

Recommandations pour un réaménagement forestier durable des carrières de granulats

Sylvie Vanpeene-Bruhier

Comment réhabiliter un site d'extraction de granulats en y implantant un couvert forestier viable ? Ce document propose des éléments de réponse, notamment à partir de l'analyse de cas concrets de réaménagement en conditions géologiques et topographiques variées. L'auteur consacre une partie importante de l'article aux précautions à prendre pour la reconstitution du sol, la qualité des plants forestiers choisis et des opérations de plantation.

En 2000, l'industrie du bâtiment et des travaux publics a utilisé 416 millions de tonnes de granulats. Ils provenaient pour 44 % de roches meubles, principalement des alluvions et des moraines, 52 % de roches massives qui sont alors concassées et pour 4 % de recyclage de schistes, laitiers de sidérurgie¹ et matériaux de démolition.

Cet article présente certains éléments d'une étude réalisée en 1999 et 2000 sur le réaménagement forestier des carrières de granulats. Il développe en particulier les besoins des arbres sur sols dégradés, la méthodologie appliquée dans l'étude et propose des recommandations concernant la reconstitution du sol et la qualité des plants forestiers à utiliser.

La synthèse s'est appuyée sur une analyse bibliographique assez large sur le reboisement et une évaluation d'expériences menées en carrière depuis 1976. Elle rappelle des éléments de physiologie des arbres et les conditions de production de plants forestiers en pépinières, afin d'en déduire les points clés à prendre en compte dans un réaménagement boisé. Il s'agit en particulier des différentes possibilités de reconstituer un support de croissance pour des arbres ou arbustes et des précautions à prendre en ce qui concerne les plants. L'accent est mis tout au long de cet article sur les cas les plus difficiles à reboiser de manière durable que sont les fronts de taille en zone méditerranéenne.

Depuis une vingtaine d'années, sous l'effet des réglemations successives (encadré 1, p. 38) le sol, après exploitation, retrouve fréquemment son usage antérieur grâce à un réaménagement adapté.

Pour les exploitations en fosse hors d'eau des matériaux alluvionnaires et de certaines roches massives, comme les calcaires de Brie, la principale voie du réaménagement est le retour à l'agriculture (Vanpeene-Bruhier et Delory, 2000). Cependant, le retour à la forêt par boisement à but de production sylvicole est également pratiqué sur de grandes surfaces. Certains sites en Île-de-France font l'objet de plantation de 5 à 6 ha par an pour un boisement final d'une quarantaine d'hectares. Les exploitations de talus morainiques sont souvent reboisées afin d'en assurer une intégration paysagère sans but réel de production de bois.

Les exploitations de roches massives en front de taille étaient, pendant de nombreuses années, uniquement mises en sécurité par purgeage du front de taille et clôture du site pour en éviter l'accès. Désormais, la réhabilitation du site doit être menée, et la seule possibilité est bien souvent le reboisement ou la végétalisation arbustive. Comme, bien souvent, les conditions d'exposition, de substrat et d'humidité sont très difficiles, il est nécessaire d'optimiser la reconstitution du sol, les plantations par le choix des espèces, le type et la qualité des plants et les moyens de lutte contre la concurrence herbacée afin d'obtenir un réaménagement durable.

1. Le laitier est un sous-produit élaboré lors des fusions métallurgiques, il est essentiellement composé de silicates.

Contact

Sylvie Vanpeene-Bruhier, Cemagref, UR Écosystèmes et paysages montagnards, 2, rue de la papeterie BP 76 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

Encadré 1

Le cadre réglementaire

Jusqu'en 1971, les carrières qui fermaient ne faisaient l'objet d'aucune prescription en matière de réaménagement. De nombreux réaménagements expérimentaux menés à partir de 1980 dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats avaient pour objet premier de résoudre les points noirs constitués par des carrières abandonnées en l'état durant cette période.

Les premières dispositions réglementaires demandant un remblaiement sans revégétalisation datent de 1971 (décret n° 71-792 du 20 septembre 1971). Mais de véritables projets avec revégétalisation sont imposés dans les dossiers de demande d'autorisation d'exploiter à partir de 1979 (décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979). Cependant, l'État ne dispose pas de moyens pour garantir, à l'issue de l'exploitation, la réalisation effective du réaménagement prévu.

En 1993, les carrières passent du régime du Code minier à celui des installations classées (loi n° 93-3 du 4 janvier 1993). Cette loi renforce les mesures en matière de réaménagement en particulier en instaurant le dépôt d'une garantie financière permettant d'assurer qu'à la fin de l'exploitation le budget prévu pour le réaménagement sera bien disponible. Cette mesure étalée dans le temps en fonction de la date d'ouverture de la carrière s'applique depuis le 14 juin 1999 à toutes les carrières (décret n° 96-18 du 5 janvier 1996, arrêté du 10 février 1998).

La loi de 1993 prévoit également la mise en place du schéma départemental des carrières. Cette concertation permet la prise en compte de l'ensemble des carrières du département, et non plus la réflexion au cas par cas, aussi bien pour l'autorisation d'ouverture que pour le choix des projets de réaménagement.

2. Cette taxe perçue sous différentes formes entre 1974 et 1986 avait financé, entre autres, des expérimentations sur différentes possibilités de réaménagement.

3. Les pores les plus grossiers d'un sol, de diamètre supérieur à 0,03 mm, permettent l'aération du sol et l'infiltration rapide en profondeur de l'eau de pluie. Ils doivent représenter 10 à 15% en volume du sol. Les pores moyens, de diamètre compris entre 0,002 mm et 0,3 mm, emmagasinent l'eau que les plantes pourront utiliser et contribuent à constituer la réserve utile en eau. Les pores fins, de diamètre inférieur à 0,002 mm stockent de l'eau inaccessible aux plantes.

Le Cemagref a mis en place et suivi dans les années 1980 plusieurs réaménagements de carrières de roches massives dans l'Est et le Sud de la France ; ces essais ont été financés dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats². En 2000, sur ces mêmes financements, l'établissement a rédigé une synthèse (Vanpeene-Bruhier, 2000) sur le réaménagement forestier de carrières de granulats à la demande de l'Union nationale des producteurs de granulats (UNPG). Cette étude a porté sur des exploitations de roches meubles, mais aussi de roches massives. En outre, de nouvelles expérimentations en végétalisation herbacée menées par le Cemagref (Dinger et Crosaz, 2002) sont mises en place en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, en partenariat avec un carrier, pour évaluer les possibilités d'utilisation de compost en reconstitution de sol.

Les besoins des arbres en réaménagement de carrière : synthèse bibliographique

L'analyse bibliographique a porté sur des articles scientifiques, des guides techniques, des rapports d'étude, des articles de vulgarisation dans le domaine du réaménagement forestier de carrière, mais aussi de la revégétalisation de sols dégradés ou de sites de décharges, de la biologie des sols et de la sylviculture. Au total 130 documents ont été étudiés en provenance pour 40 % de France, 18 % de Grande-Bretagne et 22 % d'Amérique du Nord.

Cette étape a permis de rappeler les particularités des sols forestiers et les besoins des arbres et de s'apercevoir qu'ils n'étaient pas suffisamment con-

nus et pris en compte par les exploitants de granulats. Nous en reprendrons donc ici les principaux aspects.

Le point fondamental dans la réussite des boisements est, bien évidemment, le choix d'une essence adaptée aux conditions de sol et de climat, les essences forestières ayant des exigences et des tolérances très différentes en ce qui concerne l'alimentation en eau, les besoins en lumière, la résistance aux gelées... Cependant, l'autécologie des arbres étant un sujet très vaste, nous ne traiterons pas ce point dans cet article.

La nécessité d'un sol profond pour une alimentation en eau des arbres

Les particularités d'un sol forestier sont liées :

– à l'absence de travail du sol, d'où l'importance de la texture notamment dans le maintien d'une bonne porosité ;

– à l'importance du cycle biochimique des éléments minéraux d'où un taux élevé de matière organique dans le sol et la nécessité d'une activité biologique intense.

Le principal facteur limitant la productivité des sols forestiers est leur réserve utile en eau ; c'est-à-dire la quantité d'eau potentielle que les horizons du sol, accessibles aux racines, peuvent stocker. Cette réserve permet d'alimenter en eau les arbres pendant leur croissance d'avril à septembre. Elle dépend à la fois de la profondeur prospectable par les racines, de la texture du sol, de sa porosité³ et de sa teneur en cailloux. Ceci est particulièrement vrai pour les

plantations sur banquettes, où la profondeur de sol accessible par les racines est insuffisante (inférieure à 1 m). En effet, un sol moins profond permet l'installation des plants et le début de leur croissance, mais leur mortalité surviendra 5, 10 ou 20 ans plus tard, selon la profondeur de sol que les racines auront pu exploiter. La limitation du sol utilisable par les racines peut être due à une barrière physique (rocher non fissuré, zone fortement compactée) ou hydrique (couche d'eau stagnante au-dessus d'un niveau compacté ou imperméable).

Une activité biologique du sol intense

La litière⁴ qui tombe au sol est dégradée en un à deux ans dans les sols forestiers fertiles par de nombreux organismes du sol. La faune du sol a une masse estimée à 1 t/ha, la flore du sol regroupant champignons ou bactéries est estimée à 0,3 t/ha (Fischesser et Dupuis-Tate, 1996). Ces organismes libres assurent la dégradation de la litière, sa transformation en humus puis sa minéralisation afin de rendre les éléments disponibles pour les plantes. En outre, la plupart des arbres constituent des associations avec des champignons ou des bactéries. Ces associations réalisées au niveau des racines sont appelées symbioses ; elles sont indispensables à la croissance de l'arbre.

Les symbioses mycorhiziennes, entre les racines de l'arbre et un champignon, augmentent la surface d'absorption des racines, le volume de sol prospecté et l'efficacité des mécanismes d'absorption des minéraux dissous dans le sol. Dans des sols pauvres, elles sont indispensables à la survie de l'arbre. Par contre, en cas d'apport fertilisant, elles disparaissent. Ce point est très important pour les conditions d'élevage de plants forestiers en pépinière, nous y reviendrons.

Les symbioses fixatrices d'azote se constituent de manière spécifique entre une famille d'arbres et un genre de bactérie. En zone tempérée, il existe de telles symbioses entre les légumineuses et les bactéries de la famille des *Rhizobium* et entre des plantes ligneuses de plusieurs familles (dont le plus connu est l'aulne) et des bactéries filamenteuses du genre *Frankia*. Dans ces deux cas, la réalisation de l'association entre la bactérie et l'arbre permet à celui-ci de se développer dans un sol pauvre en azote.

Une aération et une alimentation en eau suffisante

Les arbres et leurs organismes symbiotiques souffrent tout autant d'un excès que d'un manque d'eau.

L'excès d'eau agit en asphyxiant les racines. Celles-ci ne peuvent absorber que de l'oxygène gazeux⁵ présent dans les pores du sol. Si les pores sont envahis par de l'eau, la respiration des racines et de leurs mycorhizes s'arrête. Ainsi, la plupart des espèces forestières ne résistent pas à une immersion durant quelques semaines en période de végétation, d'avril à septembre.

La masse de feuillage des arbres entraîne une évapotranspiration importante qui doit être compensée par une alimentation en eau suffisante. En outre, le feuillage constitue un piège pour la pluie dont une part s'évapore avant d'avoir rejoint le sol. Les arbres souffrent donc fréquemment de déficit hydrique estival, surtout si le climat est caractérisé par une pluviosité irrégulière. Ainsi, de forts orages en été ne permettent pas, sous des arbres, la reconstitution des réserves du sol⁶.

L'eau disponible pour l'arbre dépend de la capacité du sol à la stocker (réserve utile), à reconstituer cette réserve lors de pluies (infiltration de l'eau dans le sol à favoriser) et surtout des autres plantes qui utiliseront ce stock d'eau (concurrence herbacée). La présence d'un tapis herbacé provoque, en région méditerranéenne particulièrement, des mortalités importantes de plants ou des diminutions drastiques de croissance (Dobson et Moffat, 1993). La suppression des plantes herbacées dans un rayon de 0,5 m autour du plant pendant les premières années augmente fortement les chances de survie et la croissance du plant (encadré 2, p. 40). Au-delà de cinq ans, l'arbre, s'il a été installé dans de bonnes conditions, est capable de résister à la concurrence du tapis herbacé. Cependant, dans certaines situations, des colonisations par des essences arbustives (ronces, ajonc, genêt...) ou arborées locales d'arbres (saules, peupliers...) peuvent concurrencer très fortement les plantations.

Cette phase de bibliographie a été complétée par l'analyse de dossiers de suivi d'expérimentations menées entre 1976 et 1986 dans le cadre d'opérations financées par la taxe parafiscale sur les granulats.

Le protocole de l'étude de terrain

Cette étape d'analyse de cas concrets de réaménagements a permis de mettre en évidence les points les moins bien traités lors des réaménagements de carrières menés depuis une quinzaine d'années.

L'examen d'une quarantaine de dossiers d'expérimentation a permis de proposer des sites té-

4. C'est-à-dire tout ce qui tombe au sol (écaillés de bourgeons, feuilles, fleurs, graines, brindilles, morceaux d'écorce, bois mort...) représente en forêt tempérée 3 à 5 t/ha/an (Fischesser et Dupuis-Tate, 1996).

5. Seuls les peupliers sont capables, temporairement, d'absorber de l'oxygène dissous dans l'eau. Ceci explique leur meilleure résistance à la submersion du sol.

6. Il est possible de prévoir des aménagements du sens de plantation ou de la topographie du terrain pour améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol (Vanpeene-Bruhier, 2000).

Encadré 2

Les moyens de lutte contre la concurrence herbacée

Pour les plantations de plants en conteneur à faible densité, la lutte contre la concurrence herbacée, les deux à trois premières années, est fondamentale sur une surface d'un mètre carré autour du plant. Or dans la plupart des sites, et encore plus en exploitation en front de taille, il est difficile et trop coûteux de procéder à des désherbages autour des plants. Dans ces conditions, il faut empêcher la germination des herbacées par des barrières physiques. Il peut s'agir de dispositifs individuels ou en plein, sur toute la bande de plantation. Le surcoût engendré par ces dispositifs est largement compensé par l'amélioration du taux de reprise et la rapidité de croissance des jeunes arbres.

Un dispositif individuel recouvre le sol autour du collet du plant. Cette dalle (liège, fibre de bois) limite l'évapotranspiration et empêche la pousse d'espèces herbacées à proximité directe du plant. Sur certains sites, l'utilisation de ces dalles dans les secteurs les plus défavorables du point de vue humidité (haut de pente) permet des taux de reprise de 90 à 95 %.

Dans le cas des dispositifs en plein, toute la bande de plantation est recouverte d'un paillage qui sera percé pour y disposer les plants.

Le paillage plastique (film de polyéthylène noir) empêche le développement des herbacées et limite l'évapotranspiration. Cependant, il engendre différents inconvénients, non négligeables, sur des banquettes en zone méditerranéenne et principalement un risque d'échauffement du sol, de pullulation d'insectes ou de rongeurs au collet du plant. Il est à déconseiller pour le réaménagement de banquettes.

Les mulchs, couches d'une dizaine de centimètres d'écorces, copeaux ou de plaquettes issues d'élagage, installés après plantation limitent l'évapotranspiration et la concurrence herbacée. Ils peuvent être utilisés sur les banquettes.

7. La plupart des protocoles expérimentaux mis en place prévoyaient un suivi pendant 2 à 4 ans.

8. Les grandes carrières en alluvionnaire reboisées pour la production sylvicole font généralement appel à un gestionnaire du boisement (convention avec l'ONF ou ingénieur forestier).

9. Il s'agissait de connaître la période de plantation, le type d'engins utilisés pour la préparation du sol, le type de plants, le mode de plantation, les densités de plantation...

moins représentatifs, dont la sélection a porté sur :

- l'intérêt scientifique de l'expérimentation ;
- la représentativité géographique, du type d'exploitation et de nature de roche ;
- l'existence de rapports de suivi de l'expérimentation suffisamment précis ;
- la possibilité de reprendre contact avec le carrier.

Le comité de pilotage de l'étude a retenu dans cette sélection quinze carrières réparties en Alsace, Franche-Comté, Île-de-France, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Rhône-Alpes. Les carrières de roches massives exploitées en front de taille sont situées en région PACA, Franche-Comté et Rhône-Alpes.

Les quinze sites ont fait l'objet :

- d'une analyse détaillée du dossier d'expérimentation afin d'en connaître les spécificités et les résultats obtenus à court terme⁷ ;
- d'une visite de terrain entre juillet et août 1999 afin d'évaluer l'état actuel du reboisement, de mesurer les hauteurs de peuplement et de photographier des exemples intéressants, d'effectuer des relevés de végétation pour évaluer la richesse herbacée sous les arbres ;
- d'entretiens avec le carrier et avec l'éventuel gestionnaire du boisement⁸ afin de connaître avec le plus de précision possible les conditions du réa-

ménagement⁹ et les opérations d'entretien de la plantation ayant eu lieu depuis. Les questions lors de l'entretien portaient sur les moyens de lutte contre la concurrence herbacée, la protection des plantations contre le gibier, la pratique d'arrosage, de fertilisation, la date et la fréquence d'opérations sylvicoles telles le dépressage afin de supprimer des jeunes arbres en surnombre, la taille de formation, les élagages...

Les limites du protocole d'étude

Dans le cas des parcelles à vraie vocation sylvicole, il a été facile de connaître auprès du gestionnaire le calendrier des opérations effectuées et d'en tirer des enseignements (Vanpeene-Bruhier, 2000). Par contre, dans les exploitations en front de taille, il a bien souvent été difficile de connaître les opérations d'entretien de la plantation : protection contre le gibier, arrosage, fertilisation... Dans certains cas, les banquettes ne peuvent plus être entretenues parce qu'elles ne sont plus accessibles. Dans ces situations, le bilan n'a pu être qu'un constat visuel de l'impact de la végétalisation des banquettes et du masquage du front de taille. Ces difficultés constatées viennent, pour une part, des conditions extrêmement difficiles du site à réaménager, mais aussi, des exigences physiologiques des arbres.

Les résultats généraux de l'étude

Cette étude menée à la fois sur les réaménagements forestiers en roche meuble (exploitation en fosse

ou de talus morainique) et en roche massive (exploitation en front de taille mais aussi parfois en fosse), montre des résultats contrastés.

En effet, des réalisations très réussies sont possibles dans les carrières en alluvionnaire avec la constitution dans la vallée de la Seine, par exemple, de véritables parcelles boisées permettant une réelle exploitation sylvicole. Quand des échecs de plantation ont eu lieu, ils sont souvent dus à une inondation de la parcelle en raison de la mauvaise estimation de la fluctuation de la nappe. La dégradation de plantation par des attaques de gibier, lapins ou chevreuils, a également été constatée dans des contextes locaux particuliers.

D'autres boisements sur des talus morainiques sont également une réussite du point de vue paysager. Leur aspect fait oublier qu'une exploitation de granulats y a eu lieu.

Quelques fronts de taille en exposition ombragée peuvent être bien intégrés. Cependant, vu les conditions pédologiques et climatiques très difficiles, la plupart des plantations effectuées sur les banquettes issues d'exploitation en front de taille de roche massive ne donnent que rarement des arbres qui se développent de manière durable. Souvent le faible développement des arbres accentue encore le côté artificiel des banquettes.

Les données recueillies dans la bibliographie ont été confrontées aux pratiques constatées par l'enquête de terrain. Ceci permet de mettre en avant les points fondamentaux à respecter pour assurer un réaménagement forestier durable.

Recommandations générales

Précautions pour la reconstitution du sol

RECONSTITUER LE SOL HORS D'EAU POUR LES CARRIÈRES ALLUVIONNAIRES

Pour les carrières en fond de fouille, il est primordial que le bas de la couche de sol prospectable par les racines soit au moins 1 m au-dessus du niveau de la crue décennale. Plusieurs échecs de reboisement en Alsace ont montré que les fluctuations de nappe phréatique pouvaient être importantes, de longue durée et répétées (figure 1, p. 42) ce qui provoque la mortalité des plants. Si la plupart des essences ne résistent pas à une inondation survenant en période de végétation, un risque d'inondation hivernal peut être géré en choisissant

certaines essences tolérantes. L'autre point est de respecter les règles de manipulation des sols secs décrites dans le cas du réaménagement agricole des carrières de granulats (Vanpeene-Bruhier et Delory, 2000), afin de ne pas compacter le sol. Les compactations engendrent entre autres, des imperméabilisations et la création de zones de mouillères.

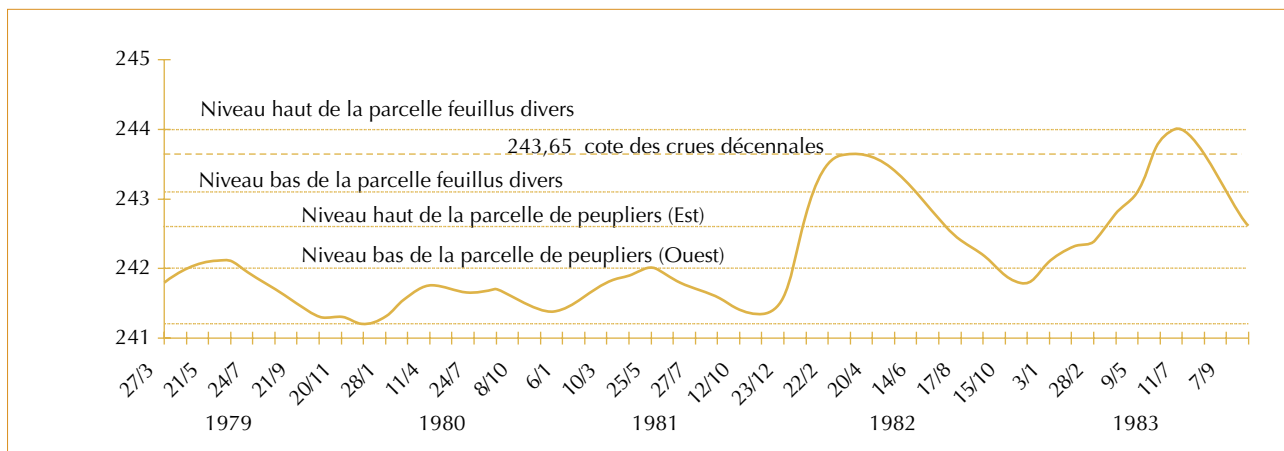
AMÉLIORER LA TOPOGRAPHIE DES FRONTS DE TAILLE

Lors de réaménagements de fronts de taille, ce n'est pas la remontée des eaux qui pose problème, mais le manque d'eau et la faible profondeur de sol prospectable disponible pour les plants. Les conditions d'exploitation doivent intégrer très en amont les contraintes de la végétalisation future afin d'essayer de créer des conditions d'épaisseur de terre suffisante, des conditions d'exposition les moins défavorables possible et une largeur de banquette importante. De cette manière, si la largeur de banquette est supérieure à la hauteur du gradin la dominant, il est possible de taluter le front de taille sous forme d'éboulis plus facilement reboisables en cassant la linéarité du front de taille (photo 1). Des contre-pentes peuvent être créées sur les banquettes (devers amont de 2 à 4 %) ; les plants doivent être placés au centre de petites cuvettes afin d'assurer au mieux l'infiltration de l'eau de pluie. En effet, en région méditerranéenne, plusieurs exemples montrent l'importance de micro-expositions protégées qui favorisent la croissance des plants. Ainsi, la photo 2 (p. 42) présente des cèdres plantés depuis huit ans sur une banquette en exposition sud-est protégée du vent par le front de taille et bénéficiant d'ombre l'après-midi. Ces cèdres mesurent actuellement 4 m. Du même âge, les cèdres de la photo 3 (p. 42) sont plantés dans les mêmes conditions de sol sur une partie de la même banquette mais exposés plein sud et au mistral. Ils sont nanifiés et mesurent 0,6 m.

Photo – J. Delory (Cemagref)



Photo 1 – Préparation d'un front de taille par talutage des banquettes, afin de diminuer l'effet d'escalier du front de taille, d'augmenter l'épaisseur de stériles par endroit, et de créer des micro-expositions favorables.

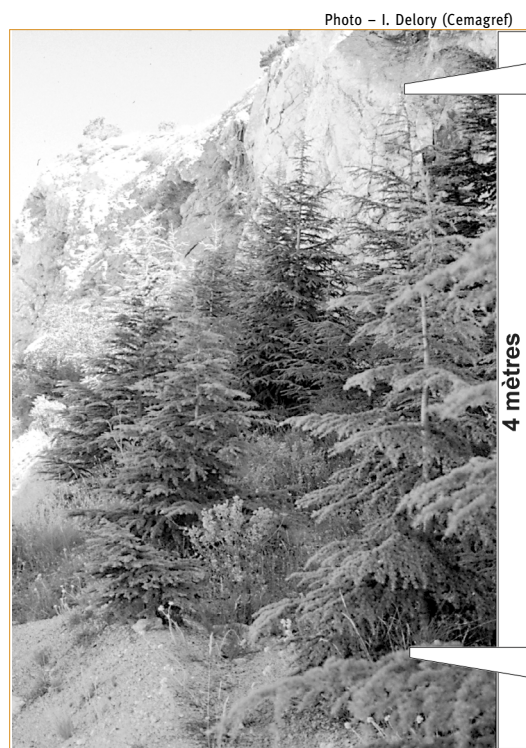


▲ Figure 1 – Batta-ments de la nappe d'eau entre 1979 et 1983 dans une carrière alluvionnaire d'Alsace.

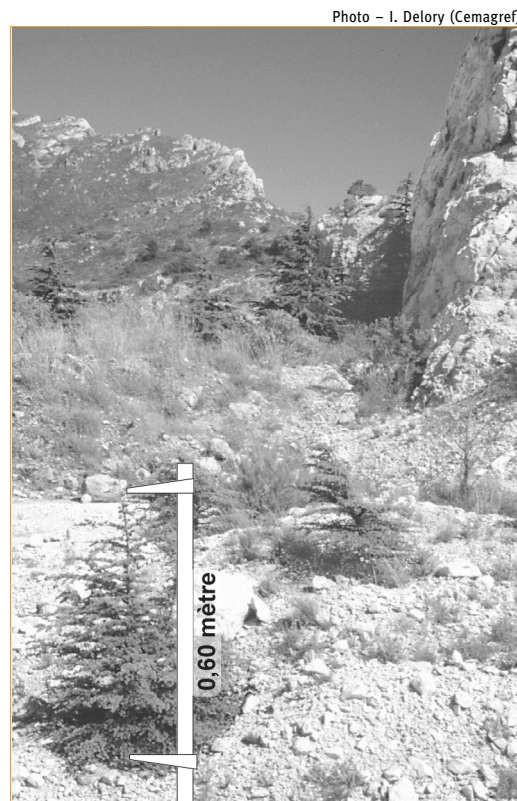
RECONSTITUER UNE ÉPAISSEUR DE SOL SUFFISANTE

Trop souvent le bilan des expériences passées nous montre que des plants ont été mis en place sur des banquettes de roche massive recouvertes de seulement 0,5 à 0,8 m de sol meuble. Dans ces conditions, les plants peuvent se développer tant que leurs racines explorent le sol meuble, et ils dépérissent brusquement dès que les racines atteignent la zone non fissurée. Il est préférable de mettre en

place entre 1 m et 1,5 m de sol meuble qui peut être constitué pour une bonne part par des stériles d'exploitation. En effet, en zone originellement de garrigue des régions méditerranéennes, il n'y a généralement qu'une mince couche de terre végétale ; celle-ci ne peut pas suffire pour reconstituer le sol. Il est donc indispensable d'utiliser les stériles



▲ Photo 2 – Plants de cèdres de 8 ans en exposition sud-est (ombragée et protégée du mistral) en région PACA.



▲ Photo 3 – Plants de cèdres de 8 ans sur la même banquette, mais en exposition sud (plein soleil et exposée au mistral).

Photo – I. Delory (Cemagref)

Photo – I. Delory (Cemagref)

d'exploitation¹⁰ et aussi quand elles existent les fines de décantation¹¹, matériau limoneux issu de la décantation dans un bassin, des eaux de lavage des granulats.

L'absence fréquente de terre végétale suffisante pour la reconstitution d'un horizon organo-minéral a conduit à rechercher des possibilités d'apporter de la matière organique à des stériles ou sols minéraux afin d'assurer une amélioration de la fertilité. C'est pourquoi, des apports de compost avaient été testés dans l'Est de la France lors d'expérimentations financées par la taxe parafiscale. L'apport de compost, enrichissant le sol en matière organique, a plus favorisé le développement d'espèces indésirables telles ronces, espèces herbacées rudérales que celui des plants mis en place (Ferrez et Weidmann, 1997). La concurrence pour l'eau, mais aussi pour l'espace et la lumière, a provoqué la mortalité des plantations en raison de l'impossibilité de d'accéder ensuite à la banquette pour entretenir les plantations. En région méditerranéenne quelques essais avaient été faits en sol forestier ou en carrière, leurs conclusions montrent que l'apport de compost exacerbe les conditions climatiques extrêmes. En année sèche, l'apport de matière organique peut avoir un impact négatif sur la survie des plants, mais il a un effet positif sur la croissance des plants survivants (Cemagref, 1983).

Cependant, les connaissances acquises ces dernières années dans l'utilisation des amendements organiques dans des conditions de végétalisation difficiles (Dinger, 1997 ; Ademe et Cemagref, 1999) permettent de mieux connaître leurs conditions optimales d'utilisation. C'est pourquoi, de nouveaux essais de végétalisation avec des espèces herbacées en reconstituant un sol à partir de compost et stériles en carrière débutent au Cemagref afin de préciser les préconisations adaptées à la zone méditerranéenne (dose, mode d'incorporation, qualité du compost à utiliser, période d'utilisation...). Ces travaux visent à mieux connaître les conditions de reconstitution d'un écosystème herbacé, premier stade de l'évolution dynamique de la végétation, et d'évaluer par la suite, la dynamique de retour des espèces arbustives présentes dans la garrigue tout autour du site. En effet, dans l'optique d'une végétalisation durable de banquettes inaccessibles après la phase de restauration, il est parfois plus judicieux d'installer une couverture herbacée et de laisser ensuite la colonisation ligneuse se faire (encadré 3, p. 44).

Photo – J.-C. Cleyet-Marel



◀ Photo 4 – Végétalisation mixte, légumineuses arborescentes inoculées par des bactéries fixatrices d'azote et plants forestiers, sur stériles bruts en zone méditerranéenne.

RECONSTITUER UN SOL OU PLANTER SUR STÉRILES ?

En conditions extrêmes du milieu (déficit hydrique, forte évapotranspiration, vent, exposition au soleil...) les reconstitutions de sol telles que décrites précédemment, n'ont jusqu'à présent pas permis une installation de végétaux à survie et croissance durables. Dans ces cas particuliers, une alternative à la reconstitution d'un sol suffisamment fertile est la plantation sur stériles de plantes capables de se développer et de prospérer sur un substrat brut, espèces fixatrices d'azote et plants mycorhizés.

Les espèces fixatrices d'azote (légumineuses ou aulnes) permettent de constituer à terme, un horizon enrichi en azote et en matière organique. Cette possibilité est utilisée en Grande-Bretagne (Moffat et Mac Neill, 1994) sous forme d'association entre légumineuses inoculées (pour une meilleure efficacité de leur fixation en azote) et plants forestiers. Les légumineuses sont installées suffisamment loin des plants ou en interbande de plantation afin de ne pas induire une concurrence pour l'eau. En France, en zone méditerranéenne, des essais sont en cours (Domergue *et al.*, 2001 ; Cleyet-Marel *et al.*, 2002) sur stériles bruts sans aucune préparation avec une végétalisation mixte de légumineuses arborescentes et de plants forestiers (photo 4). Ces essais sont à poursuivre afin de mieux connaître les conditions d'utilisation et une filière de production de plants devrait se constituer pour produire ces espèces de légumineuses inoculées.

Des essais mis en place dans des reboisements forestiers classiques ont montré que les plants mycorhizés ont une meilleure survie et croissance dans les situations les plus difficiles (par exemple sur des stériles de terrils houillers).

Nous avons montré dans les paragraphes précédents la part importante constituée par le sol et l'environnement du site pour la réussite des réa-

10. C'est le matériau qui recouvre un dépôt exploitable et que l'on enlève en vue de l'exploitation du gisement. Actuellement dans les réaménagements visités, les stériles d'exploitation sont utilisés en couche de 0,8 à 1 m.

11. Les fines de décantation permettent une amélioration de la réserve utile en eau du sol. Leur utilisation avait été testée dans l'est de la France et avait montré une meilleure croissance des plants. Des essais sont à mettre en place pour tester des doses et les différentes techniques d'incorporation des fines en reconstitution de sol en zone méditerranéenne.

Encadré 3

Éléments de choix du type de végétalisation pour un front de taille en zone méditerranéenne

De nombreux éléments peuvent conditionner le choix du type de végétation à mettre en place. Pour que le réaménagement soit durable, il convient que ce choix soit adapté aux conditions techniques et économiques de l'exploitation de granulats, au milieu physique et à l'environnement du site, à la disponibilité des différents matériaux nécessaires (stériles, fines de décantation, amendements organiques, mais aussi plants de la qualité souhaitée) et aux possibilités de gestion après la phase de restauration.

Les conditions techniques de l'exploitation conditionneront les grandes lignes du milieu à réaménager (type de roche, exposition globale du front, hauteur des gradins et largeur des banquettes...). Afin d'améliorer ces caractéristiques, un modelage des fronts de taille est possible au début du réaménagement. La disponibilité d'une certaine quantité de stériles d'exploitation ou de fines de décantation permettra de réfléchir à l'épaisseur de sol à mettre en place. La topographie du site et les conditions de poursuite de l'exploitation permettront ou non l'accès aux banquettes une fois la phase de réaménagement finie. Si aucun accès n'est possible ou si la carrière n'est plus en exploitation, aucune gestion du réaménagement ne pourra être faite par la suite (désherbage, arrosage, regarnissage ou dépressage...). Dans ce cas, reconstituer un écosystème pionnier (à base d'espèces herbacées ou de plants inoculés) est sans doute un choix judicieux tant d'un point de vue économique qu'écologique. Si l'environnement de la carrière présente des arbustes ou arbres semenciers, la dynamique naturelle de colonisation poursuivra la cicatrization du milieu.

Le milieu physique et en particulier le climat, l'ensoleillement du front, l'exposition au vent sont à prendre en compte dans le choix des espèces, de l'âge et du type de plant, des moyens d'améliorer le sol d'un point de vue réserve en eau et de lutte contre la concurrence herbacée.

La disponibilité d'unité de compostage ou de production d'amendements organiques à proximité du site influera beaucoup sur le coût de la reconstitution de sol. De la même manière, la disponibilité du type de plant choisi conditionnera la possibilité de respecter le plan de réaménagement prévu. Les contacts avec des pépiniéristes et la définition, très à l'avance, d'un cahier des charges fixant les conditions de production des plants permettent de mieux préparer la plantation.

12. En dehors du choix d'une espèce adaptée aux conditions de sols et de climat que nous n'abordons pas ici.

ménagements. L'autre point fondamental¹², mais pas toujours respecté, est de mettre en place des plants de qualité et d'optimiser leur survie et leur croissance.

S'assurer de la qualité des plants forestiers et de la plantation

En effet, les visites de terrain nous ont montré que les carrières acceptent parfois des lots de plants de très mauvaise qualité ou parfois mal adaptés à la situation pédoclimatique de la carrière. Planter dans les conditions difficiles que constituent les carrières, des plants à système racinaire déformé, des plants étiolés car surfertilisés ou déséquilibrés entre appareil aérien et souterrain, conduit irrémédiablement à l'échec à moyen terme de la plantation. L'information des carrières sur la vigilance à porter à la qualité des plants qu'il accepte, constitue une marge de progrès importante du point de vue de la durabilité des reboisements.

À ce titre, sans en détailler ici tous les points, rappelons les étapes permettant d'assurer l'obtention et le maintien de la qualité des plants jusqu'au moment de la plantation :

– des semis d'une semence de bonne qualité génétique ;

– les conditions de culture en pépinière ;

– les conditions d'arrachage et de conditionnement pour les plants à racines nues ;

– les conditions de transport ;

– les conditions de stockage sur le site avant plantation ;

– les conditions de plantation proprement dites.

Nous ne parlerons que des conditions de culture en pépinière (encadré 4) et du choix des types de plants.

Le choix du type de plant, à racines nues ou en conteneur, dépend d'un compromis entre chance de survie et coût. Les plants en conteneur, généralement de petite taille (0,1 à 0,3 m), occasionnent certes un surcoût au moment de la plantation¹³ et nécessitent un bon contrôle de la concurrence herbacée les premières années. Cependant, ils ont une très bonne reprise et, par la suite, imposent moins d'entretien et pas de frais nouveaux pour le regarnissage¹⁴. Comme le contrôle visuel de la qualité des racines n'est pas possible à la livraison du plant, il faut mettre en place des garanties contractuelles sur les conditions de production. Par des contrats de production ou des cahiers des clauses techniques particulières, il faut s'assurer et fixer les points suivants :

13. Les plants eux-mêmes sont plus chers (de 1,2 à 8 fois selon les espèces) et leur plantation est un peu plus onéreuse.

14. Dans le cas de plants en conteneur, la plupart des pépinières assurent la reprise et fournissent des plants gratuitement pour remplacer les morts.

– l'espèce choisie avec, dans certains cas, le lieu de récolte des graines ;

– l'âge et la fourchette de taille du plant que l'on accepte selon le volume du conteneur. En effet, la hauteur du plant, son diamètre au collet et le nombre de bourgeons racinaires est en corrélation directe avec la section du conteneur. Le volume minimum du conteneur à employer est de 400 cm³; le tableau 1 montre l'influence de la taille du conteneur sur les taux de survie (Cemagref, 1991).

L'élevage en conteneur anti-chignon sans fond et installé sur vide d'air est une condition essentielle à respecter pour éviter des malformations graves du système racinaire.

Le mode de fertilisation et d'arrosage pendant l'élevage en pépinière doit être discuté et choisi en ac-

cord avec le pépiniériste. En effet, un apport d'azote induit une croissance plus rapide du plant en pépinière et un risque d'induire un déséquilibre entre la partie aérienne et la partie racinaire des plants. Ce type de plant déséquilibré est donc déconseillé pour les reboisements de carrières. Dans le cas particulier des plants mycorhizés (encadré 5, p. 46) une fertilisation azotée et phosphorique empêche la bonne installation de la symbiose entre champignon et racine, elle est donc à proscrire.

Pour fixer tous ces points avec le pépiniériste et avoir les meilleures garanties quant à la qualité des plants qui seront livrés, les discussions doivent être menées très en amont de la végétalisation. En effet, elles doivent avoir lieu en fonction de l'âge souhaité des plants à la plantation deux à quatre ans avant le début des travaux de réaménagement de

Encadré 4

Les conditions de production des plants forestiers en pépinière

Au cours de l'élevage en pépinière, beaucoup de facteurs peuvent influencer la qualité et le potentiel de croissance des plants forestiers : âge, opérations culturales, type de support de culture et de conteneur, fertilisation, inoculation... Deux grands types de plants sont produits : à racines nues ou en conteneur (ou en motte), dont chacun aura ses avantages et ses inconvénients en terme de qualité du système racinaire, de potentialités de reprise et de croissance, de résistance à la concurrence herbacée.

Les plants destinés à être vendus à racines nues sont issus de semis direct en pleine terre de graines. Au bout d'un an ou deux d'élevage, les semis sont soit arrachés et repiqués, soit simplement « soulevés ». Le repiquage, outre une mise à distance des jeunes plants, permet de sectionner la racine pivot et d'induire le développement d'un système racinaire concentré et équilibré. Le soulèvement consiste à passer, sur les semis en place, une lame coupante à 0,15 m dans le sol afin de couper le pivot des plants et, là aussi, permettre de façonner le système racinaire ;

À âge égal, la répartition des années avant et après repiquage (et/ou soulèvement), c'est-à-dire la catégorie d'âge, a une grande importance. Ainsi un plant âgé de 3 ans peut être un plant 1 + 2 (repiqué un an après le semis et vendu deux ans après le repiquage) ou un plant 2 + 1 (repiqué deux ans après le semis et vendu l'année suivante) ou respectivement 1S2 ou 2S1 en cas de soulèvement. Le premier aura plutôt un développement aérien important et conviendra pour des reboisements en milieu favorable, le second aura une taille inférieure mais un système racinaire mieux conformé, avec plus de réserves, et devra être préféré pour des reboisements en conditions plus difficiles.

Les plants à racines nues peuvent être plantés jusqu'à l'âge de trois à quatre ans. La taille d'un plant n'est pas liée de manière régulière à son âge. Une fertilisation excessive en pépinière peut produire un plant jeune de grande taille qui n'aura pas de bonne capacité de reprise à la plantation en milieu difficile (déséquilibre partie aérienne-partie racinaire).

La qualité des plants en conteneur est essentiellement liée la conformation de l'appareil racinaire. En effet, des déformations du système racinaire peuvent survenir (racines en crosse, spiralées, en chignon) quand le volume du pot est trop petit ou la technique d'élevage non adaptée. À la livraison des plants, il est difficile de détecter les plants présentant des défauts racinaires graves, il est donc nécessaire de s'en protéger en vérifiant les conditions de production. Les plants doivent être élevés dans des pots anti-chignons, à forme intérieure anguleuse, sans fond et placés dans des caisses de culture surélevées du sol par un coussin d'air d'au moins 0,10 m qui produit un arrêt de la croissance des racines quand elles sortent du godet. Des conteneurs de type « panier à parois ajourées » sont aussi récemment apparus sur le marché et présentent certains avantages. La qualité des substrats de culture et les conditions d'élevage (arrosage, fertilisation) sont aussi très importantes. Les durées d'élevage des plants en conteneur doivent être limitées à un an, maximum deux ans ; ceci induit des plants de taille réduites (10 à 30 cm). Les plants produits en conteneur présentent l'avantage de systèmes racinaires n'ayant subi aucun traumatisme, bien protégés du dessèchement, ce qui assure généralement de bonnes conditions de reprise. La plupart des pépiniéristes garantissent la reprise des plants en conteneur et s'engagent à fournir de nouveaux plants en cas de mortalité.

► Tableau 1 – Influence du volume du conteneur sur le taux de reprise de Cèdres de l'Atlas (1-0) (d'après Cemagref, 1991).

Volume du conteneur en cm ³	% de reprise 6 ans après la plantation
600	88,7
400	85,1
350	62,9
300	52,0

la carrière. Les critères d'acceptation ou de rejet des plants devront être également fixés, pour cela il est utile de se référer à la plaquette « réussir la forêt » éditée par le ministère de l'Agriculture (DERF et ONF, 1990) qui présente les précautions à prendre et les points à surveiller lors de la réception de plants dans le cadre des reboisements en milieu forestier.

Conclusion

Comme l'étude similaire menée sur les réaménagements agricoles, cette synthèse a montré les progrès importants faits par des exploitants de granulats dans le reboisement de carrière depuis les années 1975. Certains sites en alluvionnaires ont les qualités et les potentialités sylvicoles de forêts en place. Certains talus d'exploitation de moraine présentent un aspect boisé ne permettant plus d'imaginer l'exploitation qui y a eu lieu. Quelques carrières en front de taille présentent une intégration paysagère de qualité et durable (photo 5) en ayant allié remodelage du front de taille et plantations dans de bonnes conditions. Les pratiques de remodelage rentrent bien dans les habitudes et les compétences que les exploitants de carrières se reconnaissent. Elles peuvent donc être facilement adoptées sans réel bouleversement des pratiques.

Par contre, la végétalisation des milieux difficiles que sont les fronts de taille relève d'autres métiers et de pratiques plus éloignées de celles des carrières. Or c'est dans ce domaine que des progrès peuvent encore être faits car les conditions difficiles nécessitent d'y apporter un maximum d'atouts. Sensibiliser les carrières à la nécessité d'exiger des plants produits selon des cahiers des charges établis en fonction des contraintes du milieu ne pourra qu'améliorer la durabilité des plantations boisées ou arborées des banquettes et talus d'éboulis. Ces cahiers des charges devront fixer entre autre, le type de plant produit, le cas échéant la taille du conteneur et le type de pot, la fourchette de fertilisation acceptée, les normes d'acceptation des plants.

Les pistes de recherche sur la reconstitution de sol à base d'amendements organiques de fines de décantation et de stériles sont à poursuivre afin de mieux adapter ces techniques aux carrières. Reconstituer dans un premier temps un écosystème herbacé et laisser les espèces indigènes le coloniser est également à promouvoir quand aucune gestion n'est possible après la restauration. Les administrations de tutelle seront, elles aussi, à sensibiliser en ce sens, afin de mieux leur faire prendre en compte la notion de durabilité du réaménagement. Les pistes récentes de végétalisation sur stériles bruts avec des plants fixateurs d'azote associés à des essences forestières mycorhizées sont également à explorer de manière plus poussée afin de pouvoir, si elles s'avèrent efficaces, mettre en place une filière de production de plants spécifiques. □

Encadré 5

Les plants mycorhizés

Les plants artificiellement mycorhizés sont des plants pour lesquels l'installation du symbiote est assuré par l'apport au début de l'élevage des plants d'une souche de champignon mycorhizien sélectionnée et choisie pour son efficacité. Comme cette symbiose se met en place dans la zone de croissance de la racine, c'est au moment de la germination qu'elle est la plus efficace. Après de nombreuses recherches (INRA, CNRS, Cemagref), sur un certain nombre de couples espèces/champignon, une filière de production s'est développée dans certaines pépinières forestières (GIE Forêt-Mycorhize). Deux espèces de champignon sont utilisées (*Laccaria bicolor* et *Heleboma crustunuliforme*) avec plusieurs essences (*Cedrus atlantica*, *Picea excelsa*, *Pinus halepensis*, *Pinus laricio*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziensis*, *Betula verrucosa*, *Fagus sylvatica*...). Les plants sont produits en conteneur de volume 300 à 430 cm³. L'inoculation augmente le prix de vente de 0,15 € environ. En milieu difficile, ce surcoût est généralement compensé par une reprise meilleure et une croissance plus importante.

Des inoculations expérimentales avec des bactéries fixatrices d'azote ont été mises en place mais actuellement la filière de production en pépinière est à développer. Ces essais ont montré l'intérêt d'inoculer des légumineuses avec *Rhizobium* (Domergue *et al.*, 2001, Cleyet-Marel *et al.*, 2002) ou des aulnes avec plusieurs souches de *Frankia* sélectionnées (Moiroud, 1991). Des expérimentations ont été mises en place sur substrat brut en zone méditerranéenne avec une végétalisation mixte (photo 4) de légumineuses arborescentes inoculées, d'aulnes et de robiniers fixateurs d'azote et de plants forestiers (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens* et *Arbutus unedo*). D'autres essais avaient été des succès en Rhône-Alpes avec des aulnes inoculés par différentes souches de *Frankia*.

Résumé

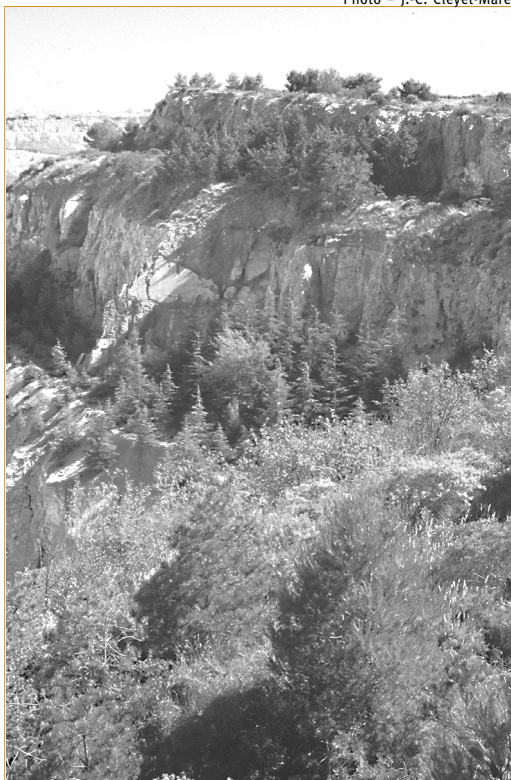
Un réaménagement forestier de qualité après extraction de granulats permet, en exploitation alluviale, une production sylvicole, et en exploitation de roche dure en front de taille, une couverture arbustive ou arborée assurant l'intégration paysagère du site.

Une synthèse des besoins des arbres, des caractéristiques des sols forestiers met en évidence les caractéristiques du réaménagement à conduire.

Dans les conditions extrêmement difficiles d'un point de vue sol et climat des carrières en front de taille de la zone méditerranéenne, plusieurs pistes d'amélioration des végétalisations sont proposées : modeler le front de taille pour le rendre plus favorable, reconstituer un sol suffisant avec des stériles, des amendements organiques et des fines de décantation tout en luttant contre la concurrence pour l'eau de la végétation herbacée, planter sur stériles des plants inoculés fixateurs d'azote et des plants forestiers mycorrhizés.

Les visites de terrain ayant montré que souvent le carrier accepte des plants de mauvaise qualité, nous indiquons les grands principes permettant de s'assurer que le plant sera de qualité.

Photo – J.-C. Cleyet-Marel



▲ Photo 5 – Un réaménagement de qualité en zone méditerranéenne.

Abstract

The forestry rehabilitation of quarries allows to return the land to timber production in case of alluvial quarry, or more frequently to restore a good landscape quality by woodland plantation on working faces and slopes of pits.

A synthesis of the tree needs and of the specificity of forest soils allows to reveal the reclamation's characteristics.

Working faces in the Mediterranean area often offer extremely severe climatic conditions and few topsoil available for plants. Some improvements are possible:

- Cliff-size faces blasting to shape them to a better compatibility,
- To regenerate a thicker soil using settling silt and organic matter (composts) and to protect tree plants against herbaceous competition for water,
- To plant directly on overburden or deads, nitrogen fixative species and mycorrhized plants.

As quarry survey showed that the young plant lack of quality made the reclamation unsuccessful, we precise some improvements to ensure a better quality of the supply.

Bibliographie

- ADEME, CEMAGREF, 1999, *Utilisation des déchets organiques en végétalisation, Guide de bonnes pratiques, données et références*, Ademe Éditions, 112 p.
- ANNEN, B., DÖRFLINGER, A., GRIMM, F., KÄSTLI, T., TEUTSCH, R., 1991, *Forêt et gravières : directives pour le reboisement des gravières désaffectées*, Fachverband für Sand und Kies Schweiz, 43 p.
- BRUN, J.-J., 1984, *Revégétalisation des carrières, principes généraux applicables aux reboisements*, Cemagref, Comité de la taxe parafiscale sur les granulats 049.EG.109, 49 p.
- CEMAGREF, 1983, *L'utilisation de déchets urbains pour la reconstitution des forêts méditerranéennes*, Cemagref Aix-en-Provence, 97 p.
- CEMAGREF, 1991, *Guide technique du forestier méditerranéen*, Cemagref Aix-en-Provence
- CLEYET-MAREL, J.-C., DOMMERGUE, O., MAURE, L., 2002, Potential of nitrogen-fixing symbiosis systems for revegetation strategies in mediterranean environmental conditions, CAB International 2002 Nitrogen Fixation: Global Perspectives, *Proceedings of the 13th International Congress on Nitrogen Fixation, Hamilton, Ontario, Canada 2-7 July 2001* (eds. T Finan, M O'Brian, D Layzell, K Vasey, W Newton)
- DERF, ONF, 1990, *Réussir la forêt : contrôle et réception des travaux*, ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 63 p.
- DINGER, F., 1997, *Végétalisation des espaces dégradés d'altitude*, Cemagref Éditions, 139 p.
- DINGER, F., CROSAZ, Y., 2002, Réhabilitation des territoires dégradés : la végétalisation, *Paysage Actualités*, n° 245, p. 32-37.
- DOBSON, M.-C., MOFFAT, A.-J., 1993, *The potential for woodland establishment on landfill sites*, HMSO, 88 p.
- DOMERGUE, O., MAURE, L., CLEYET-MAREL, J.-C., 2001, Symbioses fixatrices d'azote et réhabilitation de milieux dégradés en zone méditerranéenne française, *3^e Colloque Rhizosphère, Dijon, 26 Novembre 2001*.
- FERREZ, Y., WEIDMANN, J.-C., 1997, *Carrière de Marchaux (Doubs) rapport d'expertise phytoécologique*, Sablières du Doubs.
- FISCHESSE, B., DUPUIS-TATE, M.-F., 1996, *Le Guide illustré de l'écologie*, Cemagref Éditions, 318 p.
- MOFFAT, A., MAC NEILL, J., 1994, *Reclaiming disturbed land for forestry*, Bulletin 110, HMSO, 112 p.
- MOIROUD, 1991, *Un procédé exemplaire de réaménagement et de reverdissement des carrières : L'emploi des espèces fixatrices symbiotiques d'azote atmosphérique*, Université Claude Bernard Lyon, Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats 060.EG.161.
- VANPEENE-BRUHIER, S., DELORY, I., 2000, Réaménagement agricole des carrières de granulats : proposition d'amélioration de leur qualité pour une utilisation agricole durable, *Ingénieries - EAT*, n° 24, p. 33-43.
- VANPEENE-BRUHIER, S., 2000, *Réaménagement forestier des carrières de granulats*, Cemagref, Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats, 193 p.