l'installation d'aires de nidification de certains rapaces, la ponte de reptiles… Ainsi sur la carrière de Kerhoual (ENCEM, 1997), des éboulis exposés au Sud constituent une zone de repos diurne pour 3 espèces de crapauds : le crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*), le crapaud calamite (*Bufo calamita*) et le crapaud commun (*Bufo bufo*).

LA DIMENSION DES EXPLOITATIONS

Exprimée par la superficie et/ou le périmètre, la taille de la carrière et par conséquent les surfaces de ses différentes composantes sont des facteurs essentiels de son fonctionnement écologique. À la taille de la carrière est associée la diversité de conditions environnementales, la superficie

des différents habitats* et leur arrangement spatial. En fonction de ces caractéristiques, des espèces aux exigences écologiques variées, trouveront dans les carrières une partie ou l'ensemble des ressources (trophiques, spatiales…) dont elles ont besoin. À la taille est également associé, selon la théorie des équilibres dynamiques appliquée aux systèmes insulaires, le nombre d'espèces qui peuvent coloniser le site. Des tentatives d'application de ce modèle aux carrières, décharges… ont eu lieu (Gray, 1982 ; Jefferson, 1984), mais elles sont remises en cause (Harvey, 1982). Ces sites ne sont pas de vraies îles et leur potentiel de colonisation dépend essentiellement de la nature de l'environnement qui les entoure (Hodgson, 1982 ; Boulet, 1996…) ou des voies d'accès à la colonisation (*e.g.* un chemin pour les orthoptères, Picaud, 1998). Néanmoins l'étude de Jefferson (1984), effectuée pour des carrières insérées dans des contextes environnementaux très proches (83,4 % de terre cultivée et 6,4 % de prairies* permanentes), montre une relation très nette entre la taille des carrières et le nombre croissant d'espèces les ayant colonisées (Figure 9).



- **Figure 9 : L'effet de la taille des carrières sur leur probabilité d'être colonisées par un plus grand nombre d'espèces s'efface le plus souvent devant le potentiel d'espèces colonisatrices directement alentour du site. Néanmoins Jefferson (1984) a montré pour 30 carrières de chaux britanniques caractérisées par un environnement identique, une très forte relation entre le nombre de plantes vasculaires et la taille des sites d'extraction.**

La plupart des espèces d'insectes sont indifférentes à la dimension de la carrière alors que pour les oiseaux, une surface minimale est nécessaire pour qu'elle soit colonisée (Chépeau, 1981). Les carrières peuvent représenter pour ces derniers, des espaces complémentaires où certaines espèces trouvent des ressources (alimentaires, site de nidification…) qu'elles intègrent dans leur territoire. De cette façon, elles participent de façon plus ou moins déterminante au maintien d'espèces d'oiseaux dans un secteur géographique.

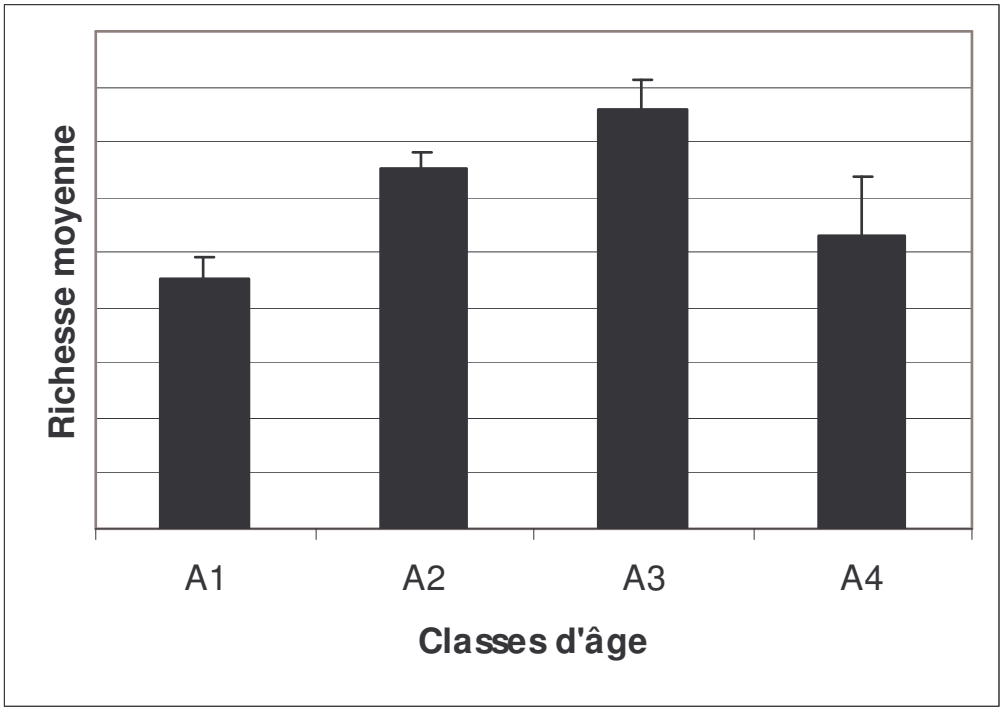
Des carrières de faible taille peuvent accueillir une richesse floristique et faunistique assez importante. Ainsi sur l'ancienne carrière d'extraction de mylonite (roche métamorphique acide) de Kerhoual (Morbihan), sur une superficie de 2,5 ha comprenant plusieurs zones humides, ENCEM (1997) relève la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

D. Voeltzel

L'ancienne carrière de Kerhoual (Morbihan).

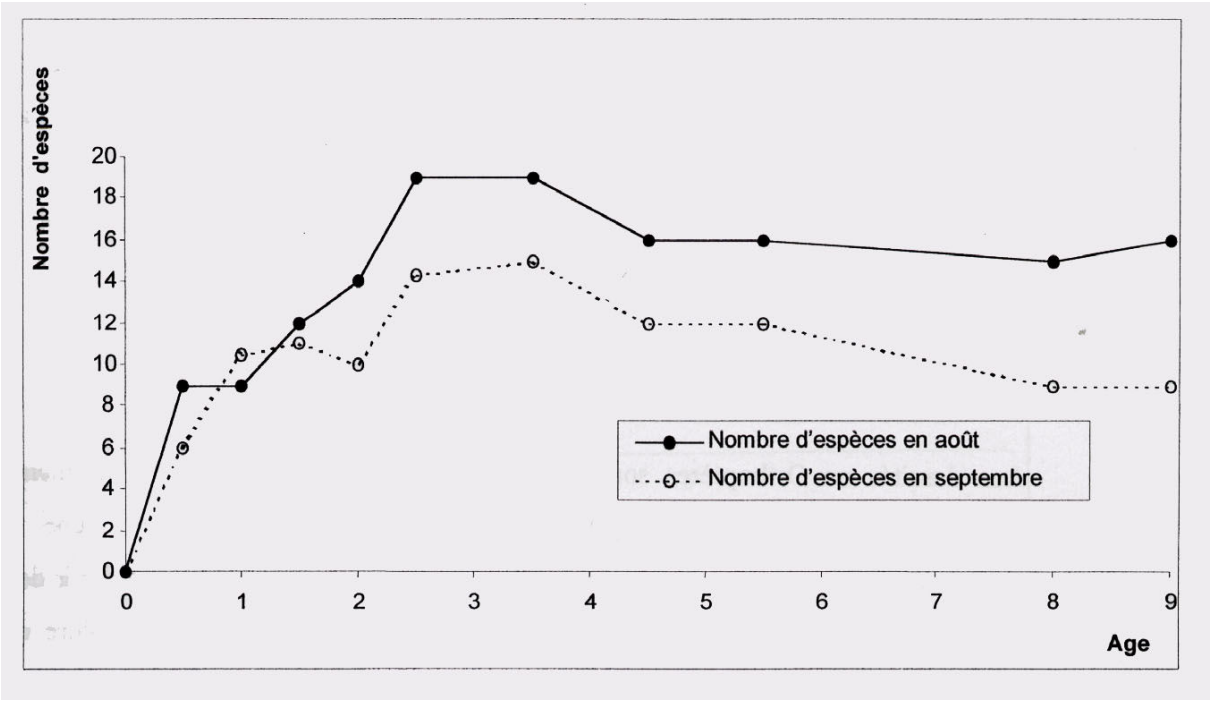
L'AGE DES CARRIERES

Dans les carrières jeunes, la variabilité entre sites peut être notable, particulièrement pour les plantes. À ce stade, ce sont d'autres facteurs tels que des différences lithologiques portant sur la nature et la granulométrie* du substrat* qui contribuent à cette variabilité (Frochot *et al.*, 2000). Ensuite, comme nous le verrons ultérieurement, l'âge des carrières intervient comme facteur concomitant de l'évolution des sols et du déroulement des successions écologiques. Cependant, comme le montre la Figure 10, la richesse spécifique des carrières calcaires semblent augmenter d'abord avec l'âge des sites pour diminuer à partir de 100 à 150 ans (Brunaud, 1997).



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

Frochot *et al.* (2000) constatent que la colonisation par la végétation conduit à une raréfaction progressive, voire une disparition du site, des insectes inféodés aux parois rocheuses, à la terre nue ou aux sables et limons. D'un autre côté, Sauveterre (1985) observe que la diversité des macro-invertébrés est en relation directe avec la diversité floristique et que l'influence de l'âge se traduit également par des changements qualitatifs : le taux d'espèces xérophiles* diminuant au profit des espèces mésoxérophiles. Le nombre d'espèces de gastéropodes et d'orthoptères augmente avec l'âge alors que, pour les hyménoptères aculéates (guêpes, fourmis, abeilles), les carrières jeunes de Franche-Comté sont plus riches que les plus anciennes. Picaud (1998) observe, sur d'anciennes mines revégétalisées du Limousin, une augmentation du nombre d'espèces d'orthoptères jusqu'à 2,5 ans après la réaffectation des sites, puis une diminution jusqu'à 4,5 ans avant de se stabiliser (Figure 11). L'âge des carrières influe sur la présence des oiseaux liés soit aux pelouses* (carrières jeunes), soit aux bois (carrières plus anciennes). Une augmentation du nombre d'espèces avec l'âge est mise en évidence (même si aucune indication de l'évolution qualitative des communautés aviaires n'est fournie) (Sauveterre, 1985).



- **Figure 11 : Évolution du nombre d'espèces d'orthoptères sur d'anciennes mines à ciel ouvert (Haute-Vienne) en fonction de l'âge de leur réaffectation (semis de gazon...) (d'après Picaud, 1998).**

Selon Frochot & Godreau (1995), après une évolution rapide, l'évolution des successions écologiques décélère en général :, avec transformation parallèle de la biocénose* (en particulier sa composition spécifique se modifie) et du biotope* (par érosion, changement de la qualité de l'eau…). Au cours de cette évolution, les espèces pionnières* disparaissent au profit de celles inféodées aux stades successionnels plus mûrs. En Basse-Normandie les carrières désaffectées tendent inéluctablement à se boiser, processus se déroulant plus ou moins lentement et prenant différentes trajectoires selon les caractéristiques des substrats* et leurs propriétés hydriques, l'environnement du site, etc. (Boulet, 1996). Cet aspect de l'écologie des carrières est abordé plus longuement dans le chapitre consacré aux trajectoires des carrières (p.57).

Plusieurs facteurs en relation avec la configuration, la taille, l'âge des carrières n'ont pas été évoqués ici par manque d'éléments publiés. La couleur de la roche et les phénomènes thermiques associés, l'hétérogénéité de la roche et la quantité d'anfractuosités en relation avec la profondeur du gisement, la surface des fronts de taille, le rapport surface/périmètre et l'indice de sinuosité associé, etc. sont autant de facteurs écologiques dont le rôle doit être mieux compris.

LA DIVERSITE MORPHOLOGIQUE DES SUBSTRATS DANS LES CARRIERES

Qu'elle découle de la simple remise en état des lieux en fin d'exploitation ou d'un réaménagement à des fins paysagères ou écologiques, la morphologie du site conditionne fortement les possibilités d'installation des communautés (Frochot *et al.*, 2000) et, d'après Boulet (1996), toutes les configurations de la carrière sont occupées par des végétaux (Tableau 6). Les substrats* qui caractérisent ces différents habitats* se distinguent par leur granulométrie*, mais le facteur qui conditionne l'implantation des espèces semble davantage être la réserve en eau du substrat* que la dimension propre des particules ou blocs qui le constituent (Sauveterre, 1985).

- **Tableau 6 : Répartition des groupements* dans les carrières siliceuses (d'après Boulet, 1996).**

Liste des groupements acidiphiles	Carreau	Eboulis fixe	Eboulis mobile	Merlon	Front de taille
Gpt muscinal à *Grimmia pulvinata*					▭
Lande à *Erica cinerea* et *Ulex gallii*		▭			
Lande haute à *Ulex europaeus*		▭		▭	
Lande haute à *Sarothamnus scoparius*		▭		▭	
Pelouse à *Aira praecox*	▭			▭	
Lande à *Erica cinerea* et *Ulex europaeus*	▭			▭	
Saulaies	▭				
Bétulaies	▭				
Chênaies acidiphiles	▭				
Gpt muscinal à *Polytrichum piliferi*	▭				
Gpt à *Sedum anglicum*	▭				
Gpt muscinal à *Ceratodon purpureus*	▭				
Gpt muscinal à *Polytrichum commune*	▭				
Pelouse à *Agrostis tenuis*	▭				
Lande à *Erica tetralix*	▭				
Lande à *Molinia caerulea*	▭				
Gpt à *Juncus bulbosus*	▭				
Gpt à *Juncus acutiflorus*	▭				

LES FRONTS DE TAILLE

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

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

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

LES EBOULIS

Les éboulis, amas de blocs, pierriers sont facilement colonisés, pourvu qu'ils soient stables et enrichis en particules fines. En dehors des espèces primitives : lichens, mousses (groupement* à *Grimmia pulvinata*), le bouleau pubescent (*Betula pubescens*) est le seul capable, dans le cas des carrières de Basse-Normandie, de coloniser des éboulis mobiles à fraction minérale très grossière (surtout des blocs > 20 cm) (Boulet, 1996). Cette espèce semble être remplacée par le bouleau verruqueux (*Betula pendula*) dans les carrières du Limousin (Frain, 1991), sur les pentes des terrils* miniers (Petit, 1980) et dans les sites dégradés d'Europe centrale (Prach & Pysek, 1994 ; 2001). D'autres espèces semblent bien adaptées à cette topographie particulière : ce sont la petite oseille (*Rumex acetosella*) dans des carrières de Basse-Normandie (Boulet, 1996), l'oseille écusson (*Rumex scutatus*) des éboulis alpins et des terrils* du Nord de la France (Petit, 1980) et des carrières de granite près de Limoges (Frain, 1991). La petite oseille colonise plutôt les éboulis dont les teneurs en pierrailles (des gravillons de 2 à 5 mm, aux cailloux de 2 à 20 cm) représentent plus de 50 % de la fraction minérale. L'ensemble repose sur un horizon de particules fines qui facilite la progression de l'éboulis. L'extrémité de la racine de l'oseille prospecte l'horizon argileux. La plante suit le glissement progressif de la fraction grossière grâce à un allongement considérable et une élasticité du système racinaire. Dans des carrières d'Ille-et-Vilaine, Sauveterre (1985) observe également, des saules et des ronces émergeant entre les blocs de pierres.

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

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

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

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

LES REMBLAIS

Les substrats* meubles, graviers et sables, sont colonisés d'autant plus vite (dès la première saison) et abondamment qu'ils contiennent des particules fines (argiles et limons) (Sauveterre, 1985). Ce sont en général des plantes annuelles* (essentiellement des graminées) qui s'implantent. La fixation des pentes mobiles par ces pionnières* permet peu à peu l'installation de

formations* plus stables au sein desquelles les espèces pérennes deviennent dominantes. Certains bryophytes* affectionnent ce type de milieux ; c'est le cas du groupement* à *Polytrichum piliferum* qui s'installe sur substrats* filtrants qui ressuient rapidement. La pelouse* à canche précoce (*Aira praecox*) y trouve également des conditions favorables à son installation. Cette formation* très discrète est dominée par la canche précoce disposée en touffes menues à l'aspect soyeux dont émerge parfois la vulpie queue de rat (*Vulpia myuros)* (Boulet, 1996).

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

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

LES MERLONS

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

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

D. Voeltzel

Merlon* colonisé par le tussilage (*Tussilago farfara*).

LES CARREAUX

Boulet (1996) a reconnu 8 groupements* colonisant uniquement le carreau* des carrières. Ils sont en général mésohygrophiles* (6), voire hygrophiles* (1) traduisant une imperméabilisation importante du substrat* suite à sa compaction et qui entraîne une stagnation de l'eau.

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

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

D. Voeltzel

Pelouse* à canche précoce (*Aira praecox*).

Ces observations effectuées pour le Massif armoricain peuvent être complétées par celles de Frain (1991) concernant des colonies de lichens plus ou moins imbriquées avec des tapis de mousses (polytrics), dans des carrières du Limousin. Ces plages à lichens de type cladonies (*Cladonia subulata*, *C. fimbriata*, *C. major*…) occupent des surfaces de quelques m² du carreau*, sur substrat* à forte teneur en sable et gravier, issu de la désagrégation du granite ou du gneiss. Elles viennent en contact avec des pelouses* proches de celles évoquées précédemment (groupements* à vulpie queue de rat, *Vulpia myuros*, canche caryophyllée, *Aira caryophyllea*…) et peuvent être considérées comme "indicateurs d'une phase de vieillissement" de groupements* xériques*. Frain (1991) suggère que ces plages lichéniques ont succédé (hypothèse d'une action inhibitrice d'acides lichéniques ou de semi-parasitisme) aux plages à polytrics, puisque ces groupements* ne s'observent que dans des carrières anciennes. Il est probable que ce stade

lichénique est provisoire et cède la place à d'autres formations* telles que des pelouses* à graminées vivaces*. On peut également rapprocher ces observations de celles concernant le groupement* à polytric (*Polytrichum piliferum*) et à bouleau verruqueux (*Betula pendula)* de Petit (1980) sur des terrils* plats. Le bouleau verruqueux, par ses racines très superficielles et denses, entre en compétition avec les espèces herbacées* qui pourraient apparaître. Seuls, mousses et lichens se développent. Les populations* de lapins entretiennent de surcroît cet état, en broutant les quelques herbacées* existantes.

DES LITHOSOLS AUX SOLS EVOLUES

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

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

.

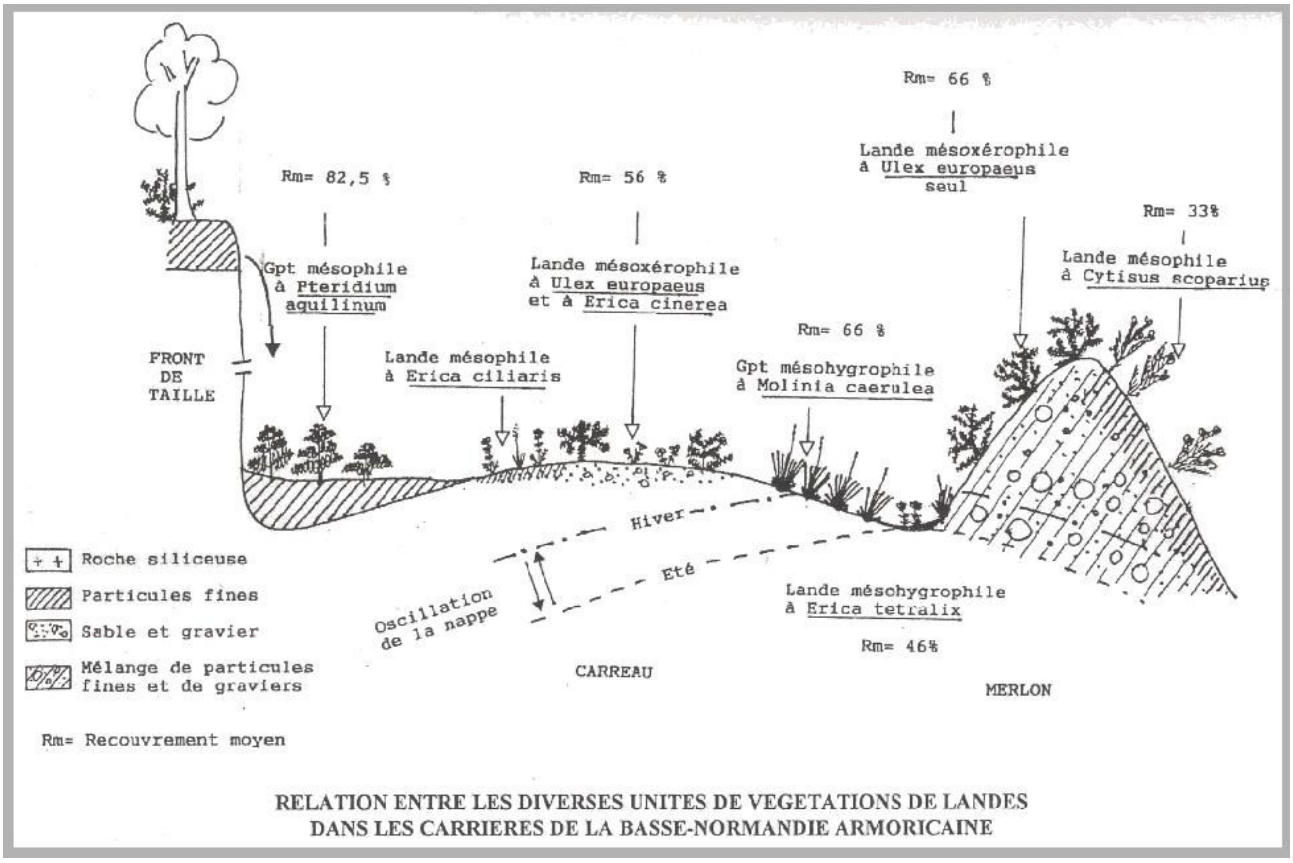
La formation de sols profite à certains groupements* telles que les pelouses* à canche précoce (*Aira praecox*) et agrostide vulgaire (*Agrostis capillaris*) signalées plus haut, mais elle permet surtout l'installation de landes* et de formations* arbustives et arborées.

LES LANDES

On retiendra de Boulet (1996) que le degré d'humidité du substrat* et la profondeur du sol semblent être les facteurs déterminants dans la localisation et la présence des groupements* de landes* (Tableau 7, Figure 12).

- **Tableau 7 : Situation stationnelle relative des groupements* de lande* en fonction de la profondeur et du degré d'humidité des sols (d'après Boulet, 1996).**

	Sol squelettique	Sol plus profond	Sol très profond
Landes* mésoxérophiles*	Landes à Ajonc d'Europe et Bruyère cendrée Lande à Ajonc de Le Gall et bruyère cendrée	Lande haute à ajonc d'Europe seul	
Landes* mésophiles*	Lande à bruyère ciliée	Lande haute à genêt à balais	Groupement à fougère aigle
Landes* mésohygrophiles*	Lande à bruyère à quatre angles	Groupement à molinie	



RELATION ENTRE LES DIVERSES UNITES DE VEGETATIONS DE LANDES
DANS LES CARRIERES DE LA BASSE-NORMANDIE ARMORICAINE

- **Figure 12 : Relation entre les différentes unités de landes* dans les carrières de la Basse-Normandie armoricaine (Boulet, 1996).**

D. Voeltzel

Lande* haute à genêt à balais (*Sarothamnus scoparius*) **et ajonc d'Europe** (*Ulex europaeus*)**.**

Les landes* et notamment le groupement* à aajonc d'Europe (*Ulex europaeus*) et bruyère cendrée (*Erica cinerea*) constituent l'un des groupements* les plus banals que l'on rencontre dans les carrières de Basse Normandie (Boulet, 1996). L'ajonc d'Europe, la callune et la bruyère cendrée s'installent sur toutes les topographies et tous les substrats* de la carrière. Ces espèces poussent aussi bien sur le carreau*, que sur les merlons* et il n'est pas rare qu'elles profitent du moindre interstice des fronts de taille. L'aAjonc est une légumineuse dont les nodosités* symbiotiques* lui permettent de fixer l'azote atmosphérique, palliant ainsi la déficience des substrats* oligotrophes* des carrières. Cela explique leur rôle pionnier* et enrichissant.

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

LES FORMATIONS ARBUSTIVES ET ARBORESCENTES

Boulet (1996) identifie dans les carrières acides 4 groupements* qui s'individualisent selon un gradient trophique et un gradient hydrique (Tableau 8) :

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

• Tableau 8 : Situation stationnelle des groupements* arbustifs et arborescents en fonction du gradient trophique et du degré d'humidité des sols (d'après Boulet, 1996).

	Mésoxérophile*	**Mésophile***	**Hygrocline***	**Mésohygrophile***
Acidiphile*	Bétulaie* pionnière* sur éboulis	Bétulaie pionnière* sur carreau* Chênaie à callune		Saulaie à saule roux
Mésoacidiphile*		Chênaie à aubépine et prunellier		
Neutroacidicline*			Aulnaie*-frênaie*	

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

G. Paillat

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

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

La strate arborescente des chênaies acidiphiles* est dominée par le chêne pédonculé (*Quercus robur*) associé parfois à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et au frêne (*Fraxinus excelsior*). Elle s'accompagne d'une strate arbustive bien développée et, en dehors du bouleau, le noisetier (*Corylus avellana*), le prunellier (*Prunus spinosa*), le saule marsault (*Salix caprea*) ou encore l'aubépine (*Crataegus monogyna*) sont rencontrés. La strate herbacée* comprend aussi bien des espèces de landes* que des taxons* rudéraux*, avec un fonds important d'espèces forestières. Si la tendance générale de cette chênaie est acidiphile*, deux tendances divergentes sont toutefois observées : l'une, fortement acidiphile*, comporte un groupe d'espèces acidiphiles* (ajonc d'Europe, *Ulex europaeus*, callune, *Calluna vulgaris*, bruyère cendrée, *Erica cinerea*…) ; l'autre nettement plus mésophile*, sans espèces de landes*, se distingue notamment par la présence de l'aubépine et du prunellier.

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

D. Voeltzel

Saulaie à saule roux (*Salix acuminata*)**.**

LES MODALITES D'EXPLOITATION

Les modalités du schéma d'exploitation de la carrière concernent l'ensemble des actions de mouvements de matériaux (transport, enlèvement, découverte, dépôt, reprise…) tout au long du déroulement de la phase d'extraction, le rabattement ou non de la nappe phréatique, l'utilisation de mines pour abattre les fronts de taille*… L'importance de ce facteur sur le fonctionnement écologique des carrières est souvent pressentie mais nous ne disposons que de très peu d'informations sur cet aspect.

Il semble en effet qu'un nombre non négligeable d'espèces autant végétales qu'animales (arachnides, gastéropodes…) colonisent les carrières dès les premières phases d'extraction. Les mouvements de matériaux terreux ou minéraux et la mise à nu de roches permettent à des végétaux de s'implanter rapidement, soit à partir de la banque de graines en place, soit par des semences apportées par le vent notamment. Leur installation peut-être remise en cause lors d'un déplacement des remblais ou d'une avancée du front de taille…

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

En l'absence d'éléments tangibles on notera que Sauveterre (1985), reprenant les travaux de J.C. Robert portant sur des carrières du Doubs, accorde beaucoup d'importance à la saison du dernier remaniement avant l'interruption définitive de l'exploitation. Il souligne notamment que celui-ci peut

favoriser l'espèce qui disséminera ses graines à ce moment : ainsi s'expliqueraient des populations* monospéciques de saules ou d'érables, alors que la végétation environnante est diversifiée.

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

Photocoptère - Rennes

Carrière des Deux-Sèvres

LES PERTURBATIONS

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

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

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

Jahns & Masselink (1996)

J. Chevallier (*In* Dubois *et al.*, 2000)

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

À ces perturbations* naturelles s'ajoutent les perturbations* liées aux activités humaines telles que le dépôt d'ordures ou de remblais, le passage de véhicules "tout-terrain"…; la mise à nu de roches et les mouvements de matériaux liés à l'activité d'extraction, les détonations lors des tirs de mines, etc.

LA CARRIERE : LIEU DE QUIETUDE ET DE REFUGE ?

Les carrières peuvent constituer dans certaines situations des lieux de quiétude, où la flore et la faune peuvent se développer sans contraintes liées aux activités humaines (prélèvements, bruit, piétinement…) (Frochot & Godreau, 1995). Cet élément ne peut être négligé au regard des exemples d'installation en carrières d'espèces ne trouvant plus la tranquillité dont elles ont besoin dans leurs lieux de vie traditionnels.

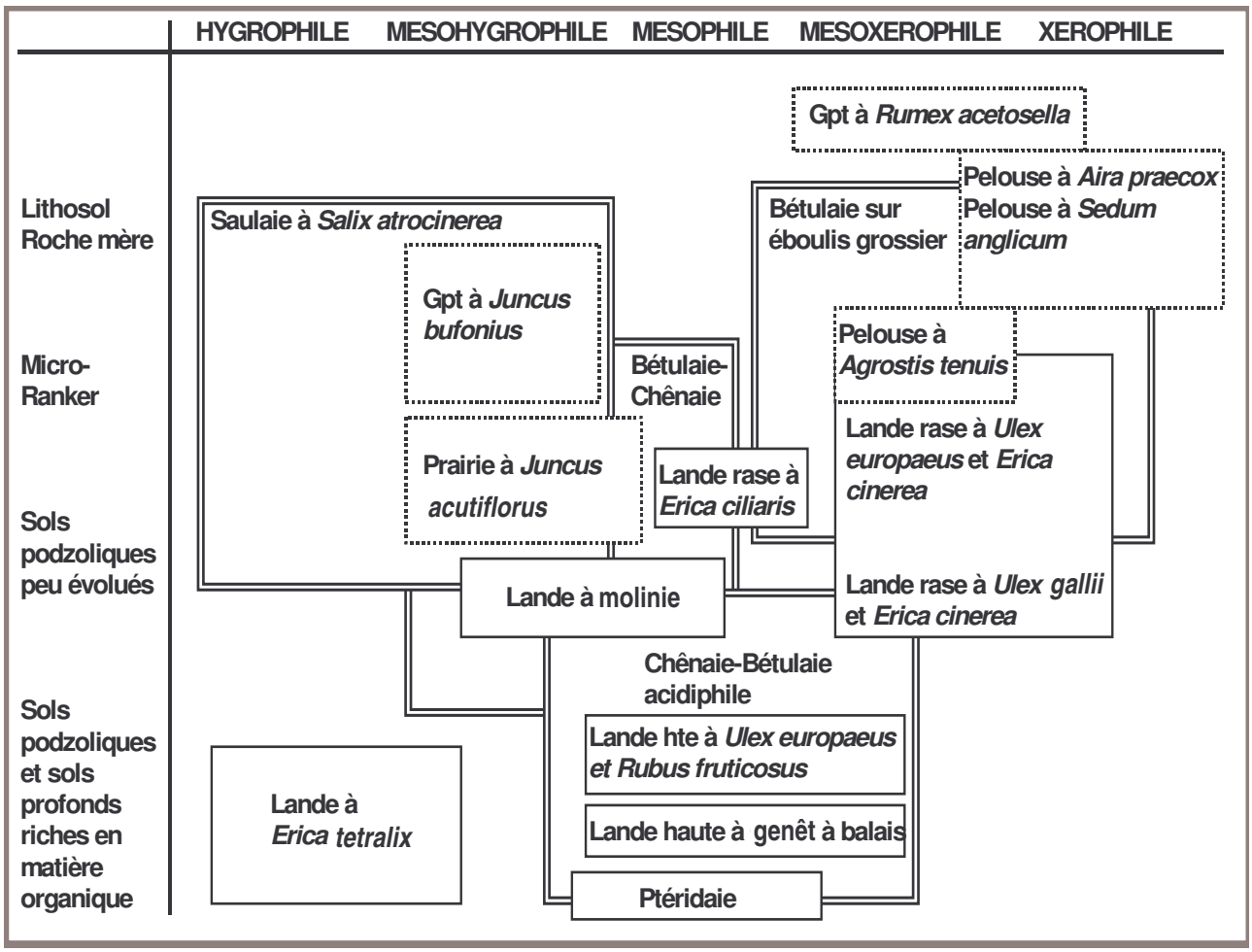
C'est le cas déjà évoqué plus haut, de deux espèces d'oiseaux rupestres* : le grand corbeau (*Corvus corax*) et le faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) (Quélennec, 2001 ; Debout, 2001). Le grand corbeau, notamment, subit directement le dérangement provoqué par certaines activités de loisir (plaisance, promenade) et Quélennec (2001) a clairement montré que lorsque certaines formes de perturbations* directes sont évitées, les carrières, même en activité, peuvent constituer des sites complémentaires ou de substitution pour sa nidification. Ce constat peut sans doute être transposé à d'autres espèces plus ou moins sensibles aux dérangements (chouette chevêche…), mais cela reste à évaluer.

COMBINAISON DES FACTEURS DE LA DIVERSITE DES CARRIERES

Les principaux facteurs dépendant directement des sites d'extraction de carrières de roche éruptive et qui interviennent dans la mise en place des espèces sont essentiellement les facteurs géologiques (pH de la roche mère), les facteurs liés à la présence d'eau permanente ou temporaire, les facteurs topographiques (fronts de taille, éboulis, carreaux*…) et pédologiques (gradient trophique et économie en eau). D'autres facteurs moins clairement identifiés peuvent être associés : ce sont la physionomie du site et son orientation, l'âge de la carrière depuis sa désaffection, les modalités d'exploitation, les perturbations*, la tranquillité du site.

Le grand nombre de combinaisons de ces facteurs et l'hétérogénéité des conditions écologiques qui en découlent expliquent la diversité d'espèces et d'habitats* qui s'y installent. La diversité structurale et topographique des carrières qui induit, à quelques mètres près, des conditions

écologiques contrastées, permet le développement d'un grand nombre de groupements* végétaux. La Figure 13 nous donne un aperçu synthétique des divers groupements* en fonction de l'humidité du substrat* et des conditions pédologiques.



- **Figure 13 : Relation entre les diverses unités de végétation des carrières de roche éruptive en fonction de l'humidité du substrat* et des conditions de sols (Boulet, 1996).**

Boulet (1996) a ainsi identifié 14 groupements* végétaux sur l'ensemble des 40 carrières de roche massive acide qu'il a étudiées. La compartimentation et la complémentarité des milieux sont favorisées par leur proximité, ce qui permet par ailleurs à de nombreuses espèces animales, en particulier les insectes tels que les orthoptères, d'y accomplir leur cycle de vie (Picaud, 1998).

Faisant ce constat, Sauveterre (1985) suggère qu'une bonne colonisation par la végétation suppose qu'une importante surface du site soit recouverte de matériaux meubles, pas "trop grossiers" (les terres de découverte* et autres stériles* sont généralement suffisamment abondants). Toutes les différences de pente, d'exposition, d'épaisseur, de compactage… créent alors autant de conditions favorables pour tel ou tel groupement* végétal, telle ou telle évolution et assurent une grande diversité spécifique du site. Ces propos sont toutefois sérieusement pondérés par des travaux plus récents.

Ainsi, Frochot *et al.* (2000), s'accordent à dire que si la coexistence de ces petits écosystèmes* sur un même site accroît sa richesse spécifique, elle a aussi d'autres conséquences : elle peut contribuer à le banaliser, d'une part en accélérant la succession* (les ligneux* se propageant par accrues* à partir des foyers d'installation que constituent les merlons* et remblais) et d'autre part en favorisant les espèces rudérales*, très abondantes sur les merlons* et dépôts. On notera par ailleurs que, dès 1982, Gray mettait en avant que la fragmentation des surfaces induite par la

diversification des milieux pouvait entraîner une perte d'espèces. En incluant la carrière dans son environnement, ce sont les microhabitats de type carreau* et front de taille (et dans une moindre mesure les remblais rocheux) qui contribuent à augmenter la diversité à l'échelle régionale, ainsi que le nombre d'espèces rares et originales ; les merlons* et autres dépôts terreux, qui accélèrent le reverdissement de la carrière, n'augmentent pas la richesse floristique régionale et n'apportent que des espèces banales à cette échelle.

Cela ne remet pas nécessairement en cause l'idée portant sur la relation [diversité des milieux = augmentation de la biodiversité] que l'on trouve dans tous les documents portant sur l'aménagement des carrières, par exemple :

> ***" Une bonne précaution pour favoriser la biodiversité …/… consiste à offrir en fin d'exploitation la plus grande diversité possible …/…"*** **(Danais & Montfort, à paraître)**
>
> ***"…/… l'objectif général de gestion sera la diversification biologique et écologique maximale en s'aidant des potentialités naturelles et artificielles du milieu."*** **(Coppee & Noiret, 1995).**

Les propos de Frochot *et al.* (2000) semblent, en effet, plutôt mettre l'accent sur la nécessiter de raisonner cette diversification en accord avec des objectifs clairement identifiés. Ces objectifs, correspondant réellement à des potentialités du site, en accord avec les connaissances que l'on a du fonctionnement écologique des systèmes hétérogènes tels que les carrières.

LES TRAJECTOIRES DES MILIEUX DE CARRIERES

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

Il faut noter que cette notion de "succession*" au sens de Clements (1916), ainsi que ses corollaires, le "climax*" et les associations végétales agissant comme "super-organismes" sont à ce jour considérés comme trop simplistes, linéaires et déterministes (Le Floc'h & Aronson, 1995). Ces auteurs suggèrent qu'il est préférable aujourd'hui d'interpréter tout système écologique comme un système dynamique, complexe et parfois chaotique. Le concept général de trajectoire d'un écosystème* recouvre à la fois la succession* "naturelle" d'un écosystème* et tous les autres itinéraires que peut suivre cet écosystème* sous les diverses pressions qui lui sont applicables. Le terme de "**trajectoire**" paraît alors préférable, la possibilité de parvenir à un état parfaitement stable et ne nécessitant plus aucune gestion déterministe semblant illusoire.

Les successions* se déroulant dans les carrières de roche massive semblent, comme nous le verrons plus bas, illustrer cette complexité. Néanmoins le terme de succession* reste très répandu dans la littérature et afin d'éviter de dénaturer les propos des auteurs en faisant usage, nous l'employons ici en accord avec les textes originaux.

QUELQUES ELEMENTS GENERAUX DES TRAJECTOIRES

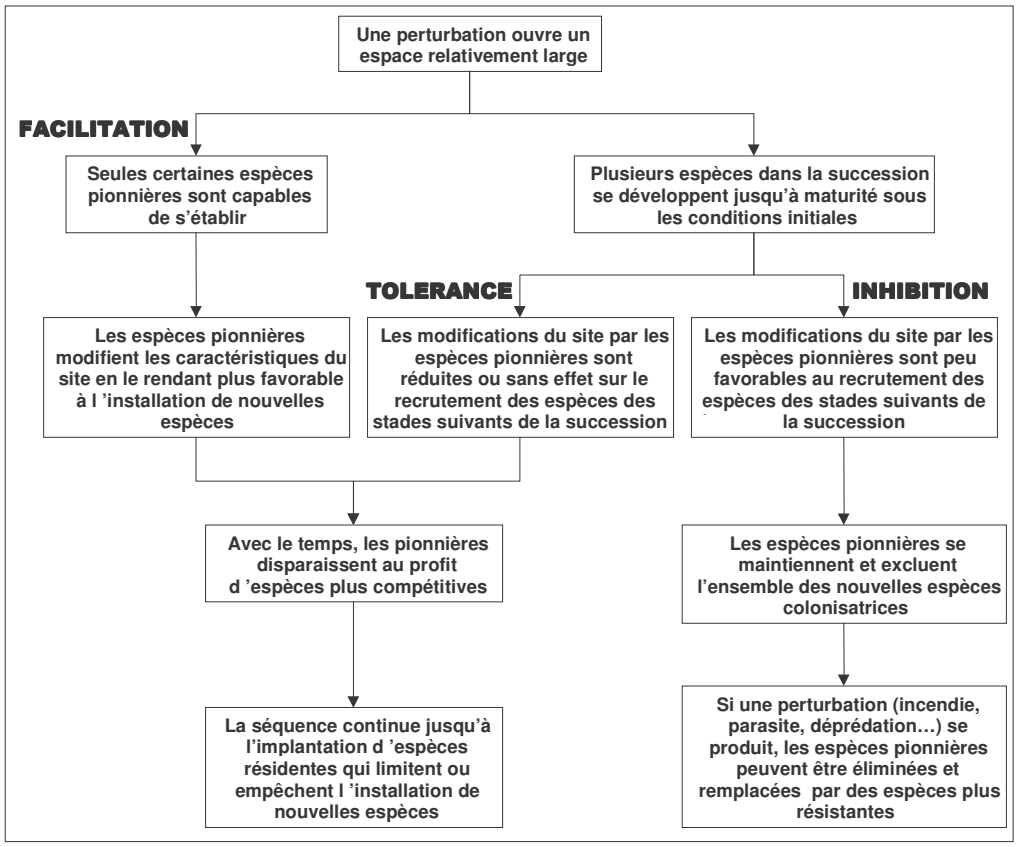
Les travaux portant sur les mécanismes et les modèles de successions* ou trajectoires donnent encore lieu à une littérature abondante (*e.g.* Wali, 1999, Young *et al.* 2001) et nous ne tenterons pas ici d'en proposer une synthèse. Nous rapportons seulement quelques éléments pouvant mieux éclairer notre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

Bradshaw (2000) identifie une série d'étapes dans le déroulement des successions* se développant dans les sites dégradés. Il les classe en deux groupes interagissant fortement : celles d'origine biologique et celles d'ordre principalement physique (Tableau 9). Les processus biologiques débutent avec la colonisation des plantes et leur implantation, ce qui permet le développement d'un sol biologiquement actif et de sa faune associée. Cette dynamique est assistée par les changements physiques, principalement en raison d'une dégradation des substrats* minéraux et du relargage de nutriments pour aboutir à la formation de sols.

- **Tableau 9 : Processus se développant au cours des successions* primaires sur site dégradé. Une période de temps sur laquelle ils se réalisent est proposée (d'après Bradshaw, 1997, *in* Bradshaw 2000).**

Processus biologiques		Processus physiques	
Temps (année)	**Processus**	**Temps (année)**	**Processus**
1-50	1. Immigration des espèces végétales appropriées	1-100	1. Fragmentation des surfaces compactes par le gel ou des périodes de sécheresse
1-50	2. Implantation des espèces appropriées	1-1000	2. Accumulation de matériel fin par altération des roches
1-10	3. Stabilisation et accumulation de matériel minéral fin en surface par les végétaux	1-1000	3. Décomposition des minéraux du sol
1-100	4. Accumulation de nutriments par les végétaux à partir des minéraux du sol	1-100	4. Augmentation de la capacité de rétention en eau du sol
1-100	5. Accumulation d'azote d'origine atmosphérique par fixation par des végétaux	1-1000	5. Relargage de nutriments par les minéraux du sol
1-20	6. Immigration de la flore et de la faune du sol grâce à l'accumulation de matière organique	10-10000	6. Lessivage des matériaux mobiles
1-20	7. Modification des propriétés du sol sous l'action des végétaux, des organismes du sol	100-10000	7. Formation d'horizons distincts au niveau du profil des sols
10-1000	Réduction de la toxicité (acidité…) par accumulation de matière organique et lessivage		

Plusieurs modèles de successions* ont été proposés, mais ceux de Connell & Slatyer (1977) semblent être reconnus, malgré leurs imperfections, comme les plus convaincants (Lepart & Escarre, 1983 ; Harris *et al.*, 1996). Ces auteurs proposent trois modèles (facilitation, tolérance et inhibition) orientés vers l'analyse du rôle de la compétition dans les changements de la composition spécifique. La façon dont opèrent ces modèles, à l'occasion de la mise à nu d'un espace, est illustrée par la Figure 14.



- **Figure 14 : Illustration des mécanismes se déroulant lors de la mise en place des successions* (d'après Connell & Slatyer (1977), *in* Harris *et al.*, (1996)).**

✓ **Facilitation** : les espèces pionnières* modifient les conditions du milieu permettant l'établissement d'espèces transitoires moins tolérantes aux conditions écologiques initiales.

✓ **Tolérance** : les espèces transitoires s'installent indépendamment de l'influence sur le milieu des espèces pionnières* ; elles peuvent se développer en présence de celles-ci et les exclure.

✓ **Inhibition** : les pionnières* empêchent l'installation d'autres espèces ; elles finissent cependant par disparaître (sénescence, perturbations*, action des herbivores…) et sont remplacées par des espèces plus compétitives.

Selon Boulet (1996), ces processus généraux se traduisent par l'évolution la plus courante qui se présente sous la forme suivante :

Végétation forestière

↑

Végétation buissonnante (stade lande)

↑

Végétation herbacée plus ou moins continue (dominée par les vivaces)

↑

Végétation pionnière (peuplement herbacé formé en majorité de thérophytes)

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

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

LES FACTEURS DE COLONISATION

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

L'établissement d'une espèce végétale ou animale dans une carrière après exploitation est fonction de nombreux facteurs tels que les conditions édaphiques*, la configuration de la carrière, les capacités de dissémination des espèces, et son contexte environnemental. L'ensemble de ces facteurs a d'importantes répercussions sur la colonisation des carrières durant leur phase d'exploitation et après leur désaffectation.

LES MODALITES DE DISSEMINATION

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

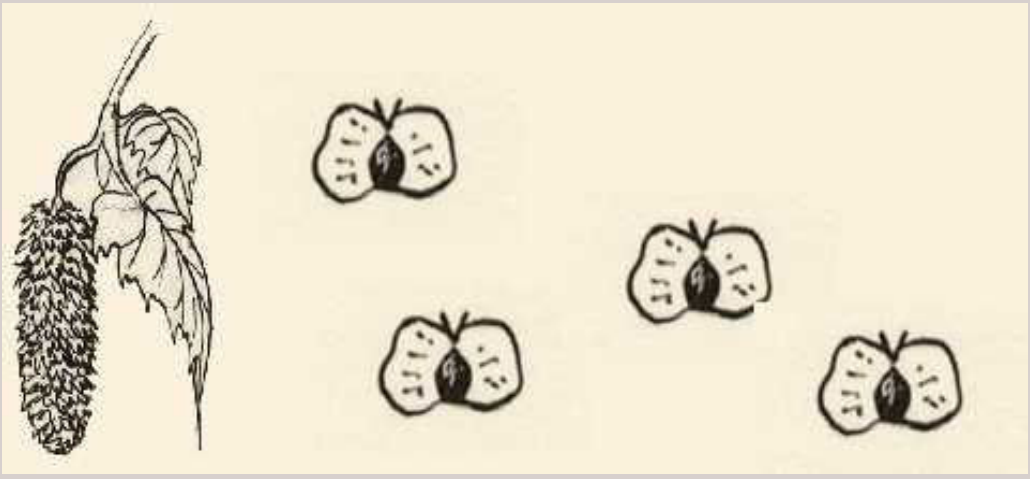
Les végétaux ont mis en œuvre de nombreuses stratégies pour coloniser de nouveaux espaces. Ils peuvent se multiplier de façon végétative par stolons, bulbes, marcottes… à partir d'une plante mère ou bien se reproduire sexuellement.

La stratégie de dissémination par reproduction sexuée se décline suivant plusieurs modalités (Tableau 10). En dehors des semences déjà en place, la dispersion anémochore* constitue la principale source de colonisation d'un milieu neuf (Wiegleb & Felinks, 2001 ; Lepart & Escarre, 1983). La zoochorie* (en particulier l'ornithochorie) est ensuite le mode de dissémination le plus important pour les espèces des stades avancés de la succession* (Lepart & Escarre, 1983). Frain (1991) et Boulet (1996) confirment l'application de ces considérations générales au cas des carrières : "c'est l'anémochorie …/… qui est la mieux représentée …/…et plus particulièrement les espèces munies d'expansions telles que l'aigrette ou les soies" (Boulet, 1996). C'est le cas notamment des fruits de la vergerette du Canada (*Conyza canadensis*), légers et munis d'un pappus qui favorise leur transport par le vent et des graines du saule roux, légères et munies de plumes de soies, du bouleau pubescent…

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

- **Tableau 10 : Classification des principaux modes de dissémination (Lepart & Escarre, 1983)**

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



P. Girardet (*in* Jacamon, 1979)

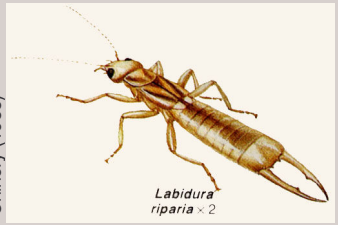
Les fruits du bouleau pubescent (*Betula pubescens*) sont de petits cônes allongés groupant des écailles minces à 3 lobes qui portent chacune 3 petites graines bordées d'une aile membraneuse et dispersées par le vent.

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

Comme pour les végétaux, certaines espèces d'arthropodes (mollusques, crustacés, araignées, insectes…) restent en place pendant la phase d'exploitation (ou arrivent pendant, voir plus haut) sous forme d'œufs, de larves ou d'adultes dans et sur les sols remaniés (Topp *et al.*, 2001). Cette

fraction de colonisateurs peut jouer un rôle important dans l'orientation des trajectoires des carrières. La carrière joue le rôle de point de départ pour les populations*, contrairement à la plupart des cas où c'est le milieu environnant qui autorise la colonisation… (Frochot *et al.*, 2000).

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



Chinery (1988)

Labidura riparia est un grand perce-oreilles qui vit habituellement sur les plages au bord de la mer. Ses préférences pour les milieux secs en font un pionnier* de la colonisation des terrils* miniers.

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

LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE LA CARRIERE

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

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

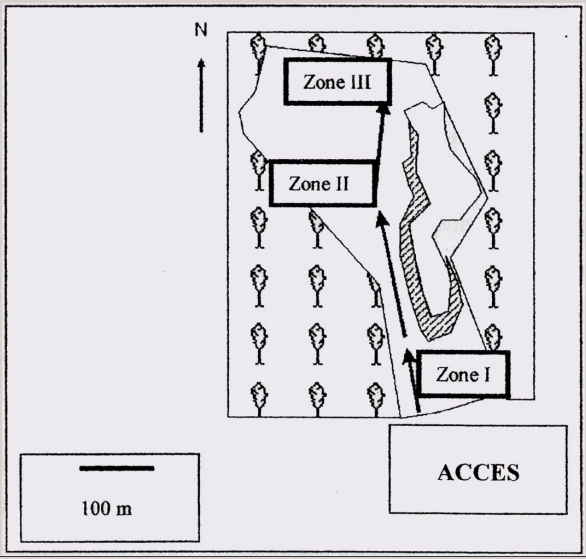
- Les espèces ubiquistes sont les plus banales et les plus abondantes puisqu'elles s'avèrent peu exigeantes quant aux conditions écologiques et disséminent d'innombrables semences. C'est le cas du bouleau pubescent que l'on retrouve rapidement sur de nombreux carreaux* de carrières acides dès les premiers stades de successions*. Une fois en place, ces espèces disposeront d'un avantage supplémentaire en dispersant leurs graines directement dans la carrière.
- Les espèces les plus spécialisées, dont l'amplitude écologique est plus étroite et donc plus exigeante (la canche précoce, *Aira praecox*, la vulpie queue de rat, *Vulpia myuros*…), subissent la concurrence des précédentes. Il faut donc qu'elles arrivent suffisamment tôt et pour cela qu'elles appartiennent à la végétation environnante.

- Cependant la rigueur des conditions qui règnent sur certaines parties de carrières permet, avec le temps, à une fraction importante d'espèces n'existant pas dans les faciès environnants de s'implanter (Sauveterre, 1985)

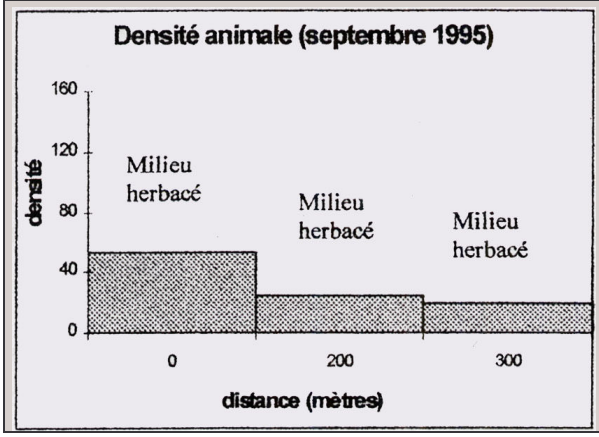
Bradshaw (2000) souligne qu'il est crucial, mais trop souvent oublié, que pour qu'une espèce puisse coloniser un site, il est indispensable qu'elle existe encore à une distance pas trop importante. Dans certains paysages agricoles, ce n'est plus le cas et des espèces d'intérêt patrimonial pouvant se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

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

La configuration des milieux proches de la carrière influence également la colonisation du site d'extraction. La présence de corridors (haies, bordures de chemin enfrichées…) facilitant les mouvements des végétaux et des animaux, peut accélérer l'installation d'espèces pionnières* (Usher, 1979). Au contraire, un environnement strictement forestier, par exemple, pourra constituer une barrière à l'immigration d'espèces prairiales. Une illustration de ces rôles "corridor" et "barrière" aux mouvements des espèces nous est donné par Picaud (1998).



Picaud (1998) a étudié la distribution de la densité et de la diversité des orthoptères en fonction de la distance par rapport à la source. Il a utilisé pour cela un site minier entouré de bois (formation* qui représente une barrière biologique) et dont la seule voie d'accès pour les orthoptères est un chemin qui amène au site. Ce chemin possède des bas côtés herbacés* et dessert des prairies*. Il existe donc une zone source, avec un éloignement des zones à coloniser (0 mètre - Zone I, 200 mètres - Zone II, 300 mètres – Zone III).



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

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

LES PROPRIETES DU SUBSTRAT

Ce facteur a déjà été abondamment développé dans le chapitre précédent et nous apportons seulement quelques éléments supplémentaires. Il n'est en effet pas suffisant pour une espèce d'arriver sur un espace à coloniser, il faut encore qu'elle réussisse à s'établir (Ash *et al.*, 1994, Chapin III, 1993).

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

De plus, la mortalité des graines par action fongique, gel… et celle des plantules par dessiccation, prédation… et par dépôt de poussières (limitation de la photosynthèse) dans le cas des carrières en activité, atteint 50 % au bout de 25 jours et peut atteindre 90 % après 4 mois d'implantation (Park, 1982).

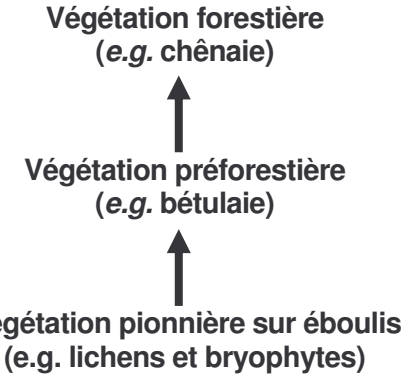
Le même type d'observations est fait pour les animaux et plus particulièrement la faune du sol : durant le premier stade pionnier*, beaucoup d'espèces tentent de s'implanter mais la plupart sont contrariées par les conditions microclimatiques drastiques (Dunger, 1989). C'est seulement lorsqu'une accumulation de litière est entamée que des vers de terre, des diptères, des arachnides, etc. apparaissent.

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

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

LES TRAJECTOIRES DES MILIEUX DE CARRIERES DE ROCHE ERUPTIVE

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



Quelques exemples de ces particularités peuvent être proposés :

- Une action permanente des lapins ou des lièvres (abroutissement) peut maintenir durablement un stade de pelouse* (Boulet, 1996).
- Des graminées très compétitives et agressives telle que la calamagrostide commune (*Calamagrostis epigejos*peuvent bloquer une succession* durant de longues périodes en formant une végétation dense et compacte (Prach et Pysek, 2001 ; Wiegleb & Felinks, 2001).
- Des éboulis mobiles, régulièrement alimentés par des fronts de taille instables, n'acceptent guère de végétation. Souvent, seuls les bouleaux parviennent à s'insérer parmi les gros blocs (graines ailées dispersées par le vent), au pied d'éboulis, et à freiner leur progression. La végétation arbustive est ici pionnière* avant toute autre forme. Le bouleau peut également coloniser un substrat* oligotrophe*, simultanément à une population* de bryophytes*, sans qu'il y ait de stade herbacé* intermédiaire.

La composante topographique

Boulet (1996) a reconstitué à l'aide d'une approche phytosociologique* synchronique*, de façon plus ou moins hypothétique, quatre principaux types de successions* dans les carrières acides de Basse-Normandie. Ces quatre séries sont directement déterminées par la texture du substrat* (Figure 15). À l'intérieur de ces séries, interviennent d'autres facteurs décisifs : l'humidité, la compaction et la mobilité du substrat*.

Les rochers et fronts de taille

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

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

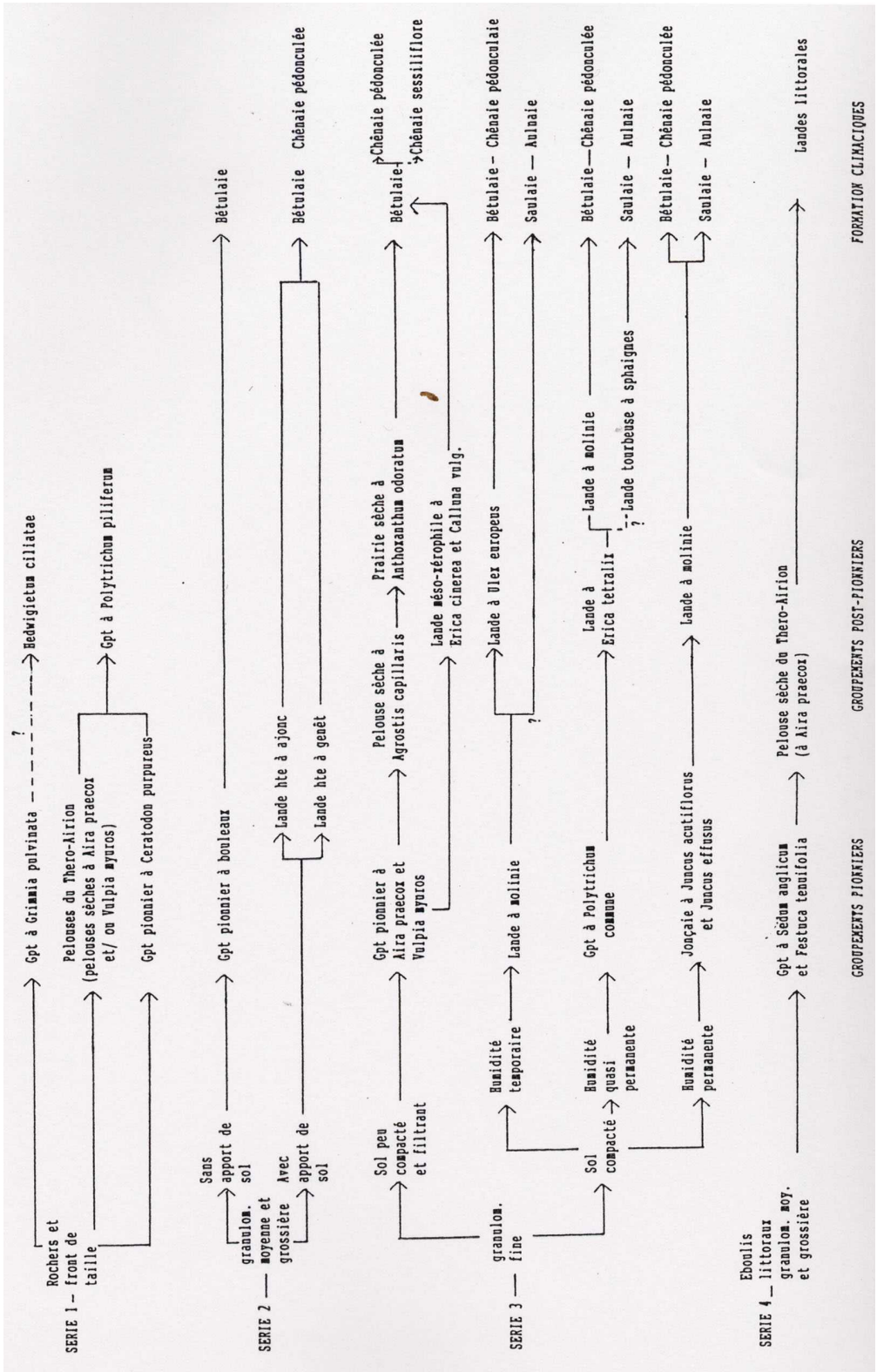
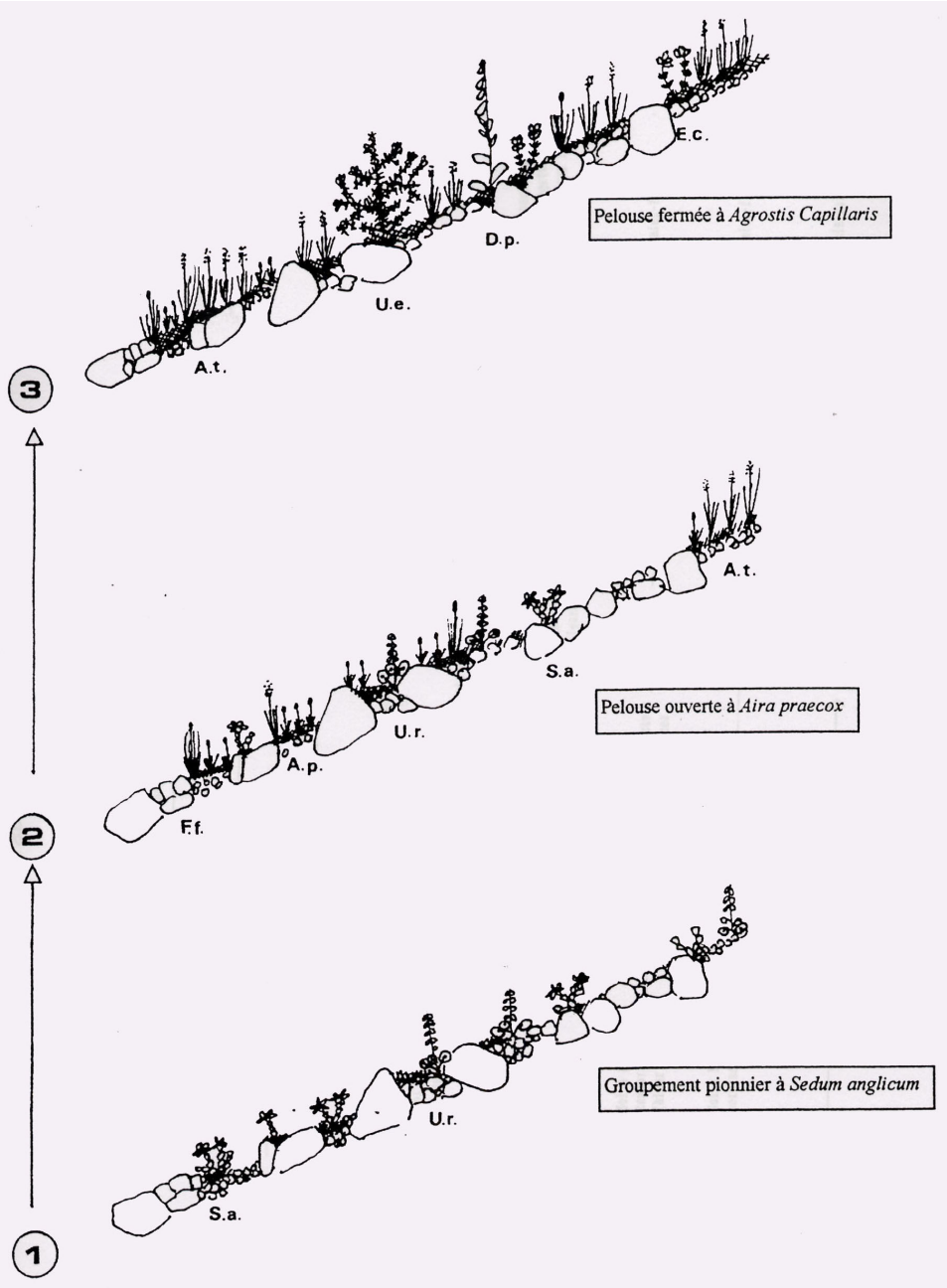


Figure 15 : Evolutions progressives des différents groupements* végétaux des carrières de roches massives de la Basse-Normandie armoricaine (d'après Boulet, 1996).

Les éboulis

Sur **les substrats* mobiles à granulométrie* moyenne et grossière**, Boulet (1996) en Basse-Normandie, observe une dynamique originale : le végétal pionnier* est ici un arbre. Les bryophytes* et les herbacées* arrivent en effet après l'installation du bouleau pubescent qui stabilise et fixe l'éboulis. Comme Petit (1980) pour les terrils* du Nord de la France, Boulet

suggère que la bétulaie* préforestière puis la chênaie succèdent à la bétulaie* pionnière* au moins pour les éboulis en cours de stabilisation.



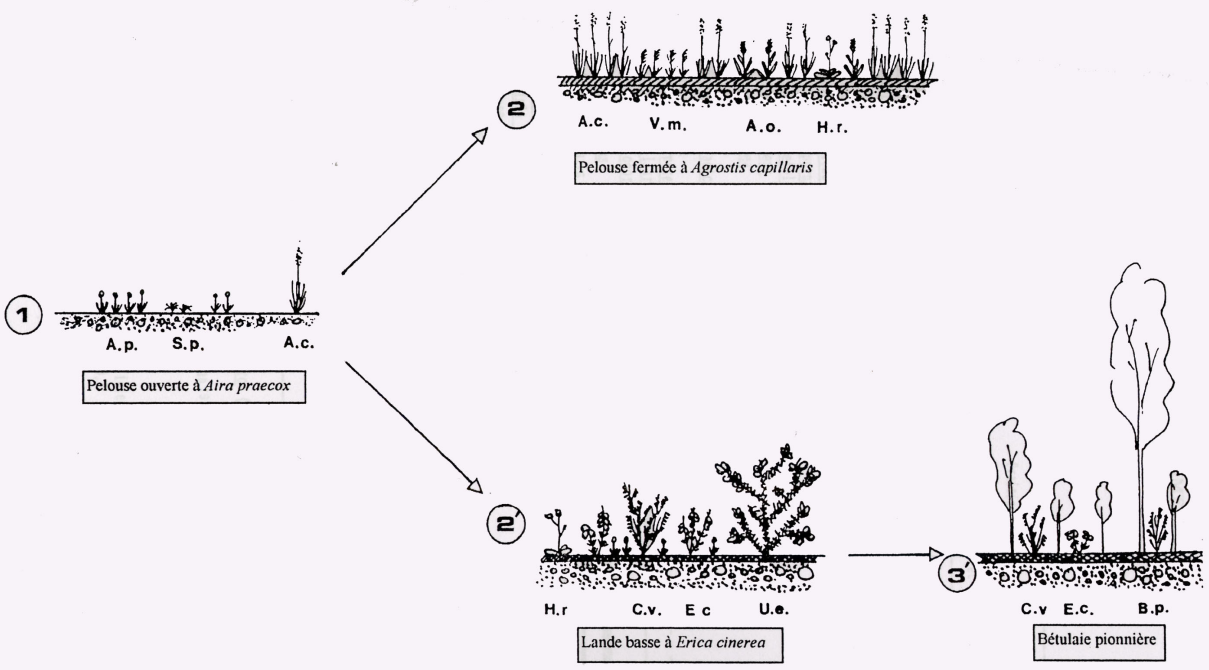
- **Figure 16 : Dynamique de la végétation sur éboulis littoral (Boulet, 1996).**

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

Le cas particulier **des éboulis en situation littorale** a amené Boulet (1996) à proposer une série supplémentaire. Le groupement* pionnier* à orpin anglais (*Sedum anglicum*) cède la place à un groupement* fermé à canche précoce puis à agrostide vulgaire (Figure 16) pouvant évoluer vers une lande* littorale.

Les carreaux

Sur **les carreaux* secs à sol peu compacté et filtrant** de Basse-Normandie, la pelouse* pionnière* à canche précoce évolue vers une bétulaie* selon deux voies différentes : la première consiste en un glissement progressif vers la prairie* sèche à agrostide vulgaire puis à flouve odorante, la seconde passe par un groupement* de lande* à ajonc liée à un processus de podzolisation* qui entraîne une acidification du substrat* (Figure 17). Boulet (1996) suggère comme précédemment une évolution des bétulaies* en chênaies.



- **Figure 17 : Dynamique de la végétation sur substrat* aride (carreaux* secs à sol peu compacté et filtrant) (d'après Boulet, 1996).**

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

Le groupement* à Polytric commun colonise **les dépressions peu profondes où l'humidité est quasi permanente**. La lande* à bruyère à quatre angles peut le remplacer et, selon l'état de saturation en eau du substrat*, Boulet (1996) envisage deux séries évolutives divergentes :

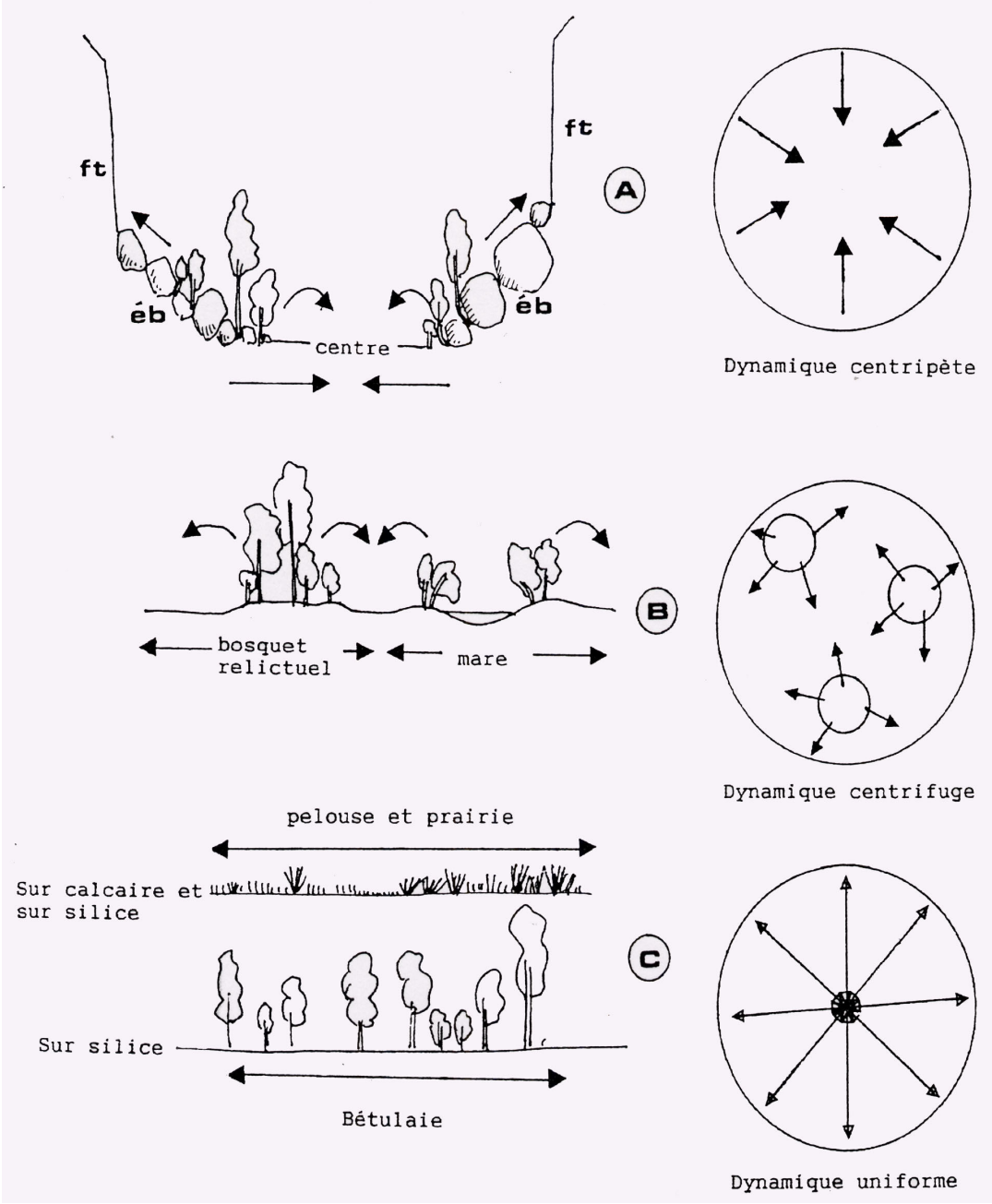
(1) une série mésophile* liée à un meilleur drainage où le bouleau pubescent et le saule roux orientent l'évolution vers la bétulaie* pionnière* des carreaux* ;
(2) une série hygrophile* avec apparition de sphaignes auxquelles succèdent une saulaie puis éventuellement une aulnaie*.

Enfin, **en situation d'humidité permanente**, sur les sols gorgés d'eau, des jonçaies* pionnières*, pouvant évoluer en moliniaies, s'implantent tout d'abord. Le plus souvent ces groupements* à joncs laisseront la place à une saulaie puis à une aulnaie*.

La composante spatiale

L'approche synchronique* de Boulet (1996) sur laquelle nous nous sommes appuyés pour illustrer la diversité des trajectoires qui se réalisent sur les différentes parties des carrières, ne suffit pas à expliquer leur complexité et notamment la simultanéité d'apparition de différents

stades de végétation. Les approches diachroniques[11], *via* des photographies aériennes, de Boulet (Figure 18), les travaux effectués en Europe centrale par Prach & Pysek (2001) et en Franche-Comté et Jura par Frochot *et al.* (2000), nous fournissent un certain nombre de réponses :



- **Figure 18 : Modèles de dynamiques spatiales de la conquête végétale des carrières de roche massive (Boulet, 1996).**

- La strate herbacée* colonise très rapidement et uniformément la quasi-totalité de la carrière. La végétation lichénique, muscinale et herbacée* apparaît dès l'arrêt des perturbations* (Boulet, 1996 ; Prach & Pysek, 2001).
- La végétation arbustive apparaît plus tardivement (de l'ordre de 10 ans après l'arrêt de l'exploitation), de manière beaucoup plus progressive. Elle se fait de proche en proche, soit

[11] L'approche diachronique consiste à suivre l'évolution de la végétation des carrières sur plusieurs années, voire décennies. Afin de remonter dans le temps, Boulet (1996) exploite les missions aériennes de l'IGN dont les premières disponibles datent de 1947.

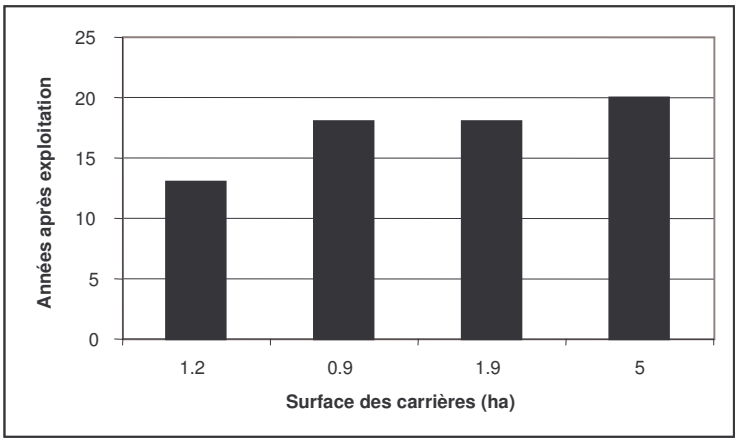
de manière centripète, à partir de la périphérie de la carrière (souvent les éboulis), soit de manière centrifuge à partir de bosquets relictuels ou de foyers de colonisation tels que les points d'eau. Ces derniers favorisent une reprise rapide par la végétation arbustive hygrophile* et mésohygrophile* (Boulet, 1996). Frochot et al. (2000) corroborent ce constat et ajoutent aux éboulis et mares, l'importance des merlons* comme foyer de démarrage d'une colonisation par accrues*.

- Le carreau* peut être envahi (Petit, 1980, parle d'explosion) par des semis de bouleaux sur l'ensemble de la plate-forme. La colonisation n'est ni centrifuge, ni centripète, elle se fait par vague uniforme (Boulet, 1996 ; Prach & Pysek, 1994).
- Plus le site est de taille réduite, plus facile et plus directe est la mise en place de successions* aboutissant à une végétation proche de celle de communautés se développant régionalement (Prach & Pysek, 2001).

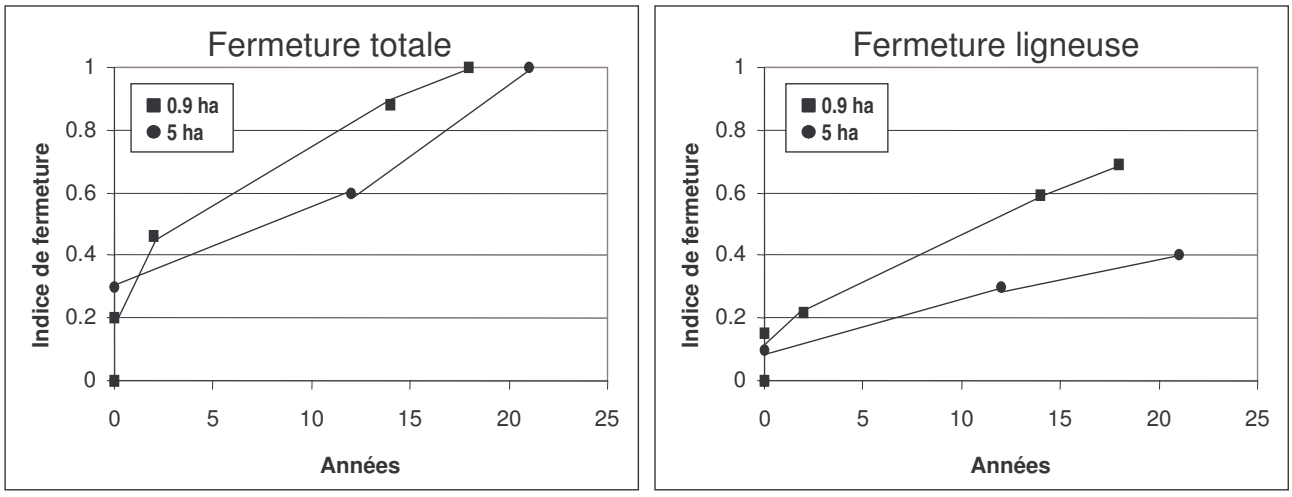
La composante temporelle

La vitesse d'évolution d'un groupement* végétal ou d'une communauté animale sont difficiles à étudier car ce sont des paramètres qui mettent en jeu des processus souvent lents (plusieurs décennies) ou au contraire très rapides (perturbations*), difficiles à détecter ou à mesurer.

S'agissant de l'évolution progressive de la végétation, l'approche cartographique de Boulet (1996) nous indique que, toutes strates confondues (herbacée*, arbustive et arborescente), les carrières acides les plus petites tendent à se végétaliser plus vite que les plus grandes (Figure 19), ce que corrobore Frochot *et al.* (2000) pour des carrières calcaires. La végétalisation semble rapide au cours des premières années, pour ralentir ensuite avec le vieillissement des carrières. Cela s'expliquerait par une colonisation rapide des substrats* potentiellement plus accueillants alors que les substrats* les plus perturbés résistent à une emprise par les végétaux supérieurs (Boulet, 1996) et par des différences microclimatiques du site (Frochot *et al.*, 2000). De plus, la colonisation des substrats* les plus perturbés est beaucoup plus rapidement réalisée par la strate herbacée* (dès que l'action de l'homme cesse), représentée le plus souvent par des groupements* pionniers* (Figure 20).

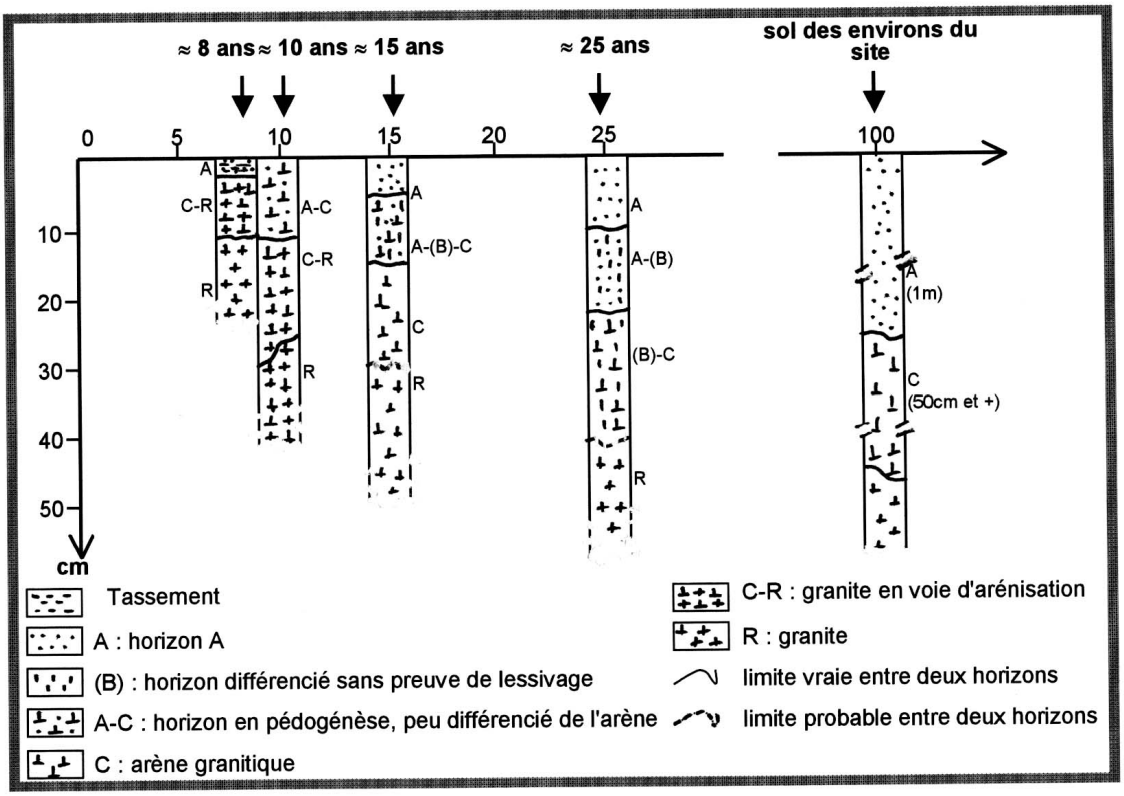


- **Figure 19 : Vitesse relative de végétalisation totale (strate herbacée*, arbustive et arborescente) de quatre carrières acides de Basse-Normandie en fonction de leur âge après exploitation (d'après Boulet, 1996). Les carrières de plus petite taille tendent à se végétaliser plus rapidement.**



- **Figure 20 : Évolution de la fermeture totale (à gauche) et de la strate ligneuse* seule (à droite), de deux carrières acides de Basse-Normandie (d'après Boulet, 1996). Un indice de valeur 1 indique une carrière dont l'étendue est végétalisée à 100 %.**

Cette dynamique végétale est très rapide étant donné la pauvreté du substrat*. En effet l'évolution des sols est lente, et le substrat* minéral présente une différenciation morphologique peu évoluée (Figure 21). Frain (1991) remarque également que dans les carrières du Limousin et d'Auvergne (granite, gneiss, pouzzolane…) "*la végétation est nettement en avance sur le sol*". Les sols sont moins évolués et profonds parmi les groupements* préforestiers et forestiers de carrières que dans leurs homologues régionaux (Boulet, 1996).



- **Figure 21 : Formation des sols sur les carreaux* de carrières de granites du Limousin (d'après Frain, 1991).**

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

Concernant la faune du sol, Dunger (1989) nous donne quelques éléments des successions* se déroulant durant la réhabilitation de sites miniers germaniques. Le Tableau 11 montre que l'activité potentielle de la faune du sol, au moins pour la macrofaune et les microarthropodes augmente continuellement. Le premier stade correspond au stade pionnier* et peut durer de 2 à 30 ans selon les contraintes du milieu. Les communautés de microarthropodes sont représentées essentiellement par des collemboles (*Entomobrya lanuginosa* en surface et *Proisotoma minuta* plus en profondeur). Durant le second stade, la strate herbacée* entraîne une accumulation de litière. Elle permet le développement des premiers vers de terre et d'une densité importante de larves de diptères et de microarthropodes (acariens, collemboles…), ce qui entraîne un développement intensif de prédateurs (coléoptères et arachnides). Dans les meilleures conditions, ce stade se termine au bout de la cinquième à la neuvième année, mais souvent il se prolonge beaucoup plus longtemps. Le troisième stade débute avec le développement d'une strate arbustive et une augmentation de la litière. Les communautés de lombrics et de collemboles se transforment, ce qui se traduit par une décomposition et une humification intense de la matière organique du sol. La durée de ce stade est plus variable que la précédente. Elle est estimée à 5 à 10 ans, et plus selon les conditions de milieux. Le quatrième stade correspond à un stade préforestier de durée très variable, caractérisé par la fermeture de la canopée. Sous l'action des lombrics, un transfert de l'humus vers les horizons plus profonds du sol se produit. À ce stade l'importance relative de l'activité des vers de terre par rapport aux microarthropodes est très élevée. Enfin, le cinquième stade permet à de nombreuses nouvelles espèces de s'installer (acariens parasites, myriapodes, mollusques, gastéropodes, coléoptères, etc.). Frouz *et al.* (2001) observent également au cours de la succession*, une augmentation de l'abondance et du nombre d'espèces de la faune du sol d'anciennes mines de charbon allemandes (acides) et tchèques (alcalines). Cependant, en relation directe avec l'acidité du substrat*, la diversité de la faune des stades pionniers* des mines germaniques est plus faible que celles de République Tchèque.

- **Tableau 11 : Résumé quantitatif de la succession* de la faune du sol dans des sites miniers germaniques (d'après Dunger, 1989). *BM* = biomasse par m², cet indice ne permettant pas de comparaison entre groupes biologiques, son équivalent en termes de valeur énergétique (*ME*) est proposé. La mesure de *ME* est basé sur le taux de respiration d'un individu pour chaque taxon*.**

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

Pour Frochot *et al.* (2000) les successions* se déroulent lentement[12] aussi bien pour les communautés végétales que pour les peuplements animaux dans la carrière de roche massive calcaire de la Chalendrue : oiseaux (surtout des passereaux qui dépendent directement de l'évolution de la structure végétale), reptiles (qui ont peut-être des difficultés de colonisation), batraciens et insectes orthoptères. Pour ces derniers (17 espèces dominées par l'oedipode turquoise (*Oedipoda caerulescens*), le peuplement n'a pas sensiblement changé entre la troisième et la septième année suivant la fin d'extraction.

G. Paillat

L'œdipode turquoise (*Oedipoda caerulescens*) – Ancienne carrière de la Moutte, Paimpont (35).

De son côté, Picaud (1998) observe, sur d'anciennes mines revégétalisées du Limousin la même prédominance de l'œdipode turquoise, mais seulement durant les premières années. Globalement, il constate des modifications plus profondes des peuplements de criquets (Figure 22). Ces changements sensibles sont à rattacher à une évolution rapide de la végétation (soutenue artificiellement par apport de terre végétale et par semis par projection hydraulique) (Bonnet *et al.,* 1997) :

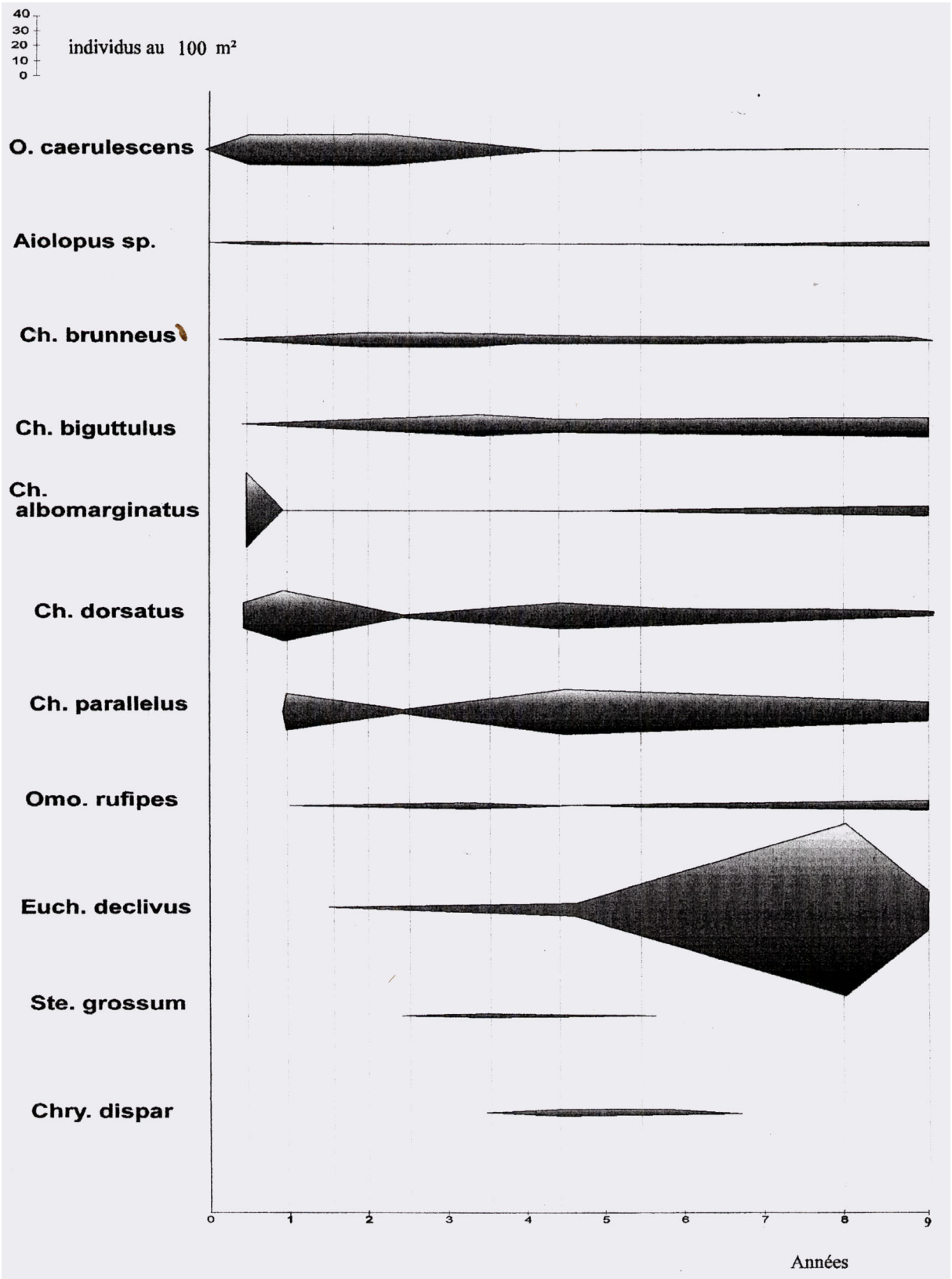
En milieu sec où le recouvrement végétal n'est pas de 100 %, la colonisation est rapide :

- *Oedipoda caerulescens* → *Ailopus thalassinus, Ailopus strepens* → *Chorthippus brunneus* → *Chorthippus biguttulus* → *Euchorthippus declivus*.
- En milieu humide, l'installation des espèces est plus lente :
- *Stetophyma grossum* → *Chorthippus montanus* → *Chrysochraon dispar*.
- En milieu mésophile*, le classement est plus difficile, il pourrait être :
- *Chorthippus albomarginatus*, *Chorthippus dorsatus* → *Chorthippus parallelus*, *Omocestus rufipes*.

Comme pour les orthoptères, l'installation de la faune vertébrée est directement dépendante du développement de la végétation (Majer, 1989). Certaines espèces sont de meilleures colonisatrices que d'autres, comme le montre l'étude de Galan (1997) pour les reptiles et

[12] Cette appréciation de la vitesse des trajectoires est très relative et nécessiterait des comparaisons plus objectives à l'aide de trajectoires de référence

amphibiens. Cet auteur a examiné la colonisation d'anciens sites miniers espagnols ayant été revégétalisés (semis par projection hydraulique) à des dates connues, lui permettant d'identifier notamment le crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*), la grenouille de Perez (*Rana perezi*) et le crapaud calamite (*Bufo calamita*) comme des espèces typiquement pionnières*.



- **Figure 22 : Etude diachronique* et synchronique* de l'évolution des peuplements de criquets de 7 anciens sites miniers revégétalisés du Limousin (d'après Picaud, 1998).**

Après ces pionnières*, le processus de colonisation est rapide aussi bien pour les amphibiens que les reptiles (Tableau 12). Les premiers individus observés durant les trois premières années

sont tous des juvéniles et les premiers indices de reproduction ne sont observés qu'au bout de cinq années (crapaud calamite). Enfin, l'auteur conclut qu'un minimum de dix années est nécessaire pour que les communautés d'amphibiens et de reptiles atteignent les caractéristiques antérieures à l'ouverture des mines.

- **Tableau 12 : Nombre d'individus de la batrachofaune et de l'herpétofaune potentielle d'anciens sites miniers espagnols en fonction de leur âge après végétalisation (d'après Galan, 1997).**

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

Importance des perturbations

Selon Frochot *et al.* (2000) les perturbations* apparaissent comme des processus très favorables à l'intérêt écologique des carrières, en particulier pour leur fonction rajeunissante des successions* et de stimulation de la productivité des écosystèmes*. Leur influence dépend de leur nature, de leur intensité et de leur régime (périodicité…). La richesse et l'originalité des communautés culminent relativement peu de temps après l'extraction des matériaux, puis s'abaissent et se stabilisent au fur et à mesure que les effets de cette perturbation* initiale s'estompent. Dans les carrières en eau temporaire, l'assec périodique entretient un régime de perturbation* intense, qui maintient régulièrement le site dans un certain état de jeunesse. En revanche si le régime d'instabilité des fronts de taille est trop fréquent, il peut induire l'exclusion de certains lichens et mousses, même si les herbacées* rudérales* communes se maintiennent (Ursic *et al.*, 1997).

Durant la phase d'exploitation de la carrière, le rajeunissement des fronts de taille, les dépôts et mouvements de remblais… limitent les possibilités de développement de la végétation. Si la périodicité de ces interventions n'est pas trop rapprochée, elle peut permettre le maintien du site dans une phase pionnière* avec implantation des espèces associées. Malheureusement, le

manque d'investigations connues, portant sur des carrières en activité, ne nous permet pas d'argumenter ce point particulier.

Plus concrètement, il ressort des travaux de Frain (1991) et Boulet (1996) deux aspects perturbant majeurs : le mouvement des éboulis et l'action des lapins. Le premier joue un rôle de filtre à l'implantation des espèces sur éboulis mobile. Comme nous l'avons vu à de nombreuses reprises, c'est dans la plupart des situations quasi exclusivement le bouleau qui réussit à supporter cette perturbation*. L'implantation des autres espèces est remise en cause à chaque mouvement important du pierrier. L'affouillement du substrat* et l'abroutissement par les lapins peuvent influencer de façon notable la dynamique de la végétation. Par exemple, le groupement* à polytric observé sur les rochers et les fronts de taille peut parfois entraîner une situation d'impasse pour l'installation et le développement d'autres espèces (Frain, 1991). Dans ce cas, une ouverture par les lapins dans ce tapis végétal fermé peut relancer la dynamique et permettre une réinstallation de pelouses*. Par ailleurs, la comparaison de la végétation de carrières calcaires britanniques soumises ou soustraites à l'activité des lapins, a montré une action très bénéfique (au moins à court terme) de ceux-ci sur le nombre et l'abondance des plantes herbacées* (Cullen *et al.*, 1998).

- **La diversité des milieux rencontrés dans les carrières de roche massive acide et la diversité des contextes environnementaux sont potentiellement les facteurs déterminants de la diversité biologique des carrières du Massif armoricain.**
- **Cette diversité biologique s'interprète moins sur le plan de l'intérêt[13] des espèces observées, que sur celui de l'originalité des processus de colonisation et des trajectoires rencontrés dans les carrières.**
- **La présence de milieux nus et le caractère pionnier* des biocénoses* des carrières, parce qu'il sont rares sur le reste du territoire, sont les éléments majeurs qui ressortent de la spécificité des carrières de roche massive.**

[13] Selon Dupont (2001), l'intérêt d'une espèce dépend de facteurs variés : l'étendue de son aire de répartition ; le territoire qu'elle caractérise (espèces atlantiques, par exemple), sa position en limite ou au voisinage de la limite d'aire, son inféodation à des milieux plus ou moins stricts et plus ou moins remarquables, *etc.*

L'ECOLOGIE DE LA RESTAURATION

Il ne s'agit pas ici de faire un traité de "l'écologie de la restauration"[14] mais d'aborder quelques notions importantes pour la compréhension et la mise en œuvre de programmes de restauration de sites transformés par des activités industrielles et notamment celle de l'extraction de matériaux.

AU-DELÀ DE LA REGLEMENTATION

Il est intéressant de noter qu'en 1996, Harris et ses collègues dans leur ouvrage sur les principes et pratiques de restauration mettent en avant que "c'est un signe de maturité qu'il soit maintenant reconnu que la restauration d'un site doit être planifiée en amont de l'exploitation industrielle…/…ce qui est devenu le plus souvent une obligation réglementaire". Cette avancée semble effectivement s'être produite en France dès les années soixante-dix (voir p 7) puisque les mesures de "remise en état", figurent dans l'autorisation initiale d'ouverture d'une exploitation.

Il est pourtant difficile de se contenter de cette évolution, car :

i) il faut distinguer "remise en état" et "réaménagement". En effet l'aménagement du site qui consiste à créer des équipements permettant de lui donner une nouvelle vocation, est une démarche qui dépend beaucoup de la volonté du propriétaire et n'est pas de la responsabilité de l'exploitant ;

ii) dans le cadre d'une réaffectation à vocation écologique il est très délicat voire impossible de prédire l'évolution écologique ultérieure du site (Danais & Montfort, à paraître). En effet, il est évident qu'au moment de l'arrêté d'autorisation, ni l'exploitant, ni les services de l'État, ne disposent d'informations prospectives suffisantes pour intégrer toute l'évolution ultérieure du site (en particulier les processus de renaturation spontanée*) en cours d'exploitation et au fur et à mesure de l'apparition de surfaces délaissées. Seuls des hypothèses et des scénarii sont possibles, grevés d'incertitudes ;

iii) de fait, les carrières de roche massive sont souvent le parent pauvre des formes de réhabilitation des sites d'extraction de granulats. Leur valorisation économique est (a priori) généralement plus difficile, et les partenaires potentiels appréhendent de s'engager à long terme dans ce type de projet.

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

Ce type d'approche nécessite la mise en place d'un suivi scientifique, permettant d'examiner l'évolution du site afin de réajuster les préconisations d'aménagement. Elle induit un engagement volontaire – et donc hors du cadre réglementaire – de l'exploitant et/ou du propriétaire dans une démarche intégrant l'ensemble des acteurs environnementaux (administration, collectivités locales, associations…). En outre, la mise en œuvre de cette démarche peut se produire dans le

[14] L'écologie de la restauration est une discipline de l'écologie qui a pris son essor au cours des années 1980 ("*The Society for Ecological Restoration*" qui réunie 2800 membres a été fondée en 1980). Plusieurs revues lui sont consacrées : Restoration ecology, Ecological Engineering…).

cadre de la mise en place des Comités locaux de suivi[15]réunissant propriétaires, élus, associations de riverains, administration intéressées... Dans le cadre de ces comités, de nouvelles orientations concernant la remise en état du site peuvent être proposées à l'administration de tutelle.

Sur le plan financier, cette démarche peut sembler se positionner au rang des orientations à faible valeur économique (Harris *et al.*, 1996), mais _il ne faut pourtant pas accepter trop précipitamment cette idée d'investissement à perte lorsque l'on s'engage dans un véritable plan de restauration écologique. Une étude comparée du coût de certains aménagements mis en œuvre (parfois spectaculaires mais sans véritable intérêt écologique) et du coût d'un plan de restauration raisonné sur le long terme et impliquant l'ensemble des acteurs environnementaux (plus efficace et mieux intégré dans le tissu socio-économique local) permettrait certainement de relativiser cette idée, et de placer sur d'autres plans la valeur des carrières : meilleure perception par la société, intérêts pédagogique et scientifique...

On notera que Sthal (2000, *in* Frochot *et al.*, 2000) conclut d'une évaluation financière a posteriori des réaménagements écologiques de carrières en eau, que ceux-ci représentent un coût faible à négligeable à deux conditions :

1. qu'ils tiennent compte raisonnablement des potentialités du site, c'est-à-dire aussi bien des contraintes naturelles (hydrologie*, paysage environnant…) que des modalités et contraintes de l'extraction.
2. qu'ils soient prévus très en amont dans la vie de la carrière, de manière à ce que les travaux se déroulent au fur et à mesures des phases de succession* de l'extraction.

Ces auteurs observent d'ailleurs des réaménagements qui, réduisant l'originalité des écosystèmes* et le nombre d'espèces rares, abaissent la biodiversité (au moins à une certaine échelle) : les apports de terre végétale, l'introduction d'espèces exotiques… peuvent, dans certains contextes, constituer des coûts non seulement superflus mais parfois aux effets écologiques négatifs.

Cela nous amènera plus loin, en s'appuyant sur les enseignements tirés de l'analyse des règles de mise en place des plans de restauration, à proposer une réflexion sur une gestion des carrières sortant du cadre strict de la réglementation actuelle et faisant intervenir l'ensemble des acteurs territoriaux et régionaux plutôt que les seuls exploitants et propriétaires.

DEFINITION DES CONCEPTS DE BASE, APPLICATION AUX CARRIERES DE ROCHE MASSIVE

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

[15] La mise en place de Comité de locaux de suivi n'est pas imposée par la législation. Elle constitue une démarche volontaire d'une entreprise ou d'un exploitant notamment pour les adhérents à la Charte des producteurs de granulats.

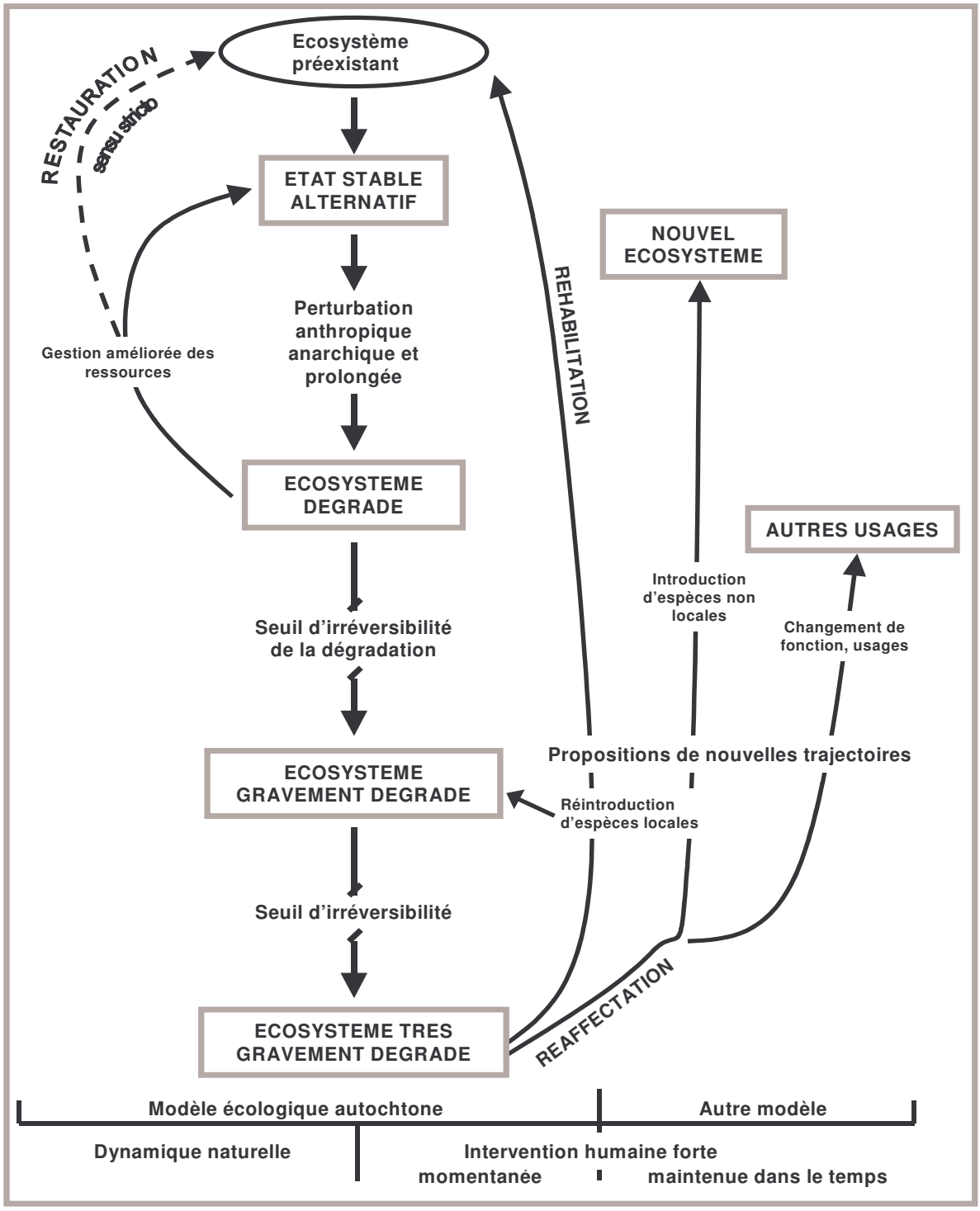
- Le concept général de trajectoire d'un écosystème* recouvre à la fois la succession* "naturelle" d'un écosystème* et tous les autres itinéraires que peut suivre cet écosystème* sous les diverses pressions qui lui sont applicables.
- Même si elle est en partie arbitraire, il est souhaitable de disposer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

Parmi les différentes approches proposées par les auteurs (Cairns, 1998 ; Aronson *et al.*, 1993a), trois d'entre elles sont illustrées dans un modèle général (Figure 23), qui situe la restauration, la réhabilitation et la réaffectation par rapport à la dégradation, à la surexploitation des ressources ou par extensification des activités humaines dans un espace donné.

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

  La restauration n'est applicable qu'a condition que l'écosystème* ait conservé la capacité à "se restaurer" suite à une perturbation*, autrement dit qu'il subsiste un certain niveau de résilience et que l'intervention de l'homme soit, si possible, limitée à une diminution puis un contrôle de son niveau de pression. Dans le cas contraire, sa capacité dynamique étant devenue nulle, l'écosystème* se trouve être "bloqué". Seule une intervention humaine forte permet alors soit de replacer l'écosystème* sur une trajectoire favorable au rétablissement des fonctions essentielles (réhabilitation), soit d'en faire un tout nouvel usage (réaffectation), selon un modèle différent de celui de l'écosystème* pré-existant.
- La réhabilitation d'un écosystème* consiste à lui permettre de retrouver ses fonctions essentielles grâce à une intervention forte mais limitée dans le temps. Comme pour la restauration, la réhabilitation aura pour objectif de rétablir des écosystèmes* autonomes (et durables si une exploitation quelconque est maintenue), caractérisés par l'existence d'une dynamique dans les communautés végétales et animales et par leur capacité à réparer eux-mêmes les méfaits de perturbations* (résilience).
- La réaffectation décrit ce qui se passe lorsqu'un écosystème* est transformé par l'homme et qu'un nouvel usage en est fait. Le nouvel état est éventuellement sans relation de structure ou de fonctionnement avec l'écosystème* qui préexistait. (ex : colline transformée en plan d'eau).

  La réaffectation concerne également la modification d'un écosystème*, par la gestion qui en est faite, afin d'en privilégier un élément ou une fonction particulière; au prix d'interventions constantes.



- **Figure 23 : Modèle général décrivant la dégradation des écosystèmes* et les trois voies majeures envisagées pour y remédier (restauration, réhabilitation, réaffectation) (d'après Le Floc'h & Aronson, 1985 ; Aronson *et al.*, 1993a).**

- Le rajeunissement pourrait être ajouté au modèle de la Figure 23 et constituer la 4ème technique de l'écologie de la restauration (Cairns, 1998). Cette voie permet de ramener, volontairement, un écosystème* ayant atteint son état de maturité (ou y tendant) vers un état plus jeune marqué, par exemple, par une plus grande diversité de strates basses de végétation, une plus grande richesse floristique... Dans le cas des carrières de roche massive, l'élimination de bétulaies* peut être une intervention à envisager afin de permettre le maintien de pelouses silicicoles*.

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

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

Dans le cas des carrières de roche massive c'est le terme réaffectation qui est le plus adapté. En effet, dans le cadre des opérations de remise en état des sites d'extraction de granulats, il n'est pas techniquement envisageable de reconstituer le site dans son été initial. En revanche, il est possible de créer un nouvel écosystème en s'appuyant sur les nouvelles conditions environnementales créées par l'activité d'extraction (substrats minéraux nus...).

LA DIVERSITE DES ORIENTATIONS DE REAFFECTATION

Les orientations de réaffectation se déclinent selon diverses modalités. Nous avons cherché à les classer en fonction du degré d'intervention qu'elles impliquent.

DES ORIENTATIONS LES PLUS ARTIFICIELLES…/…

Orientation 1 - Les premiers programmes de restauration des milieux dégradés (essentiellement liés à l'activité minière) n'étaient pas à vocation écologique mais plutôt à vocation de restitution d'espaces viables pour l'agriculture, l'exploitation forestière, la construction de bâtiments... Cette approche s'attache le plus souvent, selon l'état de dégradation et de contamination des sols, à obtenir par différents procédés (enlèvement, traitement chimique ou biologique…) un sol propice à l'implantation de végétaux cultivés et une eau propre... (Harris *et al.*, 1996).

Orientation 2 - On connaît des cas de transplantation de l'ensemble [sols + végétation] avant l'entrée en activité de sites miniers, avec ensuite réimplantation mécanique une fois le site fermé, mais le coût prohibitif et les problèmes techniques de cette méthode font qu'elle est rarement appliquée (Bradshaw, 1983).

Orientation 3 - La création de toute pièce d'un habitat* particulier (une prairie*, une lande*…) peut également être envisagée (Box, 1996). On cherche ici à fournir des conditions de sol propices à la mise en place d'une communauté végétale choisie tout en évitant la colonisation du site par des espèces plus compétitives. L'installation de la végétation se fait par semis ou par plantation directement en place et la réussite de son développement nécessite une surveillance et un entretien soutenu.

…/… AUX ORIENTATIONS LES MOINS DIRIGEES

Des approches visant à recouvrer des habitats* "naturels" de façon moins artificielle se sont également développées. Leur justification s'appuie sur le double constat que : (i) de façon universelle, les gouvernements, les industriels et autres organismes tendent à réduire leurs dépenses non indispensables, (ii) la réaffectation systématique de sites dégradés vers l'agriculture ou la foresterie n'est plus justifiée[16] (Bradshaw, 2000) et s'appuie sur les exigences légales des différents pays[17] (*e.g.* Booth *et al.*, 1999, Wali, 1999). Cet auteur suggère que d'autres considérations, telles que le maintien de la biodiversité, qui font intervenir des processus naturels de mise en place d'écosystèmes*, constituent dorénavant des vocations de restauration privilégiées. Il s'agit alors, lorsque certains facteurs limitants sont absents (substances toxiques...), de laisser les processus naturels se dérouler. Cela distingue les écologues des agronomes et forestiers, car ils peuvent parfois offrir des solutions moins coûteuses et moins exigeantes en maintenance, en intégrant la capacité de la nature à se restaurer elle-même (Atkinson & Willows, 1990). Elle peut nécessiter l'usage de techniques de réhabilitation des sols similaires à la précédente (décontamination…) mais le résultat final attendu n'est plus d'obtenir un sol productif économiquement, mais un espace qui s'insère de façon satisfaisante dans son environnement.

Deux options pouvant se combiner peuvent alors être envisagées : la première consiste à obtenir la réimplantation de végétation de façon accélérée, par apport de semences ou par plantation, la seconde repose sur le seul principe de colonisation naturelle de la végétation.

Orientation 4 - La première option est envisagée lorsqu'une cicatrisation rapide s'impose pour des raisons esthétiques, lorsque des phénomènes d'érosion doivent être évités, lorsqu'une régénération rapide des sols est recherchée ou pour implanter des espèces intéressantes mais n'ayant plus la capacité de coloniser le site (Ash *et al.*, 1994). Elle nécessite le semis et la plantation d'un mélange de semences et de plants dont la composition est établie en fonction des conditions édaphiques* et de la végétation environnante (Hodgson, 1982 ; Cullen *et al.*, 1998, Ash *et al.*, 1994). Un travail du sol (décompaction, drainage), des apports d'engrais accompagnés d'irrigation… peuvent être nécessaires (Tableau 13). L'objectif ici n'est pas d'obtenir la mise en place d'un habitat* particulier mais d'accélérer les processus de successions* de la végétation afin de permettre au site dégradé de ne pas perdre ses qualités potentielles et de se fondre rapidement dans son environnement (Bradshaw, 2000).

Cette approche est largement utilisée en Europe, en Australie et aux États-Unis et de nombreux exemples d'analyses de la réussite ou de l'échec de ces procédés sont disponibles (Jochimsen, 2001 ; Bell, 2001 ; Strong, 2000 ; Dragovich & Patterson, 1995 ; Choi & Wali, 1995 ; Ward *et al.*, 1996...). Dans tous les cas elle est préférable en termes de diversité biologique à la mise en place de monoculture, comme l'illustre la Figure 24.

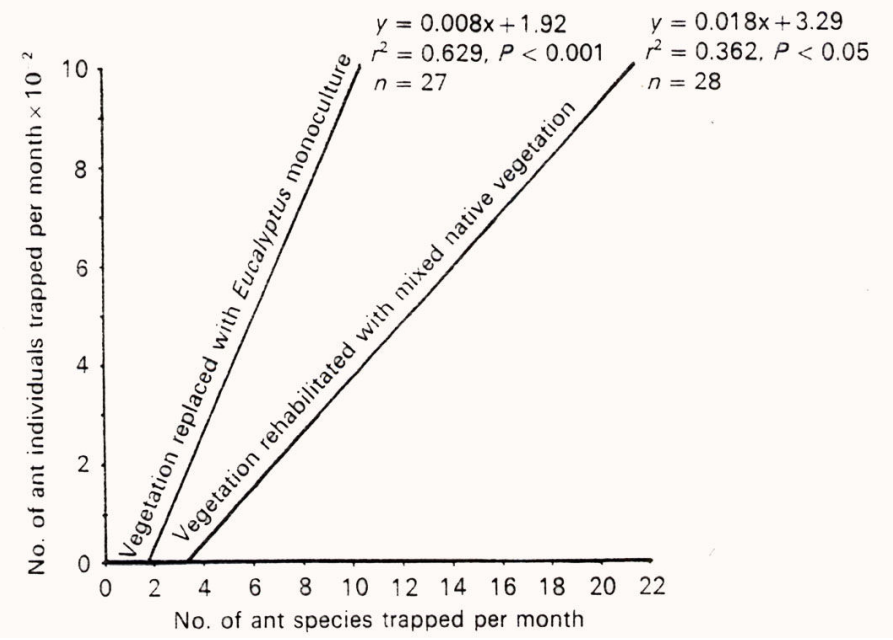
Orientation 5 - La seconde option exploite les potentialités des processus spontanés. Un travail préparatoire des sols peut être effectué, mais la colonisation du site par la végétation se fait à partir des semences venant naturellement sur le site. La synthèse que Prach & Pysek (2001) ont faite de l'ensemble de leurs travaux portant sur les successions* primaires se déroulant dans des habitats* dégradés en République Tchèque illustre bien cette démarche. Ils resituent leur approche dans un contexte régional où de nombreux sites sont dégradés par diverses activités d'extraction de matériaux et de construction mais où les moyens financiers disponibles pour restaurer ces habitats* sont souvent très limités. Ils considèrent alors que sous certaines conditions, le processus de succession* spontanée* peut être une alternative acceptable et peu

[16] Cela n'est évidemment pas généralisable à toutes les régions du globe. Par exemple la Chine mène actuellement une politique de réhabilitation des espaces dégradés par l'activité minière, avec pour objectif prioritaire de restituer ces territoires à l'agriculture (Miao & Marrs, 2000).

[17] Par exemple aux États Unis dans l'état du Wyoming, la loi impose que les anciens sites miniers est une densité de 1 arbuste par m² sur 20 % de la surface (Booth *et al.*, 1999).

- **Tableau 13 : Les éléments principaux des successions* primaires sur terrain dégradé et les différentes façons de les assister (d'après Bradshaw, 2000).**

Processus	Problème	Solution
1. Immigration des espèces végétales appropriées	Pas suffisamment d'espèces adaptées	Semis ou plantation, favoriser les oiseaux (ornithochorie)
2. Implantation des espèces appropriées	Altération des roches limitée	Dégrossir et pailler les surfaces
3. Stabilisation et accumulation de matériel minéral fin	Érosion des particules fines	Apport de particules fines, épandage de boues, paillage.
4. Accumulation de nutriments	Manque de nutriments	Aider les plantes tolérantes par apport de fumure
5. Accumulation d'azote	Manque d'azote	Aider les espèces fixatrices d'azote par épandage de boues
6. Immigration de la flore et de la faune du sol	Immigration de certaines espèces ralenties	Introduction de mycorhizes*, vers de terre et autres invertébrés
7. Modification des propriétés du sol sous l'action des végétaux, des organismes du sol	Évolution ralentie	Aider les plantes vigoureuses qui favorisent l'activité racinaire et les substrats* organiques
8. Réduction de toxicité	Excès d'acidité	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 su sol	Excès de compaction	Décompaction, sou-sollage*
	Manque se 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[18]



- **Figure 24 : Relation entre le nombre d'espèces de fourmis et leur abondance dans d'anciennes mines australiennes de bauxite où la forêt originelle est dans un cas, remplacée par une monoculture d'eucalyptus et dans l'autre cas réaffectée avec un mélange d'espèces autochtones (d'après Majer, 1989).**

[18] Le problème du relargage d'acidité et de métaux lourds par altération des minéraux sulfurés (pyrite) est actuellement une préoccupation majeure (Bradshaw & Hüttl, 2001) et de nouvelles alternatives afin de résoudre ce problème sont en développement (e.g. Evangelou, 2001 ; Devaux, 2001).

coûteuse (avec des avantages et des inconvénients, Tableau 14), aux mesures de restauration plus interventionnistes.

L'utilisation des processus naturels peut sans aucun doute être envisagée comme outil de réaffectation d'un site. En revanche, *"utilisation des processus naturels"* ne signifie pas nécessairement *"laisser-faire"* car toute intervention de maintenance ne doit pas être exclue pour autant. Ainsi, faisant le constat qu'en absence de toute intervention humaine, la colonisation naturelle des carrières abandonnées est rapide et importante, avec constitution d'écosystèmes* neufs et souvent originaux, Frochot & Godreau (1995) préconisent que des actions en faveur de la valeur écologique de ces sites peuvent être entreprises, tout en se limitant à orienter ce phénomène naturel, le plus souvent en favorisant tel ou tel type d'habitat*, donc tel ou tel groupe d'espèces.

De plus, il peut être nécessaire de mettre en œuvre plusieurs de ces méthodes en les combinant dans le temps ou spatialement selon les contraintes et les exigences techniques et biologiques du site.

- **Tableau 14 : Tentative de résumé des avantages et inconvénients de l'utilisation du processus de succession* spontanée* dans les programmes de restauration se déroulant en zones tempérées d'Europe (Prach & Pysek 2001).**

Positifs	Négatifs
Faibles coûts	
Formation rapide (de l'ordre de 15 ans) d'un couvert végétal continu (excepté pour les substrats* toxiques).	Les successions* peuvent être stoppées précocement par l'expansion d'espèces compétitives.
Installation de ligneux indigènes et bien adaptés.	Certaines plantes peuvent être source de pollen allergène (ex : *Betula pendula*).
Faible couverture par des espèces exotiques	
Refuge pour la faune et la flore	Sources occasionnelles de semences de mauvaises herbes.
Haute valeur patrimoniale en comparaison à des sites restaurés artificiellement.	Faible valeur de production en comparaison à des sites restaurés artificiellement.

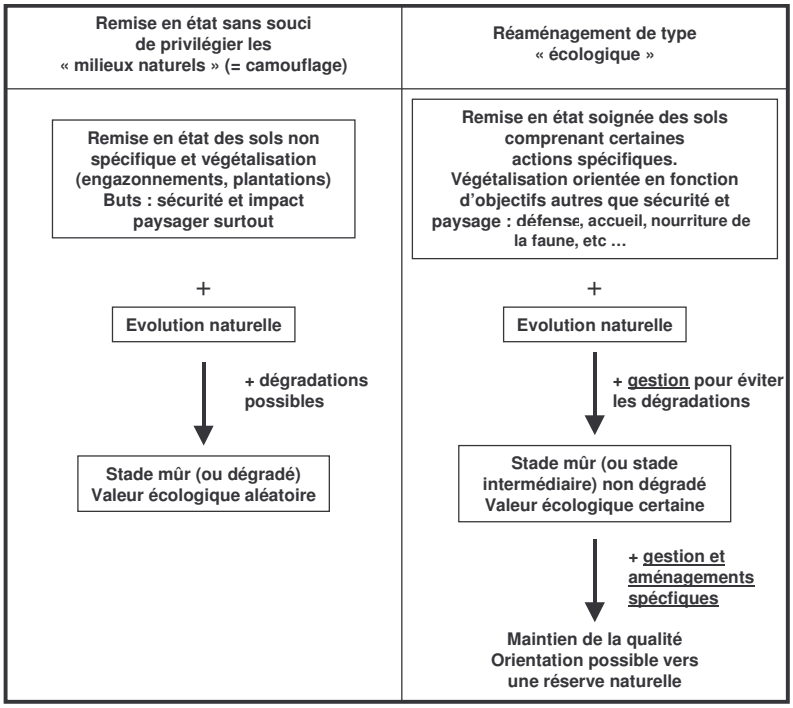
LA REAFFECTATION ECOLOGIQUE DES CARRIERES EN FRANCE

Il a fallu attendre 1994 pour qu'un colloque intitulé "Recréer la nature" soit consacré entièrement à la restauration écologique (Ecosphère, 2001). En revanche, dans le cadre plus précis des carrières, il faut signaler que dès 1979, l'UNPG a organisé une journée d'études sur le thème du potentiel de création et de reconquête des milieux naturels par les carrières. Ensuite l'AFIE a consacré en 1993 deux de ses journées techniques au thème de l'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Enfin, plus récemment en 2000, s'est tenu dans les locaux de l'UNESCO à Paris, un colloque consacré à l'apport écologique des carrières pour la recréation de zones humides. Cette rencontre concrétisait l'aboutissement d'une étude initiée par le Comité National de la Charte de l'UNPG, portant sur le patrimoine écologique des zones humides issues de l'exploitation des carrières (Ecosphère, 2001), et s'insérant dans le cadre plus large des programmes "Zones humides" et "Recréer la nature" lancés par le Ministère de l'Environnement. Elle faisait suite à une étude moins ambitieuse mais également de grande portée, intitulée : "Évaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après

exploitation et modalités de leur restauration écologique", financée par la taxe parafiscale sur les granulats et qui reposait sur le diagnostic écologique de 12 carrières sèches en roche massive et 12 gravières réparties sur les différentes régions de France (Sauveterre, 1985). Par ailleurs, des inventaires d'anciens sites d'extraction ont été effectués en Loire-Atlantique (Chépeau) et dans les Côtes d'Armor et le Morbihan (Barnaud, 1980a, b), dans le but d'identifier quelques sites à réaffecter en priorité. On regrettera, pour ces derniers, qu'ils n'aient pas abouti à des réalisations concrètes d'opération de réaffectation.

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

Cet état de fait résulte en partie des obligations imposées par la réglementation (régalage* des sols, exigence d'insertion paysagère, mise en sécurité...) et des orientations essentiellement "paysagères-agricoles-forestières" des guides techniques au réaménagement qui en découlent. En l'absence de concertation des personnes compétentes, il existe en effet une forte incompatibilité entre des aménagements à vocation paysagère visant à réduire l'impact visuel des carrières et ceux à vocation écologique visant à exploiter les potentialités écologiques du site (Figure 25). Elle se concrétise par des choix techniques divergents, telle que la plantation d'espèces exotiques et l'utilisation abondante de terre végétale, qui s'oppose par exemple à la colonisation naturelle par la flore de substrats minéraux laissés nus. Ces deux visions ne sont pas incompatibles et peuvent parfaitement se compléter (Sauveterre, 1985 ; Coppee & Noiret, 1995 ; Danais & Montfort, à paraître).



- **Figure 25 : Comparaison schématique d'un réaménagement de type "écologique" et d'une remise en état de type "camouflage" (Arnal, 1984)**

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

CONCEVOIR, ORGANISER ET CONDUIRE DES PROGRAMMES DE REAFFECTATION

Selon Cairns (1998), les connaissances scientifiques ne sont pas suffisamment avancées, ni pour prédire précisément les conséquences des altérations environnementales, ni pour restaurer les écosystèmes* endommagés ! Cependant, même si l'écologie de la restauration est une discipline émergente qui nécessite encore de nouvelles approches de terrain (Bell *et al, 1*997), des guides, des principes, des recommandations et des outils pour mener à bien des projets de réaffectation sont proposés dans de nombreux ouvrages (Coppin & Bradshaw, 1982 ; Aronson *et al.,*1993a ; Aronson et Le Floc'h, 1996 ; Box, 1996 ; Harris *et al.*, 1996 ; Bell *et al.*, 1997 ; Higgs, 1997 ; Cairns, 1998 ; Clewell *et al.*, 2000 ; Dale *et al.*, 2000 ; Frochot *et al.*, 2000 ; Palik *et al.* 2000…).

Il ressort de l'analyse de ces documents qu'il n'existe pas de recettes miracles qu'il suffirait de suivre à la lettre pour réaffecter un site dégradé, mais que pour chaque situation, un certain nombre de règles autour d'une réflexion globale doivent être respectées. Nous tentons ici de les reformuler dans un cadre appliqué à notre problématique des carrières de roche massive.

CADRE GENERAL

Les deux facteurs essentiels de la bonne réussite d'un programme de réaffectation sont le temps et la souplesse. Un programme de réaffectation ne peut, en effet, être établi de façon figée à un moment donné ; sa planification doit pouvoir évoluer en fonction du développement et des orientations prises par les processus écologiques. Les objectifs désignés doivent pouvoir être réexaminés périodiquement pour éventuellement être réorientés, et cela sans remettre en cause l'ambition générale du programme de réaffectation.

Cela implique, pour une durée adaptée à la vitesse d'évolution des processus écologiques (plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années), de maintenir l'intervention périodique d'un observatoire scientifique, d'une équipe technique et d'un comité décisionnel. La création d'une telle structure partenariale, qui sort des obligations réglementaires de l'exploitant et du propriétaire (démarche volontaire), doit être mise en place dès l'ébauche du projet dans un cadre ouvert à la concertation de l'ensemble des acteurs locaux (administrations, collectivités territoriales, associations…). Il faut en effet bien concevoir qu'un projet de réaffectation à orientation écologique ne peut se construire de façon isolée. Il doit d'abord intégrer des préoccupations qui sont parfois éloignées des considérations purement écologiques ou scientifiques telles que des aspects historiques, culturels, sociaux, économiques ou politiques… (Higgs, 1997, Aronson et al, 1995). En fournissant des garanties de financement à long terme et une stabilité des grandes orientations du projet (indépendantes de la durée des mandats électoraux, des baux…), ce type d'organisation est le seul garant de la réussite de tout programme.

De façon concrète, de telles modalités d'intervention sur le long terme peuvent se concevoir dans le cas d'un site acquis par une collectivité locale (Conseil général -dans le cadre de la Taxe Départementale des Espaces Naturels Sensibles par exemple-, commune -avec gestion et suivi assurés par exemple par une association pilotée par un conseil scientifique-…), ou pour des sites s'inscrivant dans un contexte particulier (proximité d'une ZNIEFF, parc naturel régional…)...

DIAGNOSTIC DES POTENTIALITES ECOLOGIQUES DU SITE

Un programme de réaffectation peut être mis en place à différents stades d'évolution d'un site (carrière désaffectée, en cours d'exploitation ou même non encore exploitée). Quel que soit l'état du site, le diagnostic permettra d'identifier ses potentialités écologiques qui constitueront alors les arguments à la justification des objectifs de la réaffectation et des moyens pour les atteindre. Toutefois, plus cette expertise sera établie précocement et en amont de l'activité d'extraction, plus il sera possible d'exploiter au mieux les potentialités du site et d'atteindre efficacement, avec des opérations d'aménagement moins onéreuses, les objectifs désirés.

Selon les connaissances disponibles sur l'écologie des carrières de roche éruptive (voir chapitre consacré à l'écologie des carrières, p 33 et suivantes), ce diagnostic doit prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du site telles que les caractéristiques des substrats*, de la topographie, la qualité de l'eau, etc. Il doit également prendre en compte le contexte paysager (landes*, haies, cultures…) de la carrière afin notamment d'identifier son potentiel de colonisation par des espèces présentes dans les environs, et son potentiel d'insertion dans un réseau d'habitats* analogues.

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

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

Ainsi, s'appuyant sur le principe proposé par Luken (1990) selon lequel la connaissance des processus de successions* spontanées* peut fournir des bases à la manipulation des successions*, Prach *et al.* (1999) ont développé un système expert permettant de tenter des prédictions sur l'évolution des successions* dans les milieux transformés par l'homme (mines, carrières…). Sur les bases de quatre types d'informations : (1) localisation géographique, (2) nature du milieu (carrière de roche massive, bord de route…), (3) disponibilité en eau, (4) type de substrat* (sable, craie, rocher…), l'utilisateur peut obtenir des données prédictives sur le déroulement des successions*. La portée géographique de cet outil est restreinte à l'Europe centrale et il doit encore être amélioré. Cependant, c'est une approche prometteuse qui pourra à l'avenir donner des orientations utiles aux aménageurs et gestionnaires.

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

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

CHOIX DES OBJECTIFS ECOLOGIQUES DE LA REAFFECTATION

Le choix des objectifs ou trajectoires futures pour un écosystème* donné, peut se faire selon trois schémas correspondant à trois niveaux hiérarchiques : les espèces, les habitats* et le réseau d'habitats*. Ils sont présentés ci-dessous de façon indépendante pour des raisons de simplicité de présentation, mais ils sont dans la réalité fortement connectés et interagissent entre eux de nombreuses manières.

CREATION DES MILIEUX NECESSAIRES A CERTAINES ESPECES

Le premier niveau s'attache à fournir, à des espèces particulières, des conditions favorables à la réalisation d'une partie ou de la totalité de leur cycle de vie. Ce peut être par exemple, pour une espèce telle que le faucon pèlerin, la création de vires pouvant constituer des espaces de nidification, des reposoirs, etc. Il ne s'agit pas de créer tous azimuts des conditions favorables à l'accueil de l'ensemble de la faune et de la flore régionale mais de cibler des aménagements pour favoriser la présence d'espèces particulières qui, par exemple, ne trouvent plus les conditions de quiétude nécessaires à leur reproduction. On préférera à la création de sites fourre-tout sans identité fonctionnelle la recherche de systèmes écologiquement équilibrés. Ce type d'orientation doit être raisonné en s'appuyant sur une connaissance approfondie des espèces ciblées et de leur statut régional au risque d'obtenir le résultat contraire à celui qui était espéré (installation d'un couple de faucon puis abandon de la nichée pour cause de dérangement par exemple). Ces considérations vont à l'encontre de l'idée très répandue d'augmenter la diversité des milieux afin d'optimiser les capacités d'accueil pour la faune et la flore du site. Qu'une espèce s'installe est une chose, mais qu'elle trouve les ressources nécessaires qui lui permettront de s'y reproduire et éventuellement de participer à la constitution d'une population* en est une autre. Les carrières sont nécessairement de taille restreinte, et si les habitats* se complètent sur le plan fonctionnel (échanges de nutriments…), il faut qu'ils soient généralement d'une taille suffisante pour que des populations* s'y installent de façon viable.

LES HABITATS

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

LE RESEAU D'HABITATS

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

en compte. Nous avons en effet déjà vu plus haut dans le cadre du chapitre consacré à la biologie de la conservation (p 4), que les stratégies de maintien de la biodiversité doivent s'établir à une échelle régionale. Il s'agit de raisonner le choix des trajectoires des futurs écosystèmes* et habitats* en fonction de la distribution spatiale (surface, localisation) de ceux qui sont déjà en place à une échelle régionale. On pourra ainsi chercher à combler un vide ; par exemple, en l'absence dans un territoire de mares oligotrophes* favorables au maintien d'espèces pionnières* telles que les crapauds calamite (*Bufo calamita*) et accoucheur (*Alytes obstetricans*), la création de nouvelles mares en carrières pourra fournir des milieux de remplacement satisfaisants. D'un autre côté, cette approche à une échelle régionale peut éviter des erreurs telle que la création d'habitats* exotiques pour la région, totalement isolés de leurs analogues et inadaptés à un bon développement de la faune et de la flore locale.

DES OBJECTIFS MODULABLES

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

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

DES OBJECTIFS INTEGRES

Parallèlement à l'identification des potentialités écologiques d'un site et de leur traduction en objectifs écologiques, la consultation de l'ensemble des partenaires locaux (propriétaires du terrain, administrations, collectivités locales, associations…), la prise en considération de la réglementation (intégration paysagère, sécurité) et la prise en compte des contraintes techniques, doivent aboutir à une intégration complète de ces objectifs en objectifs de réaffectation. Cette étape de réflexion consiste à pondérer les objectifs écologiques établis sur des bases scientifiques pour les adapter aux réalités et contraintes du terrain. Elle ne cherche pas nécessairement à établir un compromis entre l'ensemble des intérêts portés par les différents partenaires qui, comme le témoigne Baudoit (1993) dans le cas d'une carrière sèche d'Ile-de-France, malgré les efforts considérables (financier, mode d'exploitation) de l'exploitant, a abouti à la réalisation d'aménagements "passe partout" entraînant une baisse considérable de la valeur biologique. En revanche, il s'agit d'effectuer des choix argumentés dont le financement, l'animation et la pérennisation seront garantis par l'engagement sous forme de conventions ou autres, des collectivités locales, professionnels, associations…

Cela peut aboutir à envisager des sites à usages combinés pouvant à la fois remplir des fonctions de conservation, pédagogiques, de loisir (promenade, pêche…)… dès lors que les aménagements et les opérations de gestion devant permettre leur réalisation sont raisonnés sur la base d'arguments objectivement établis.

Par ailleurs de nouveaux usages combinés à des objectifs de conservation doivent pouvoir encore être inventés. Ce pourrait être l'utilisation de remblais inertes (une fois garantie l'absence de diffusion de rejets polluants) pour combler totalement ou partiellement des cavités d'extraction…

AMENAGEMENT ET GESTION

En termes d'aménagement et de gestion, quatre grands types d'approches peuvent être envisagés :

- ne rien faire et laisser les processus naturels se dérouler sans intervention de gestion ;
- effectuer des aménagements appropriés puis laisser les processus naturels se dérouler sans intervention ;
- effectuer des aménagements appropriés et maintenir si nécessaire des opérations de gestion afin d'orienter la trajectoire des processus écologiques ;
- intégrer les aménagements aux modes d'exploitation et effectuer si nécessaire des opérations de gestion (Danais & Montfort, à paraître ; Sionneau, 1993).

À partir du moment ou ces approches correspondent à des objectifs clairement établis et qu'elles peuvent être remises en cause et modifiées, elles se justifient pleinement autant l'une que l'autre. Pour Frochot (1993) par exemple, il n'est pas forcément indispensable d'intervenir sur une carrière sèche de roche calcaire pour qu'elle présente un intérêt ornithologique. En l'absence de toute intervention spécialement orientée, la végétation envahit progressivement le site d'extraction, qui finit par se boiser. Les peuplements d'oiseaux évoluent en fonction de cette transformation. Ce type de peuplement, relativement diversifié et abondant mais banal, peut-être un objectif recherché. En revanche, si l'objectif retenu était de favoriser la présence d'orchidées particulières, une gestion active de la végétation par pâturage ou par fauche pourrait s'imposer. De même un événement imprévu (incendie…) peut entraîner une forte modification des propriétés écologiques du site et donc amener à réévaluer les objectifs recherchés et donc à réadapter l'approche plus ou moins interventionniste qui avait été initialement choisie. Enfin, il faut bien prendre conscience que plus les objectifs de réaffectation sont établis tôt, dès la mise en place du schéma d'exploitation de la carrière, plus il sera facile, efficace et moins coûteux d'effectuer des aménagements appropriés.

Enfin, concernant les techniques proprement dites "d'aménagement", nous conseillons au lecteur de se reporter au récent ouvrage édité par la DIREN Basse-Normandie "Principes et guides techniques pour une remise en état plus écologique des carrières de roches massives" (Montfort & Danais, à paraître). Cet ouvrage donne, pour chaque composante d'une carrière de roche massive (fronts de taille, carreau*…) et sous forme de fiches techniques, des principes d'aménagement à orientation écologique et pouvant être mis en œuvre dès l'établissement du phasage de l'exploitation.

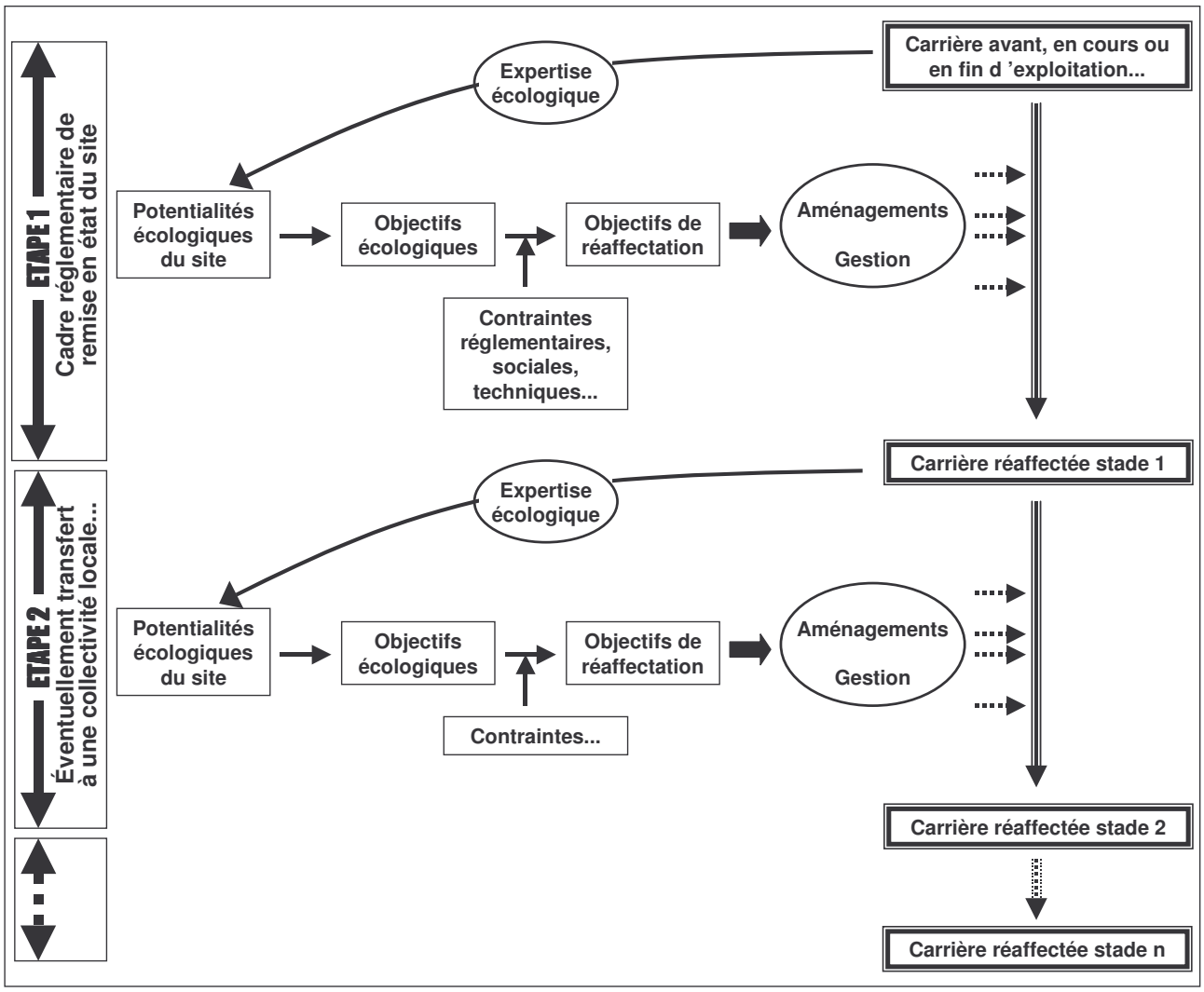
UN MODELE POUR LA REAFFECTATION ECOLOGIQUE DES CARRIERES

Pour terminer ce chapitre consacré à la réaffectation des carrières de roche éruptive, nous proposons un modèle de conduite d'un programme de réaffectation "idéal".

Ce modèle reprend successivement les différents éléments abordés dans les paragraphes précédents : l'expertise écologique, la définition des objectifs écologiques puis de réaffectation une fois intégrés dans le contexte local et réglementaire, et enfin les opérations d'aménagement et de gestion. Il met l'accent sur la nécessité de souplesse permettant la remise en cause des objectifs de réaffectation selon l'évolution des processus naturels (successions* écologiques,

perturbations*…). Il s'appuie également sur une procédure à long terme adaptée à l'échelle de temps des processus écologiques. Il faut noter que le pas de temps de réalisation des différentes étapes du programme n'est volontairement pas indiqué ; il doit d'une part être défini au cas par cas, et d'autre part pouvoir être modifié tout au long du programme (par exemple : annuel à son lancement, quinquennal par la suite…).

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



CONCLUSION

Dans le cadre d'une politique d'utilisation durable des ressources naturelles, il est nécessaire que la quantité d'espaces restaurés soit au moins égale à celle des espaces détruits (Cairns, 1998).

Dans le cas des sites industriels d'extraction de matériaux, il n'est pas envisageable, objectivement, de rétablir cet équilibre destruction – reconstruction en termes de surfaces. En revanche, il est possible de retrouver un nouvel équilibre sur un plan qualitatif : un espace dégradé qui à l'origine faisait partie d'un écosystème* "banal", pourrait, au prix d'interventions judicieusement choisies et grâce à un diagnostic mis en œuvre en amont, pendant et au terme de l'exploitation du site, devenir potentiellement de grand intérêt (écologique, scientifique, pédagogique…).

L'activité d'extraction de granulats dans le Massif armoricain crée des **ruptures** singulières dans les paysages permettant le déroulement de **processus écologiques originaux** tels que la colonisation de roches nues ; la carrière en tant que "**laboratoire**" donne ainsi l'occasion d'observer des processus aujourd'hui rares (dynamique de biocénoses pionnières…).

Dans ce contexte, à l'image des propos d'Aronson et Le Floc'h, (1996) au sujet du Conservatoire des Jardins et des Paysages, on pourrait imaginer la création d'un Observatoire et d'un Conservatoire des Carrières qui suivraient l'excellent exemple du Conservatoire du Littoral. Ces structures ne chercheraient pas seulement à promouvoir ou à protéger et conserver les sites de valeur patrimoniale, mais pourraient également, en liaison avec les professionnels, les administrations de tutelle, les associations… promouvoir des expérimentations qui permettraient de développer des outils d'évaluation et d'autres techniques pratiques pour réaffecter et réintégrer les sites d'extraction de matériaux.

Une telle perspective nécessite cependant, au préalable, de compléter notre connaissance du fonctionnement écologique des carrières de roche éruptive du Massif armoricain. Il est en effet nécessaire de combler certaines lacunes révélées par ce rapport.

La deuxième phase de ce programme, dite "de terrain", va donc être mise en œuvre. Il est envisagé dans un premier temps, de dresser une typologie des habitats naturels rencontrés en carrières et de mieux comprendre les relations existant entre les différents groupements végétaux (pelouses, landes…) et leurs conditions d'installation (âge, orientation, roche, substrat, humidité…). Cette étude portera sur un échantillon d'une soixantaine de sites d'extraction répartis sur l'ensemble du Massif armoricain. La sélection des sites portera principalement sur des carrières en activité, ce qui permettra de mieux comprendre les conditions d'installation et de développement de la végétation en association avec les modes d'extraction actuels. Cependant, un échantillon de sites anciennement exploités sera également étudié, dans le but de recueillir des informations sur la dynamique temporelle d'évolution de la végétation.

L'ensemble de ce travail devra apporter les éléments nécessaires à la réalisation, dans un deuxième temps, d'inventaires écologiques (faune, flore, sol…) approfondis sur une sélection réduite de carrières. Cette phase de terrain de ce programme sur les potentialités écologiques des carrières aboutira à 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.

BIBLIOGRAPHIE

Au total, 235 références sont présentées. Un certain nombre, non citées dans le texte, sont connexes au sujet.

Abbayes H. des, Claustres G., Corillion R., Dupont P., 1971. Flore et végétation du Massif armoricain. Tome 1, Flore vasculaire. Presses Universitaires de Bretagne. 1-1226.

AEE - Agence Européenne de l'Environnement, 1999. L'environnement à l'aube du XXIème siècle.

AFIE, 1993. Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993.

Allion Y., 1993. Etude de la recolonisation de la végétation calcicole après exploitation de carrières en région centre. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 55-70.

Ames M., 1993. Sequential sampling of surface-mined land to assess reclamation. J. Range Manage., 46 : 498-500.

Anderson, P., 1995. Ecological restoration and creation - a review. Biol. J. Lin. Soc., 56 (suppl. A) : 197-211.

Annezo N., Magnanon, S. & Malengreau, D., 1999. Bilan régional de la flore bretonne. Conservatoire Botanique National de Brest. 138 pp.

Armstrong K.N. & Nichols O.G., 2000. Long-term trends in avifaunal recolonisation of rheabilitated bauxite mines in the jarrah forest of south-xestern Australia. Forest Ecology And Management, 126 : 213-225.

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.

Arnold E.N., Burton J.A., 1978. Tous les reptiles et amphibiens d'Europe. Bordas.

Aronson J. & Le Floc'h E., 1996. Hierarchies and landscape history: dialoguing with Hobbs and Norton. Restoration Ecology, 4 : 327-333.

Aronson J. & Le Floc'h E., 1996. Que faire de tant de notions du paysage ? Natures-Sciences-Sociétés, 4 : 264-266.

Aronson J. & Le Floc'h E., 1996. Vital landscape attributes: missing tool for restoration ecology. Restoration Ecology, 4 : 377-387.

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 : 1-3.

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. & Pontanier R., 1993a. Restoration and Rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semiarid regions. 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 regions. II. Case studies from southern Tunisia, central Chile and nothern Cameroon. Restoration Ecology, 1 : 168-187.

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. J. Appl. Ecol., 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., 1980a. Inventaire des anciennes carrières de granulats – Département des Côtes du Nord. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats & DRAE Bretagne.

Barnaud G., 1980b. Inventaire des anciennes carrières de granulats – Département du Morbihan. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats & DRAE Bretagne.

Barnaud G., 1995. A l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration. Nature-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 pp.

Baudoit G., 1993. Inventaire botanique et ornithologique des carrières sèches de la boucle de Mousson. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 101-116.

Beebee T.J.C., 1983. The Natterjack toad. Oxford University Press.

Beebee T.J.C., Denton J.S. & Buckley J., 1996. Factors affecting population densities of adult Natterjack toads *Bufo calamita* in Britain. J. Appl. Ecol., 33 : 263-268.

Bell L.C., 2001. Establishment of native ecosystems after mining - Australian experience across diverse biogeographics 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.

Berube M.E. & Lavoie C., 2000. The natural revegetation of a vacuum-mined peatland: Eight years of monitoring. Can. Field Nat., 114 : 279-286.

Biggs J., Corfield A., Walker D., Whitfield M. & Williams P., 1994. New approaches to the management of ponds. British Wildlife, 5 : 273-287.

Bioret F. coord., 1994. Catalogue des espèces de la Directive Habitats présents en Bretagne. Préfecture Bretagne - DIREN Bretagne.

Blamey M. & Grey-Wilson C. 1991. La flore d'Europe occidentale. Arthaud.

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.

Bonnet E., Vilks A., Lenain J.F. & Petit D., 1997. Analyse temporelle et structurale de la relation Orthoptères - Végétation. Ecologie, 28 : 209-216.

Booth D.T., Gores J.K., Schuman G.E. & Olson R.A., 1999. Schrub densities on pre-1985 reclaimed mine lands in Wyoming. Restoration Ecology, 7 : 24-32.

Bouchet P., Falkner G. & Seddon M.B., 1999. Lists of protected land and freshwater molluscs in the Bern Convention and European Habitats Directive: are they relevant to conservation? Biological Conservation, 90 : 21-31.

Boulet L., 1996. Approche phytoécologique de la dynamique des végétations primaires dans les carrières de roches massives. Thèse de l'Université de Rennes 1.

Boulet L., 1999. Description synfloristique, synécologique et synsystématique de quelques pelouses acidiphiles remarquables des carrières sèches de la Basse-Normandie Armoricaine. E.R.I.C.A., 11 : 9-25.

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 : 427-432.

Bradshaw A.D., 1983. The reconstruction of ecosystems. J. Appl. Ecol., 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. & Chadwick M.J., 1980. The restoration of land: the ecology and reclamation of derelict and degraded land. Blackwell, Oxford.

Bradsshaw A.D. & Hüttl R.F., 2001. Future minesite restoration involves a broader approach Ecological Engineering, 17 : 87-90.

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 : 710-716.

Brown V.K. & Gange A.C., 1992. Secondary plant succession: how is it modified by insect herbivory? Vegetatio, 101 : 3-13.

Brunaud E., 1997. Dynamique de la recolonisation végétale des carrières sèches abandonnées. DESS "Espace rural et environnement",.

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 retoration. World Scientific, pp. 1-23.

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 pp.

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, pp. 161-178.

Chépeau C., 1981. Les anciennes carrières en Loire-Atlantique : inventaire, intérêt biologique, intérêt paysager.

Chinery M. 1988. Insectes d'Europe occidentale. Arthaud.

Choi Y.D. & Wali M.K., 1995. The rôle of Panicum virgatum (Switch grass) in the revegetation of iron-mine tailings in northern New York. Restoration Ecology, 3 : 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.

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.

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, pp. 229-241.

Coppin N.J. & Bradshaw A.D., 1982. Quarry reclamation. Mining Journals Book, London.

Cordoleani M. & Cordoleani C., 1979. Problématique des carrières face à leur environnement en région provencale. Thèse Univ. Aix Marseille III.

Corillion R., 1971. Notice détaillée des feuilles armoricaines. Phytogéographie et végétation du Massif armoricain. Carte de végétation de la France au 200 000e. CNRS, 197 pp.

Croix A. & Veillard J.Y., 2000. Dictionnaire du patrimoine breton. Apogée.

Cuenot E., 1993. La Chalandrue, réhabilitation écologique d'une carrière. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 145-147.

Cullen W.R., Wheather C.P. & Dunleavy P.J., 1998. Establishment of species-rich vegetation on reclaimed limestone quarry faces in Derbishire, 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 : 639-670.

Danais M. & Montfort D., Pour une remise en état plus écologique des carrières de roches massives : principes et guide technique. DIREN Basse-Normandie. A paraître.

Danton Ph. & Baffray M., 1995. Inventaire des plantes protégées en France. Nathan & AFCVE.

Davis B.N.K., 1982. Ecology of Quarries. Institut of Terrestrial Ecology, Cambridge.

Davis B.N.K., 1986. Colonization of newly created habitats by plants and animals. J. Environmental Management, 22 : 361-371.

de Foucault B., 1979. Observations sur la végatation 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., 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.

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.

Devaux A., 2001. Evolution de la qualité chimique des eaux acides de carrières au contact de terrils humides. Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers.

DIREN & Conseil Régional Bretagne, 1995. Curieux de Nature – Patrimoine naturel de Bretagne.

DIREN Bretagne, 1999. Atlas de l'environnement en Bretagne - Faits, chiffres et repères cartographiques.

Donnez D., 1995. Les études d'impact carrière. Ministère de l'environnement.

Dragovich D. & Patterson J., 1995. Condition of rehabilitated coal mines in the hunter valley, Australia. Land Degradation and Development, 6 : 29-39.

Dubois P.J., Le Maréchal P., Olioso G. & Yésou P., 2000. Inventaire des oiseaux de France – Avifaune de la France métropolitaine. Nathan.

Duhautois L., 1998. L'état des milieux et les territoires : Le patrimoine naturel. In: IFEN (Eds.), L'environnement en France. La Découverte, pp. 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, pp. 307-337.

Dupont P., 1990. Atlas partiel de la flore de France. M.N.H.N., Paris. 142 pp.

Dupont P., 1992. La végétation du site de l'ancienne carrière de Cheffois. Département de la Vendée - Groupe d'études des milieux naturels - Université de Nantes.

Dupont P., 2001. Atlas floristique de la Loire-Atlantique et de la Vendée – Etat et avenir d'un patrimoine. SSNOF. Siloë.

Duret J.L. & Chiffaut A.., 2000. Etude de la faune de la carrière de la Chalendrue Til Chatel (Côte d'Or) Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons. 27 pp.

Duval T., 1993. Stratégie et protection des pelouses calcaires. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 125-133.

ECCB (European Committe for the Conservation of Bryophytes)., 1995. Red Data Book of European Bryophytes.

Ecosphère, 2001. Carrières et zones humides – Le patrimoine écologique des zones humides issues des carrières. CNC-UNPG.

ENCEM, 1997. Expertise écologique de la carrière de Kerhoual - Commune de Plouay (Morbihan). 139 pp.

English Nature, Quarry products Association and Silica & Moulding Sands Association., 1999. Biodiversity and - Minerals - Extracting the benefits for wildlife. Entec UK Ltd.

EUR15, 1999. Manuel d'interprétation des habitats de l'union européenne. Comission Européenne DG Environnement, 132 pp.

Evangelou V.P., 2001. Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential fields application. Ecological Engineering, 17 : 165-178.

Felinks B., Pilarski M. & Wiegleb G., 1999. 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.

Folgarait P.J., 1998. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functionning: a review. Biodiversity and Conservation, 7 : 1221-1244.

Fouillet P., 1996. Les insectes de la Directive Habitats en Bretagne. Bilan des connaissances sur les espèces dans la région : Biologie, Ecologie, répartition et niveau de vulnérabilité. Préfecture Bretagne - DIREN Bretagne.

Frain 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. C.E.S.A. - G.R.P.E., Université de Tours, 94 pp.

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.

Franklin J.F., 1993. Preserving biodiverdity: species, ecosystems, or landscapes? Ecological Applications, 3 : 202-205.

Friday LE., 1987. The diversity of macroinvertebrate and macrophyte communities in ponds. Freshwater Biology, 18 : 87-104.

Frochot B., 1993. Intérêt ornithologique des carrières sèches, objèctifs et conditions de réaménagements. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 45-51.

Frochot B. & Godreau V., 1995. Intérêt écologique des carrières, terrils et mines. Natures-Sciences-Sociétés, Hors-Série : 66-76.

Frochot B., & collaborateurs., 2000. Intérêt écologique et implications économiques des réaménagements de carrières. Méthodes d'évaluation et étude des trajectoires et vitesse d'évolution. Université de Bourgogne. 57 pp.

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. & Heinkle 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.

Geist C. & Galatowitsch S.M., 1999. Reciprocal model for meeting ecological and human needs in restoration projects. Conservation Biology, 13 : 970-979.

Gray Park D.G., 1982. Plant dispersal and colonisation. In: ITE (Eds.), Quarries ecology. pp. 27-31.

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 phenomenan of biodiversity in conservation biodiversity in conservation biology. Ann. Zool. Fenn., 31 : 5-18.

Halle S., 1993. Wood mice (*Apodemus sylvaticus*) as pionneers 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 : 90-98.

Harris J.A., Birch P. & Palmer J., 1996. Land restoration and reclamation. Principles and practices. Addison Wesley Longman.

Harvey H.J., 1982. Discussion. In: ITE (Eds.), Quarries ecology. pp. 53-54.

Heckman J. & Cairns J., 1998. Ecosystem restoration: a new perspective for sustainable use of the planet. In: Rana B.C. (Eds.), Damaged ecosystems and retoration. World Scientific, pp. 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. In: ITE (Eds.), Quarries ecology. pp. 3-11.

Holl K.D. & Cairns J., 1994. Vegetational community development on reclaimed coal surface mines in Virginia. Bull. Torrey Bot. Club, 121 : 327-337.

Holl, K.D., 1995. Nectar resources and their influence on butterfly communities on reclaimed coal surface mines. Restoration Ecology, 3 : 76-85.

Humphrey C.L., Faith D.P. & Dostine P.L., 1995. Baseline requirements for assessment of mining impact using biological monitoring. Aus. J. Ecol., 1995 : 150-166.

Humphries R.N., 1979. Landscaping hard rock quarry faces. Landscape Design, 127 : 34-37.

Huxel G.R. & Hastings A., 1999. Habitat loss, fragmentation, and restoration. Restoration Ecology, 7 : 309-315.

Inventaire de la faune menacée de France (Livre rouge). WWF, MNHN, Nathan.

Ireland T.T., Wolters G.L. & Schemnitz S.D., 1994. Recolonization of wildlife on a coal strip-mine in northwestern new mexico. Southwestern Naturalist, 39 : 53-57.

Jacamon M., 1979. Guide de Dendrologie. ENGREF.

Jahns, H.M. & Masselink A.K., 1996. Guide des fougères mousses et lichens d'Europe. Delachaux et Niestlé.

Jefferson R.G., 1984. Quarries and wildlife conservation in the Yorkshire Wolds, England. Biological Conservation, 29 : 363-380.

Jochimsen M.E.A., 2001. Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil. Ecological Engineering, 17 : 187-198.

Jochimsen, M.E.A., 1996. Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession. Water, Air, & Soil Pollution, 91 : 99-108.

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.

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.

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.

Kryuchkov V.V., 1993. Extreme anthropogenic loads and the nothern ecosystem condition. Ecological Applications, 3 : 622-630.

Landres P.B., Verner J. & Thomas R.W., 1988. Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. Conservation Biology, 2 : 316-328.

Lanka V., Vit Z., Knotek J. & Knotek L., 1985. Reptiles et amphibiens. Gründ.

Le Floc'h E. & Aronson J., 1995. Ecologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. Natures-Sciences-Sociétés, Hors-Série : 29-35.

Lecointe A., 1993. Exemple d'un arrêté de biotope sur les anciennes carrières d'Orival (Creuilly-Calvados). In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 83-86.

Leduc J.P., 1979. Les carrières : potentiel de création et de reconquête des milieux naturels. Le Granulat, 14 : 1-12.

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. Et Comm., Coll. Ethnologie de la France, 5, Maisons des Sciences de l'Homme, 29-75.

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.

Lepart J. & Escarre J., 1983. Les successions végétales, mécanismes et modèles : analyse bibliographique. Bull. Ecologie, 14 : 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 ed 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 J. Plant Sciences, 48 : 91-95.

Luken J., 1990. Directing ecological succession. Chapman & Hall, 260 pp.

MacKay W.P., 1993. Succession of ant species (Hymenoptera: Formicidae)on low-level nuclear waste sites in northern New Mexico. Sociobiology, 23 : 1-11.

Majer J.D., 1989. Animals in primary succession - the role of fauna in reclaimed lands. Cambridge University Press, Cambridge.

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.

Mentis M.T., 1999. Diagnosis of the rehabilitation of opencast coal mines on the Highveld of South Africa. South African J. Science, 95 : 210-215.

Miao Z. & Marrs R., 2000. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi province, China. J. Environmental Management, 59 : 205-215.

Magnanon S. 1993. Liste rouge des espèces végétales rares et menacées du Massif armoricain. E.R.I.C.A., 4 : 1-22.

Michener W., 1997. Quantitavely evaluating restoration "experiments"… Restoration Ecology, 5 : 324-337.

Miles J. & Walton D.W.H., 1993. Primary succession on land. Blackwell Science. 309 pp.

Montfort D., 2001. Signalement de *Niphargus ladmiraulti* Chevreux 1901 à Mauves-Sur-Loire (Loire-Atlantique). Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France, 23 : 23-28.

Mooney H., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E. & Schulze E.D., 1996. What we have learning about the ecosystem functioning of biodiversity. In: Mooney H., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E. & Schulze E-D. (Eds.), Functional role of biodiversity - A global perspective. SCOPE 55. SCOPE-ICSU-UNEP. John Wiley&Sons, pp. 474-484.

Morhain E., 1993. La Chalandrue, réhabilitation d'une carrière. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 151-161.

Morhain E. 1992. Carrière de la Chalandrue (Til Chatel; Côte d'Or) : état initial de la faune et de la flore, propositions d'aménagement. Rapport DESS "Espace rural et environnement", Université de Bourgogne.

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, pp. 7-50.

Noss R.F., 1990. Indicator of monitoring biodiversity: a hierarchical approach. Conservation Biology, 4 : 355-364.

Odent B. & Lansiart M., 1999. Remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation. Min. de l'Aménagement du térritoire et de l'environnement.

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. In: ITE (Eds.), Quarries ecology. pp. 32-40.

Petit D., 1980. La végétation des terrils du nord de la France. Ecologie, phytosociologie, dynamisme. Thèse Doct. Etat, Univ. Sci. Tech. Lille., 250 pp.

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 pp.

Pickett S.T.A. & Parker V.T., 1994. Avoiding the old pittfalls: opportunities in a new discipline. Restoration Ecology, 2 : 75-79.

Potentialités écologiques des carrières. Min. du redéploiement industriel et du commerce extérieur, Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats & Ministère de l'environnement, 28 pp.

Prach K. & Pysek P., 1994. 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., 1999. Prediction of vegetation succession in human disturbed habitats using expert system. Restoration Ecology, 7 : 15-23.

Provost M., 1993. Atlas de répartition des plantes vasculaires de Basse-Normandie. Presse Univ. Caen, 90 pp.

Quélennec T., 1998. Le Grand Corbeau en Bretagne. SEPNB.

Quélennec T., 2001. Le Grand Corbeau Corvus corax en Bretagne. Alauda, 69 : 19-24.

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. J. Appl. Ecol., 34 : 1057-1069.

Repérages., 1997. Le paysage dans les projets de carrières - Guide méthodologique. DIREN Midi-Pyrénées.

Robert J.C., 1993. Proposition d'une écotypologie des carrières hors eau. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 17-24.

Rocamora G. 1993. Les zones importantes pour la conservation des oiseaux en France. Min. Env., LPO.

Rocamora G. & Yeatman-Berthelot D, 1999. Oiseaux menacés et à surveiller en France. Listes rouges et recherche de priorités. Populations. Tendances. Menaces. Conservation. Société d'Etudes Ornithologiques de France / Ligue pour la Protection des Oiseaux. Paris. 560 pp.

Rochefort L., 2000. New frontiers in briology 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. 63pp.

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.

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. extrait.

Serryn, P., 1977. Atlas universel. Bordas.

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, 2-4 : 263-267.

Sionneau J.M., 1987. Les potentialités écologiques des carrières. Industrie minérales, Mines et carrières, Avril : 2-10.

Sionneau J.M., 1993. Les potentialités écologiques des carrières sèches. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 27-34.

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 pp.

Skousen J.G., Johnson C.D. & Garbutt K., 1994. Natural revegetation of 15 abandoned mine land in west Virginia. J. Env. Quality, 23 : 1224-1230.

Snazell R. & Clarke R., 2000. The restoration of an area of restored chalk downland by spiders (Araneae) Ekological Bratislava, 19 Suppl. 3 : 263-271.

Steffan-Dewenter I. & Tscharntke T., 2001. Succession of bee communities on fallows. Ecography, 24 : 83-93.

Strong W.L., 2000. Vegetation development on reclaimed lands in the coal valley mine of western Alberta, Canada. Can. J. Bot., 78 : 110-118.

Thievent P., 1993. Un plan de carrière pour les abeilles : essai de typologie des carrières sèches à des fins de réaménagement apicole. In: AFIE (Eds.), Les pratiques du génie écologique - L'aménagement et la réhabilitation écologique des carrières sèches. Actes des journées techniques, 7-8 oct.1993, pp. 73-79.

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.

Tucker G.M., Heath M.F., 1994. Birds in Europe: their conservation status. BirdLife International. Cambridge. UK.

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.

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. J. Appl. Ecol., 34 : 289-303.

Usher M.B., 1979. Natural communities of plants and animals in disused quarries. J. Environmental Management, 8 : 223-236.

Usher M.B. & Jefferson R.G., 1990. The concepts of colonisation and succession: their role in nature reserve management. Biological Conservation, 48 : 153-159.

Van Andel J., Bakker, J.P. & Grootjans, A.P., 1993. Mechanisms and vegetation succession: a review of concepts and perspective. Acta Bot. Neerl., 42 : 413-433.

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 1. 43 pp.

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, pp. 33-53.

Ward S.C., Koch J.M. and 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. Groupement sabulicoles pionniers des carrières de la partie occidentale du nord de la France. Coll. Phytosoc. VI, Les pelouses sèches, Lille, 283-318.

Webb J.K. & Shine R., 2000. Paving the way for habitat restoration: can artificial rocks restore degraded habitats of endangered reptiles? Biological Conservation, 92 : 93-99.

Western D., 1992. The biodiversity crisis: a challenge for biology. Oikos, 63 : 29-38.

Wheater C.P., Cullen W.R. & Bell J.R., 2000. Spider communities as tools in monitoring reclaimed limestone quarry landforms. Landscape Ecology, 15 : 401-406.

Whisenant S.G., 1999. Repairing damaged wildlands. A process-orientated, landscape-scale approach. Cambridge University Press.

Wiegleb G. & Felinks B., 2001. 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. and 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.

LE TRAVAIL DE RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Le travail de recherche documentaire et de données d'inventaires a commencé en février 2001 pour s'achever en août de la même année. C'est un délai relativement court mais satisfaisant pour obtenir l'ensemble des sources au plan régional, national et international[19]. En revanche, il ne permet pas d'approfondir pleinement des sources documentaires connexes au sujet et pouvant apporter de précieux enseignements (recherche dans le domaine des mines…).

LES SOURCES EXPLOREES

Notre travail de recherche documentaire et de données d'inventaires a comporté différentes voies largement imbriquées les unes aux autres.

LES COURRIERS, LES E-MAILS…

Environ 350 courriers ont été adressés :

- à un certain nombre de scientifiques français et étrangers susceptibles d'être intéressés au sujet de l'écologie des carrières ; quelques réponses sous forme d'envoi de rapports et de tirés à part ou de conseils en terme d'orientation de la recherche bibliographique ont été obtenues, et suite à des relances téléphoniques, quelques rencontres avec des universitaires rennais ont pu se réaliser ;
- aux syndicats professionnels allemands, britanniques et suisses ; aucune réponse ;
- aux services gouvernementaux auxquels se rattachent l'industrie extractive de différents pays d'Europe et des autres continents (Australie, Canada…) ; les quelques réponses reçues étaient négatives.
- à toutes les DIREN (Directions Régionales de l'Environnement), DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement), DDE (Direction Départementale de l'Equipement), DDAF (Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt), Préfectures, Conseils Généraux et Régionaux des 4 régions et des 13 départements concernés par le Massif armoricain (voir p.16) ; la plupart des administrations ont répondu positivement en soulignant l'intérêt qu'elles portaient à cette étude, des rencontres avec les responsables des services concernés ont permis de préciser leurs attentes.
- à toutes les associations "environnementalistes" géographiquement implantées dans le Massif armoricain : Parcs Naturels Régionaux, Conservatoires Régionaux des Espaces Naturels… (185 courriers) ; cette voie de recherche fût la plus décevante car contrairement à notre attente elle ne nous a pas permis d'obtenir de données d'inventaires (à 3 exceptions près). En revanche elle a permis de mettre en place un réseau de partenaires potentiels pour des approches de terrain.

[19] Dans le cadre du programme "Carrières et zones humides", la recherche documentaire s'est déroulée sur une période de 15 mois, qualifiée par les auteurs de "délai un peu court" pour obtenir des sources satisfaisantes au plan international (Ecosphère, 2001).

LA RECHERCHE SUR SERVEURS TELEMATIQUES

Une recherche par mots-clés a été mise en œuvre sur différents serveurs télématiques : le serveur du CNRS (INIST) consultable via l'internet, les serveurs disponibles à l'Université de Rennes 1 (Pascal, Current Contents). La librairie en ligne du Natural History Book Service (NHBS) a également été consultée de la même façon que les services télématiques, ce qui a permis de lister les récents ouvrages du monde entier portant sur l'écologie de la restauration.

Le serveur Myriade-Thèse, qui recense toutes les thèses françaises, nous a permis de dresser une liste des Doctorats réalisés sur le thème des carrières.

LA RECHERCHE SUR L'INTERNET

Le recherche de documents sur l'internet n'a pas été très fructueuse. Elle a permis d'obtenir quelques articles de revues scientifiques en ligne, mais n'a pas permis d'obtenir de références fondamentales. Finalement, l'internet (à l'époque de cette recherche) a été coûteux en temps et n'a donné qu'un résultat médiocre.

LE TRAVAIL AVEC LA BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE NANTES

Après qu'une première liste de références a été établie, les documents qui ne pouvaient être obtenus directement auprès des auteurs ou à l'aide de l'internet ont été consultés via le service du Prêt Inter-Universitaire de la Bibliothèque de Nantes. Les photocopies des articles ont été achetées, alors que les thèses et ouvrages ont été prêtés par d'autres Universités ou par la bibliothèque du Muséum National d'Histoire Naturel à Paris et par la British Library.

LES SERVICES DE DOCUMENTATION

Des ouvrages français et non référencés par les bases télématiques et les articles scientifiques ont également pu être accessibles grâce aux services de documentation des DIREN.

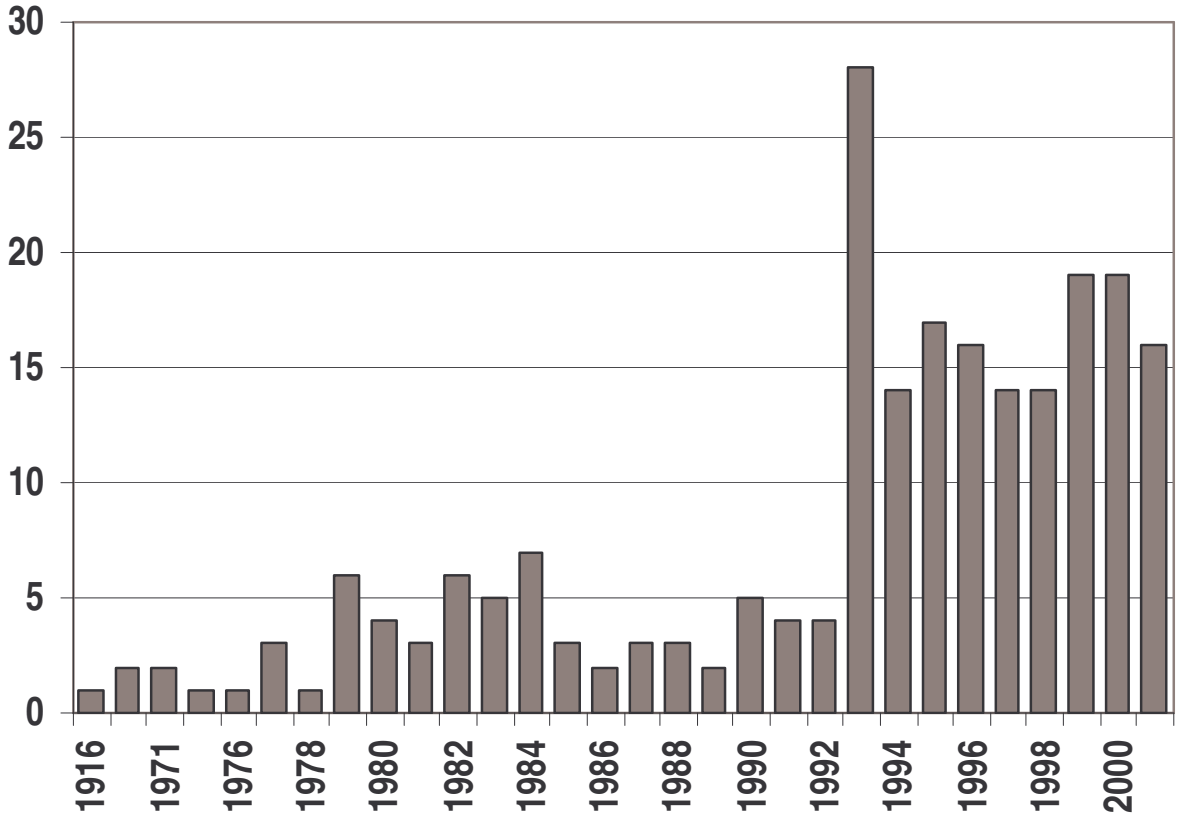
LES DOCUMENTS EXPLOITES

Compte tenu de la spécificité du sujet "carrière de roche massive acide" il a fallu élargir la recherche bibliographique aux domaines plus ou moins éloignés de l'écologie et de la restauration des mines de charbon, des carrières calcaire, des sites dégradés en général… et finalement 228 références de toutes natures sont présentées. Elles ne sont pas toutes citées dans le texte mais sont connexes au sujet.

Au bout du compte, les documents exploités ont des origines très diverses :

- quelques manuels généraux ;
- documents provenant d'universités ou d'organismes de recherches (articles, synthèses, colloques, symposium…) ;
- documents technico-scientifiques comme ceux par exemple des DIREN, du CEMAGREF ;
- documents professionnels ;
- documents naturalistes régionaux.

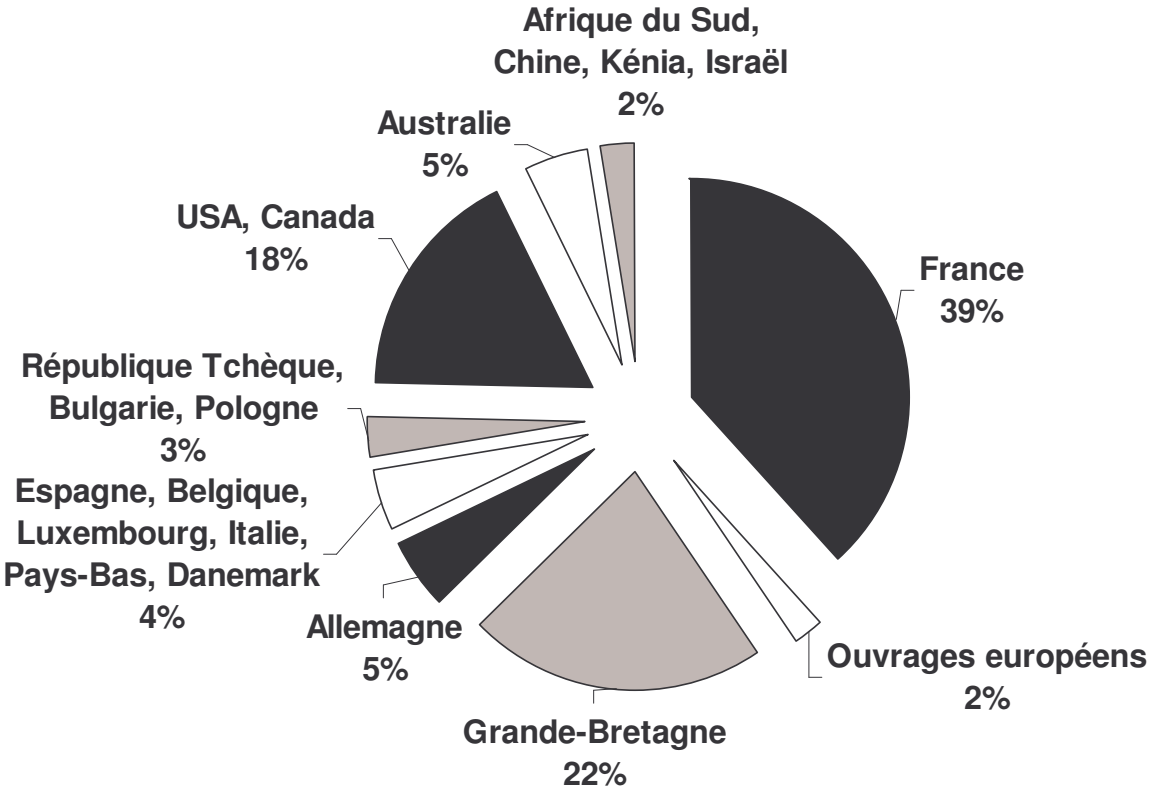
L'histogramme suivant présente **la répartition chronologique** des références. On constate que le nombre de références augmente pour les années les plus proches. L'essentiel des travaux portant sur les carrières et l'écologie de la restauration sont postérieurs à 1980. Les documents les plus anciens sont pour la plupart cités pour leur intérêt général ou historique.



Répartition chronologique des documents

Le diagramme suivant présente **la répartition géographique** des références. La proportion de références françaises occupe le premier rang. Ceci s'explique essentiellement par la facilité d'accès à la littérature "grise" française qu'il est difficile de se procurer dans les pays étrangers.

Les documents britanniques, anglo-saxons, australiens canadiens et américains sont bien représentés. Ceci tient au rôle que ces pays jouent dans la circulation mondiale de l'information du fait de l'universalité de la langue anglaise, qui assure une diffusion plus facile aux documents. Cependant, les britanniques, les allemands et les tchèques sont très avancés en matière d'écologie appliquée et c'est de leurs travaux que l'on peut tirer les enseignements les plus complets et exhaustifs.


Afrique du Sud,
Chine, Kénia, Israël
2%
Australie
5%
USA, Canada
18%
France
39%
République Tchèque,
Bulgarie, Pologne
3%
Espagne, Belgique,
Luxembourg, Italie,
Pays-Bas, Danemark
4%
Allemagne
5%
Ouvrages européens
2%
Grande-Bretagne
22%

GLOSSAIRE

Etabli d'après :

- Delpech R., Dumé G. & Galmiche P., 1985. Typologie des stations forestières – Vocabulaire. IDF.
- Encyclopedia Universalis – Dictionnaire de l'écologie, 2001. Albin Michel.
- Le Petit Robert - Dictionnaire de la langue française.
- Touffet J., 1982. Dictionnaire essentiel d'écologie. Ouest-France.

Accrue : Evénement dont l'occurrence se fait par vagues successives.

Acidiphile : 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.

Anémochore (plante) Plante dopnt les semences sont disséminées par le vent.

Annuelle (plante - espèce) : Plante dont la totalité du cycle de végétation dure moins d'un an et qui est donc invisible une partie de l'année.

Anthropique : Qualifie les phénomènes qui sont provoqués ou entretenus par l'action consciente ou inconsciente de l'homme.

Aulnaie : Bois d'aulnes ou riche en aulnes.

Avifaune : Ensemble des espèces d'oiseaux dan un espace donné.

Banquette Partie horizontale qui sépare deux fronts de taille*.

Bétulaie : Bois de bouleaux ou riche en bouleau.

Biocénose : Ensemble des organismes vivants occupants un biotope* donné ; une biocénose et son biotope* constituent un écosystème*.

Biogéographie : Etude de la répartition géographique des organismes vivants.

Biotope : Ensemble théorique des conditions physico-chimiques définissant un écosystème* donné.

Bryophytes : Groupe de végétaux cryptogames chlorophylliens comprenant les mousses, les hépatiques et les sphaignes.

Calcicole : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en calcium ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Carreau : Partie de carrière horizontale formée par l'avancée progressive des fronts de taille* (localisée en fond de fosse).

Climax : Etat d'un écosystème* (d'une succession*) ayant un stade d'équilibre relativement stable.

Cortège (floristique…) : ensemble des espèces (végétales…) d'une station*, d'un site, d'une région géographique, etc… suivant le contexte.

Diachronique (approche) : Qui consiste à suivre l'évolution de la végétation des carrières sur plusieurs années, voire décennies.

Ecologie (d'une espèce) : Rapports d'une espèce avec son milieu ; ensemble des conditions préférentielles de ce milieu dans lequel se rencontre cette espèce.

Ecologie (sens large) : Science étudiant les interactions qui déterminent la distribution et l'abondance des organismes vivants.

Ecosystème : Système ouvert défini approximativement dans l'espace et dans le temps et modélisant l'ensemble des relations des êtres vivants (biocénose*) entre eux et des êtres vivants avec l'environnement physico-chimique (biotope*) ; le concept est opérationnel à des échelles très variables (*e.g.* forêt tropicale, mare temporaire, souche en décomposition…).

Edaphique : Qui concerne les relations entre les êtres vivants et leur substrat* (sol principalement, vase, roche).

Eutrophe : Riche en éléments nutritifs, généralement non ou faiblement acide, et permettant une forte activité biologique.

Eutrophisation : Processus d'enrichissement excessif d'un sol ou d'une eau par apport, en quantité importante, de substances (azote surtout, phosphore, potassium, etc.) modifiant profondément la nature des biocénoses* et le fonctionnement des écosystèmes*.

Exhaure (eau d'exhaure) : Epuisement par pompage des eaux pluviales et souterraines.

Formation (végétale) : Type de végétation défini plus par sa physionomie que sa composition floristique (*e.g.* prairie*, roselière*, friche, lande*, etc…).

Fourré : Jeune peuplement forestier composé de brins de moins de 2,50 m de haut, dense et difficilement pénétrable.

Frênaie : Bois de frênes ou riche en frênes

Friche : Formation* végétale se développant spontanément sur un terrain perturbé puis abandonné.

Fronts de taille Parois verticales de la carrière, obtenues par abattage de la roche par explosif (tir de mines).

Gradin Partie de carrière constituée d'un front de taille* et de sa banquette*.

Granulométrie : Opération qui consiste à séparer les éléments minéraux suivant leur grosseur et à apprécier le pourcentage de chaque lot.

Groupement (végétal) : Ensemble des végétaux différents qui constituent une unité de végétation relativement homogène en colonisant un même milieu.
Syn. phytocénose.

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 plaine lumière (contraire de sciaphile*) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Hélophyte : Plante de vase dont les organes de renouvellement (rhizomes, etc.), se situent dans la vase (*e.g.* phragmite), et dont les organes végétatifs sont aériens et souvent dressés .

Herbacé(e) : Qui à la consistance souple et tendre de l'herbe ; on oppose en général les plantes herbacées aux plantes ligneuses*.

Hydrologie : Etude scientifique des eaux naturelles (nature, formation, propriétés physico-chimiques).

Hygrocline Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant en conditions assez humides ; 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.

Jonçaie : Formation* végétale sur sol humide, dominée par des joncs sociaux.

Lande : Formation* végétale caractérisée par la dominance d'arbrisseaux sociaux (*e.g.* lande à bruyères, lande à ajoncs…).

Ligneux(se) : Formé de bois ou ayant la consistance du bois ; on oppose généralement les espèces ligneuses (arbres, arbustes, arbrisseaux, sous-arbrisseaux) aux espèces herbacées*.

Lithophyte : Plante de lithosol*.

Lithosol : Sol minéral très peu évolué ou constamment rajeuni par l'érosion.

Marnage : Variation du niveau de l'eau (en général, phénomène intersaisonnier, mais parfois, artificiellement plus fréquent).

Merlon : Dépôt linéaire constitué de matériaux de découverte (terre végétale, roche altérée), généralement édifié dans un but de protection visuelle, auditive...

Mésoacidiphile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH modérément acides (sols et eaux) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Mésohygrophile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions hydriques intermédiaires entre mésophile* et hygrophile* ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

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.

Mésotrophe : Moyennement riche en éléments nutritifs, modérément acide et induisant une activité biologique moyenne.

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.

Mull : Type d'humus, qui se forme à partir de débris végétaux peu ligneux* et riches en azote et se décompose très rapidement en raison d'une intense activité biologique. Le mull acide à un pH compris entre 4 et 5.

Mycorhize(é) : Association symbiotique* du mycélium d'un champignon avec les racines de plantes supérieures (en particulier les arbres).

Neutroacidicline : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH moyennement acides à neutres (sols et eaux) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Neutrophile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes croissant préférentiellement en conditions stationnelles de pH voisin de la neutralité (ni acides, ni basiques) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

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.

Nodosité : Renflement sur la racine, qui contient des bactéries symbiotiques* fixatrices d'azote atmosphérique.

Oligotrophe : Très pauvre en éléments nutritifs et ne permettant qu'une activité biologique réduite.

Pédogenèse : Ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) qui régissent la formation et l'évolution des sols.

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 : Evènements imprévisibles pouvant avoir des origines diverses somme des événements climatiques exceptionnels (forte crues, sécheresse,…).

Phytosociologie(que) : 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.

Pionnier(ère) : Relatif à une espèce ou un ensemble d'espèces aptes à coloniser des terrains nus.

Podzol (podzolisation) : Type de sol dont l'évolution est provoquée par des processus chimiques (action d'acides organiques) qui s'ajoutent aux processus purement physique du lessivage. Ce sont des sols à humus acide et appauvri en argile.

Population : Ensemble des individus appartenant à la même espèce vivant généralement dans des conditions de milieu homogènes, dans une région donnée, à un moment donné.

Prairie : Formation* végétale herbacée*, fermée et dense, dominée par les graminées et faisant l'objet d'une gestion agricole par fauche ou pâturage.

Ranker : Sol acide formé de roche mère cristalline, le plus souvent sous climat humide ou montagnard.

Récolement : Vérification contradictoire entre l'exploitant et l'administration de l'exécution des clauses et conditions imposées (arrêté préfectoral d'autorisation), après l'exploitation d'un site.

Régalage : Consiste à étaler les matériaux (terre végétale…) de manière relativement régulière sur un espace donné.

Rias : Les rias sont des estuaires étroits et profonds.

Roselière : Peuplement dense de grandes plantes herbacées* (roseaux…) poussant dans des zones humides.

Rudéral(ale, aux) : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes caractéristiques de terrains fortement transformés par les activités humaines (décombres, jardins, friches industrielles, cultures…).

Rupestre : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant dans les rochers

Rupicole : Se dit d'un organisme se développant sur des parois et falaises.

Sabulicole : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant dans le sable.

Saprophage : Qualifie un organisme qui se nourrit de matières organiques en cours de décomposition (*e.g.* les champignons du sol).

Saxicole : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes se développant sur des rochers.

Sciaphile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes tolérant un ombrage important (contraire d'héliophile*) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Silicicole Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en silice (conditions stationnelles généralement acides) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Sous-solage Labour profond.

Spontané (espèce, végétation) : Qui croît à l'état sauvage dans le territoire considéré.

Station : 1- Etendue de terrain de superficie variable mais généralement modeste, où les conditions physiques et biologiques sont relativement homogènes.

2- Site ou se développe un organisme donné.

Stérile(s) : Matériaux minéraux non commercialisables.

Substrat Support sur lequel vit un organisme ou un groupement* d'organismes.

Succession : Remplacements successifs des groupements d'organismes au cours du temps en lieu donné qui constituent une série évolutive progressive ou régressive.

Symbiotique : Se dit d'une relation entre deux organismes dont chacun tire bénéfice.

Synchronique (approche) : Qui se fait par l'étude de plusieurs sites d'âge différents. La reconstitution de la végétation consiste à replacer les stades de végétation les uns après les autres en fonction de l'âge des sites.

Taxon : Unité quelconque de la classification des organismes vivants (classe, ordre, famille, genre, espèce, sous espèce,…).

Terres de découverte : Matériaux superficiels (terre végétale et roche altérée) recouvrant la roche saine.

Terril : Dépôt volumineux de matériaux stériles*.

Thermophile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes qui croît préférentiellement dans des sites chauds (et généralement ensoleillés) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Tourbière : Etendue marécageuse dont le sol est exclusivement composé de matière organique végétale non totalement décomposée (tourbe).

Vivace : Plante dont le cycle de végétation dure plus de deux années.

Xérique : Qualifie un milieu très sec.

Xérophile : Se dit d'un organisme ou d'un groupement* d'organismes s'accommodant de condition sèches permanentes ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

Zoochorie Mécanisme de dispersion des semences par les animaux.