



HAL
open science

Réaménagement forestier, prairial ou agricole des carrières de granulats

Gabriel Kientz

► **To cite this version:**

Gabriel Kientz. Réaménagement forestier, prairial ou agricole des carrières de granulats. Sciences de la Terre. 2014. hal-02108865

HAL Id: hal-02108865

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02108865>

Submitted on 24 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Master 2 : Géosciences Planète, Ressources et Environnement.
Spécialité Sol, Eau et Environnement.

RAPPORT DE STAGE

Réaménagement forestier, prairial ou agricole des carrières de granulats

Gabriel KIENZ
Année scolaire 2013/2014

Tuteur : Louis KIRSCH
Maître de stage : Sylvie DOUSSET

Sommaire :

Présentation de l'entreprise :	1
Introduction :	1
I] Le réaménagement par remblaiement des carrières de granulats : synthèse bibliographique	3
1 °) Travaux préparatoires :	3
A/ Défrichage :	3
B/ Décapage :	3
C/ Stockage :	4
2°) Remblaiement :	5
A/ Phasage des opérations	5
B/ Préconisations pour les différents horizons	6
3°) Revégétalisation et entretien ultérieur :	9
A/ Réaménagement prairial/agricole :	10
B/ Réaménagement forestier :	10
4°) Conclusion :	11
II] Etat des lieux : réaménagements déjà réalisés	12
1°) Présentation des parcelles	12
A/ Vigneulles	12
B/ Tonnoy	13
2°) Sondages pédologiques	14
A/ Vigneulles, les Sables	14
B/ Vigneulles, le Breuillot	15
C/ Vigneulles, Farampré	16
D/ Tonnoy, prairie	17
E/ Tonnoy, zone reboisée	17
3°) Analyses chimiques	19
4°) Conclusion	20
III] Conclusion : préconisations pour améliorer les réaménagements	22
1°) Comparaison entre théorie et pratique	22
2°) Mesures à mettre en place	22
IV] Bibliographe	24
ANNEXE 1	26
ANNEXE 2	27
ANNEXE 3	28

Table des illustrations :

Figure 1 : Organigramme du groupe Italcementi.	1
Figure 2 : Production de granulats en France en 2012 (millions de tonnes) (données : UNICEM).	1
Figure 3 : Production de granulats en Lorraine en 2012 (millions de tonnes) (données : UNICEM).	2
Figure 4 : Détection de la limite de plasticité d'un sol (Source : S.VANPEENE-BRUHIER <i>et al.</i> , 2000). Ce test simple permet de déterminer rapidement si la terre est suffisamment ressuyée pour pouvoir être manipulée sans risques de tassement préjudiciable pour le réaménagement.	4
Figure 5 : Exemple de plan de phasage permettant une gestion efficace des sols (modifié d'après S.VANPEENE-BRUHIER <i>et al.</i> , 2002).	5
Figure 6 : Protocole de régéage des stériles de découvertes et de la terre végétale (source : S.VANPEENE-BRUHIER <i>et al.</i> , 2002)	8
Figure 7 : Influence de l'apport de BRF sur la variation relative du rendement (A) et sur la variation relative de la teneur en C du sol superficiel (B), par rapport au témoin sans apport (base 100) (modifié d'après BARTHES B. <i>et al.</i> , 2010).	9
Figure 8 : Parcelle des Sables, réaménagée au Nord en étang (11ha) et en une zone prairiale au Sud (17ha). Le Breuillot est la prairie à l'Ouest. L'implantation des points de sondage est indiquée.	12
Figure 9 : La parcelle de Farampré et l'implantation des points de sondage.	13
Figure 10 : La parcelle de Tonnoy, reboisée au Nord et réaménagée en prairie dans la partie Sud. Les points de sondages sont indiqués.	13
Figure 11 : Les Sables, photographie du profil au sondage S12.	14
Figure 12 : Les Sables, photographie du profil au sondage S17.	15
Figure 13 : Le Breuillot, photographie du profil au sondage B.	16
Figure 14 : Tonnoy prairie, profil au sondage S3.	17
Figure 15 : Photographies des différents types de végétation en place sur la parcelle de Tonnoy : roselière (A), bosquet dominé par les jeunes saules (B), zone d'herbes hautes (C) et pierrier (D) (Mars 2014).	18

Remerciements :

Je tiens à remercier toute l'équipe de GSM qui a su m'accueillir chaleureusement au cours de ces 6 mois de stage, et tout particulièrement le service foncier : Céline, Didier, Evelyne, Louis, Philippe et Romain, ainsi que Benoit, Reynald et Régis.

Je tiens également à remercier toute mes proches qui m'ont soutenu au cours de mes études.

Présentation de l'entreprise :

GSM est une entreprise appartenant au groupe Italcementi, le 5^{ème} cimentier mondial (Figure 1).

Au sein de ce groupe, GSM est donc responsable de l'exploitation des granulats en France et en Belgique. L'entreprise emploie plus de 900 salariés et possède 90 sites de production.

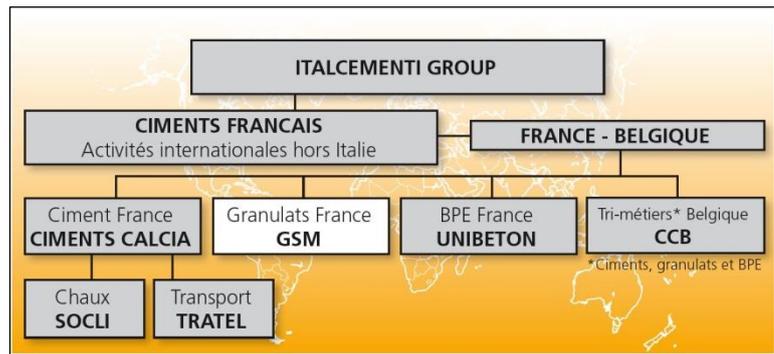


Figure 1 : Organigramme du groupe Italcementi.

Introduction :

Les granulats sont des petits fragments de roche, entrant dans la composition de matériaux de construction (bétons, mortiers, bitumineux) ou pouvant être directement utilisés (remblais, ballasts). Leurs caractéristiques physiques dépendent fortement de leurs origines et des procédés de transformation qu'ils ont subis, et déterminent leurs usages ultérieurs. En France en 2012, la consommation annuelle de granulats était de 5,7 tonnes par habitant.

Les origines des granulats peuvent être très variées : alluvions fluviales ou marines, roches massives (magmatiques ou sédimentaires) concassées ou matériaux recyclés concassés (Figure 2). En Lorraine, les granulats sont principalement d'origine fluviale (galets siliceux issus de l'érosion vosgienne), ou sont produits en concassant des roches calcaires massives ou des matériaux à recycler (Figure 3).

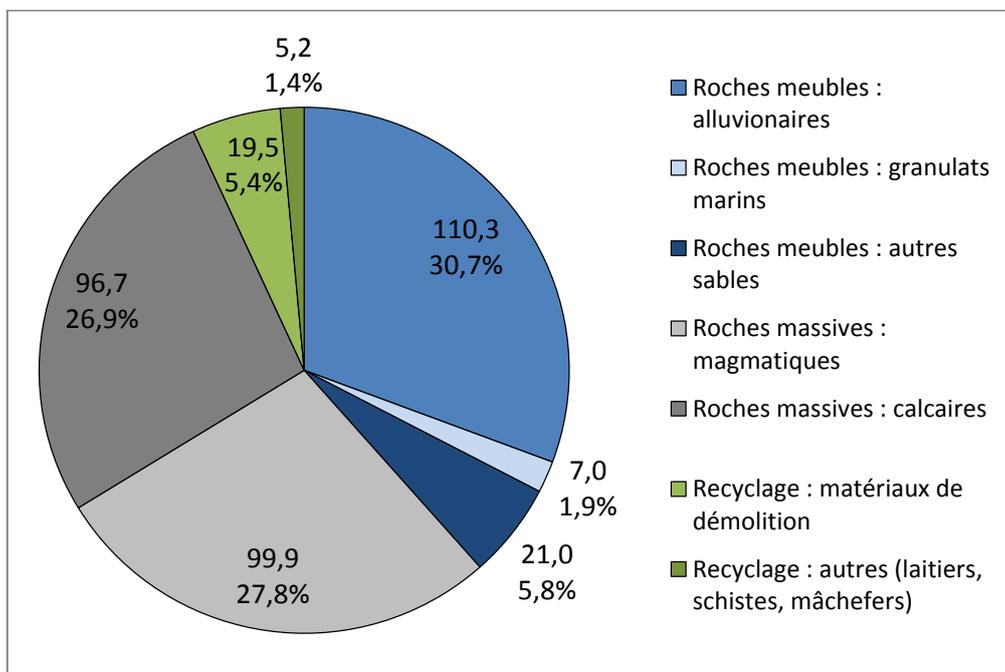


Figure 2 : Production de granulats en France en 2012 (millions de tonnes) (données : UNICEM).

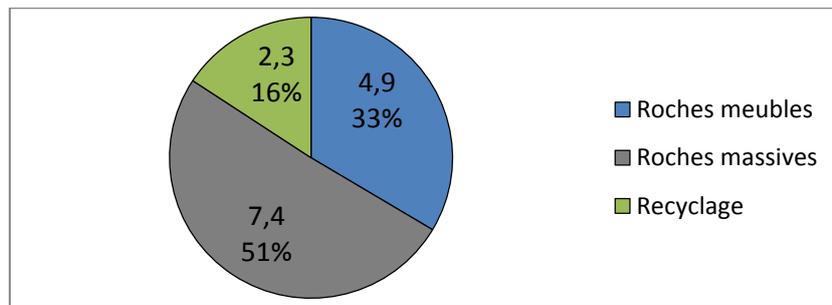


Figure 3 : Production de granulats en Lorraine en 2012 (millions de tonnes) (données : UNICEM).

Dans le cadre de l'exploitation des granulats en Lorraine-Champagne, la société GSM est amenée à exploiter plusieurs carrières. Une fois le gisement exploité ou l'autorisation préfectorale d'autorisation d'exploitation arrivée à son terme, le site doit être mis en sécurité et réaménagé avant d'être restitué au(x) propriétaire(s). La plupart du temps les gravières sont réaménagées en plans d'eaux, pouvant avoir un intérêt écologique ou touristique. Cependant, depuis quelques années, les réaménagements agricoles et/ou forestiers sont de plus en plus fréquents, pour répondre notamment aux souhaits de certains propriétaires et à une pression croissante du monde agricole quant à la disparition des terres agricoles. Ce type de réaménagement induit un comblement des excavations avec des remblais externes au site ; mettant en évidence la nécessité de maîtriser leurs volumes et qualités.

C'est dans ce contexte que ces dernières années GSM a réaménagé plusieurs parcelles en Lorraine en les remblayant :

- Deux gravières à Vigneulles (carrière des Sables et ancien bassin de décantation de Farampré)
- Une gravière à Tonnoy (carrière de la Hichère)
- Une carrière à Pierre-la-Treiche (ancien bassin de décantation)
- Une carrière calcaire à Maxéville

D'autres sites sont en cours de remblaiement et des projets de remblaiement sont à l'étude.

Le but du stage était donc de faire un bilan et une analyse des pratiques qui ont été mises en place jusqu'alors, et de proposer un ou plusieurs protocoles selon la finalité du réaménagement en s'appuyant sur des publications scientifiques et les données de terrain, tout en prenant en compte les problèmes de faisabilité technique et économique.

I] Le réaménagement par remblaiement des carrières de granulats : synthèse bibliographique

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique a été réalisée afin de faire un état des connaissances et des pratiques préconisées pour les réaménagements par remblaiement, étape par étape.

1 °) Travaux préparatoires :

A/ Défrichage :

Dans le cas où la parcelle est boisée avant l'exploitation, le défrichage doit être réalisé dans les conditions optimales. La période la plus favorable pour réaliser ces travaux est l'automne, puisque cela assure un impact minimal sur la majorité de la faune (Tableau 1). En outre, cela permet de laisser le temps au feuillage des feuillus de tomber et de venir renouveler la litière, limite les risques pathogènes pour les grumes (l'activité biologique diminuant avec le froid) et diminue le temps de séchage du bois grâce à une teneur en sève plus faible.

Tableau 1 : Prise en compte de la faune pour déterminer la période de défrichage la plus favorable.

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Insectes	Jaune	Rouge	Jaune	Jaune	Jaune	Jaune						
Herpétofaune	Rouge	Vert	Vert	Vert	Rouge							
Chiroptères	Rouge	Jaune	Jaune	Jaune	Rouge							
Mammifères	Rouge	Jaune	Jaune	Jaune	Rouge							
Avifaune	Vert	Vert	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert
Période recommandée pour les travaux de défrichage									Gris			

Période favorable ;
Période moins favorable ;
période défavorable ;
Période préconisée pour les travaux

Source : Cabinet Barbanson Environnement

Laisser la végétation en place dans la bande des 10 mètres inexploitable en bordure de parcelle permet de limiter l'action du vent sur la parcelle (limitation de l'évapotranspiration des jeunes plants, envol de poussières réduit, nuisances sonores diminuées...).

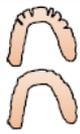
Le bois raméal obtenu lors de l'abatage des arbres peut être mis de côté et stocké en andains afin de servir d'amendement lors du réaménagement ultérieur (utilisation du bois raméal fragmenté détaillée plus tard) : en effet, en plus d'être moins intéressantes que le tronc pour la vente, les branches se caractérisent par une teneur en nutriments plus élevée. Durant leurs stockages, les branches peuvent par ailleurs servir d'abris pour une faune diversifiée (hérissons, batraciens, insectes...).

Une fois les arbres abattus, le dessouchage sera préférentiellement effectué à la pelle hydraulique sur chenilles, qui permet de travailler de manière précise tout en exerçant au sol une pression raisonnable (de l'ordre de 400 g/cm²) pour limiter son tassement. Pour la même raison, ces travaux doivent s'effectuer lorsque le sol est sec.

B/ Décapage :

Le décapage est une étape obligatoire dans l'exploitation des carrières de granulats, car elle permet d'évacuer la terre végétale et les stériles de découverte pour atteindre le gisement sous-jacent. Afin de pouvoir réaliser un réaménagement ultérieur efficace, il est nécessaire que cette opération soit effectuée correctement. L'objectif est de récupérer un maximum de terres, tout en évitant de mélanger la terre végétale et les stériles de découverte qui ne possèdent pas les mêmes propriétés et n'ont pas la même utilisation. Afin d'être le plus précis possible et de limiter le tassement du sol, l'usage d'une pelle hydraulique sur chenilles par temps sec

(Figure 4) est encore une fois préféré (les scrapers pouvant être utilisés pour cette opération exercent une pression sur les sols de l'ordre de 3000 g/cm²). Toujours afin de limiter le tassement des sols, la pelle doit travailler en avançant sur la partie décapée quand cela est possible (il arrive que le toit du gisement soit sous le niveau de la nappe phréatique, ce qui rend impossible les manœuvres d'engins).

La terre se casse avec peine sous les doigts	La terre peut être manipulée	
La terre s'effrite sous la pression des doigts	Affiner par le test du "boudin" et l'observation des conditions météorologiques	 <p>Le boudin se fissure : la terre peut être manipulée</p> <p>Le boudin ne se fissure pas : la terre est trop humide elle ne peut pas être manipulée</p>
La terre se déforme ou se pétrit sans se briser	La terre ne peut pas être manipulée des compactages irréversibles seraient produits si elle était manipulée ou si un engin roulait dessus	

**Figure 4 : Détection de la limite de plasticité d'un sol (Source : S.VANPEENE-BRUHIER *et al.*, 2000).
Ce test simple permet de déterminer rapidement si la terre est suffisamment ressuyée pour pouvoir être manipulée sans risques de tassement préjudiciable pour le réaménagement.**

C/ Stockage :

Une fois le décapage réalisé, il y a deux possibilités : soit les terres décapées sont immédiatement utilisées pour réaménager une portion du site où l'exploitation est terminée (réaménagement coordonné à l'avancement), soit on les stocke pour un remblaiement ultérieur. Le stockage est délicat car il peut entraîner une perte des qualités du sol s'il est mal réalisé : diminution du niveau de matière organique et de nutriments, diminution des populations microbiennes, fongiques et de la pédofaune (notamment les vers de terre (Boyer, 2011)), diminution de la viabilité des graines enfouies, diminution de la capacité de rétention d'eau et augmentation de la densité (Strohmayr, 1999). En effet, lors du mauvais stockage d'un sol, les cycles biogéochimiques sont perturbés par l'arrêt brutal d'apport de nutriments et la modification des propriétés physico-chimiques du milieu. Ainsi, la diminution de la porosité du sol (sous son propre poids ou par manque d'exploration racinaire et de brassage par la pédofaune) peut entraîner l'apparition de zones anaérobiques, et donc une dénitrification du sol par les bactéries. De plus, mettre en place des stocks de terre est une opération qui prend du temps et immobilise une partie de la parcelle.

Le stockage est donc à réserver aux situations où une réutilisation immédiate des terres excavées n'est pas possible (au début du chantier ou si la zone à réaménager n'est pas encore prête) ou serait plus préjudiciable (terre trop humide pour être manipulée). Si cette solution est retenue, elle doit être mise en œuvre avec beaucoup de soin afin d'éviter les effets indésirables évoqués précédemment :

- Le stockage doit être sélectif comme le décapage : les différents horizons doivent être stockés séparément et clairement identifiés
- La stagnation d'eau est à éviter : il faut donc s'assurer que les stocks se situent dans des zones non inondables et ne font pas obstacle aux écoulements. Si besoin est, les merlons peuvent être installés sur une fine couche de graviers (15cm). Une légère inclinaison du sommet du merlon permet de limiter la stagnation de l'eau de pluie.
- Les merlons ne doivent pas dépasser 2,5 mètres pour la terre végétale et 3,5 mètres pour les stériles de découverte. Idéalement, la hauteur maximale doit correspondre à la profondeur atteinte par les racines.
- La revégétalisation des merlons doit être favorisée s'ils sont destinés à persister. La revégétalisation naturelle se fait généralement rapidement, mais un ensemencement de type légumineuses/graminées (mélange luzerne et trèfle par exemple) a l'avantage supplémentaire d'enrichir le sol en azote et de garantir une densité racinaire homogène (voir 3°) A/ Réaménagement prairial/agricole)

Un stockage bien réalisé n'a pas d'impact à long terme sur un sol : il vaut donc mieux stocker la terre correctement que d'en faire mauvais usage ou la réutiliser précipitamment dans de mauvaises conditions.

Lors de la visite d'une carrière concurrente, nous avons pu observer un stock de terre végétale d'environ 8 mètres de hauteur naturellement revégétalisé. Ce type de stockage ne présente qu'un intérêt très limité car la majorité du volume de terre doit être anoxique, excepté la couche superficielle structurée par les racines. Ainsi, bien qu'un volume important de terre végétale soit aisément disponible pour les remblaiements, la qualité agronomique de celle-ci n'est pas optimale.

2°) Remblaiement :

A/ Phasage des opérations

Comme cela a été expliqué précédemment, le réaménagement à l'avancement est le meilleur choix car il permet de limiter les temps de stockage de la terre, ainsi que leurs manipulations. Les plans de phasage réalisés pour la demande d'autorisation d'ouverture de la carrière prennent en compte cette problématique. Un plan de phasage est idéal lorsque les deux chantiers d'extraction et de réaménagement sont correctement coordonnés.

Le plan de phasage proposé ci-dessous (Figure 5) permet de ne pas gaspiller de terres, tout en minimisant à la fois leur manipulation et leur stockage. Les volumes mis en stockage sont réduits au minimum mais restent en place pendant toute la durée de l'exploitation. Pour limiter le temps de stockage mais en augmentant les opérations de manipulation des terres, il est possible de renouveler les stocks de terre au milieu de la période d'exploitation (dans l'exemple présenté : utilisation des stocks initiaux pour remblayer les parcelles 4, 5 et 6 et renouvellement des stocks sur 7, 8 et 9).

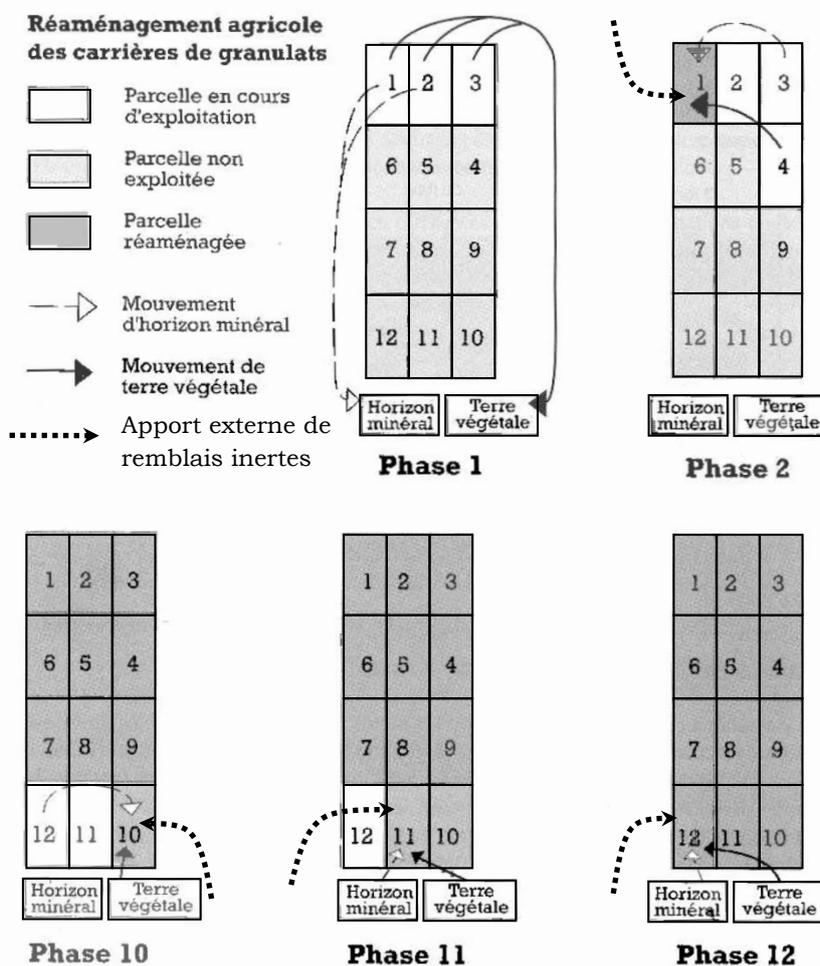


Figure 5 : Exemple de plan de phasage permettant une gestion efficace des sols (modifié d'après S.VANPEENE-BRUHIER *et al.*, 2002)

B/ Préconisations pour les différents horizons

Le remblaiement se fait soit partiellement (généralement dans le cas des carrières de roches massives, où des pentes sont aménagées sur les fronts de taille) soit au niveau initial. Afin de limiter les risques d'engorgement trop fréquents, il est préférable de remblayer 1,5 mètre au-dessus du niveau de crue décennale. Cependant, la quasi-totalité des carrières alluvionnaires se situent en zone inondable et il est souvent impossible de remblayer au-dessus de la côte initiale pour atteindre les 1,5 mètres évoqués précédemment : cela réduirait localement les surfaces inondables, et déplacerait les inondations ailleurs au risque d'affecter des zones urbaines.

Les épaisseurs théoriques de matériaux à remettre en place en fin d'exploitation sont indiquées ci-dessous. Cependant il faut garder en tête que deux facteurs vont moduler fortement ces valeurs : l'épaisseur naturelle de terre avant l'excavation ainsi que le volume inévitablement perdu pendant les manipulations, estimé à environ 30% par les carriers.

Un autre phénomène à prendre en compte lors des remblaiements est celui du foisonnement des terres. En effet, si les terres ne sont pas compactées lors de leur manipulation, elles ont au contraire plutôt tendance à voir leur volume augmenter légèrement. Cependant après le dépôt, le sol se tasse et reprend sa densité d'origine. Afin de compenser ces variations de volumes, il faut donc remettre en place une épaisseur de terre légèrement supérieure, de l'ordre de 10%.

Préparation du fond de fouille :

Dans le cas des carrières de roche massive, le fond de fouille doit être préparé : après son nettoyage, un rippage, ou le recours à un brise roche peuvent être nécessaire pour rétablir une drainance naturelle. En effet, les passages à répétition d'engins de carrière ont pu compacter une couche de particules fines sur le carreau jusqu'à la rendre imperméable.

Le problème ne se pose pas dans le cas des carrières alluvionnaires, car les engins travaillent depuis la berge et ne circulent pas sur le fond du gisement qui se trouve sous la nappe.

Remblais :

Les remblais acceptés pour remblayer le fond des carrières/gravières sont obligatoirement inertes. La définition concernant les déchets inertes retenue dans l'Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes est la suivante : « déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine ». Un contrôle visuel et olfactif est obligatoire lors de leur réception et avant leur déversement, pouvant mener à leur refus s'ils ne correspondent pas aux critères législatifs.

Une fois les remblais mis en place et avant l'apport des horizons suivants, un rippage permet d'améliorer le drainage et de faciliter l'exploration racinaire en profondeur (surtout dans le cas d'un réaménagement forestier).

Horizon minéral :

L'horizon minéral représente pour la flore ses principales réserves en eau et zones de prospection racinaire. Il faut donc s'assurer qu'il possède des caractéristiques intéressantes : un volume important facilement colonisable par les racines et de bonnes capacités de rétention en eau, sans pour autant contenir des poches d'eau stagnantes. La remise en place des stériles de découverte est une occasion d'améliorer ses propriétés : il est possible d'y ajouter des éléments de granulométries différentes afin de palier à certaines de ses carences initiales. On peut par exemple ajouter des éléments grossiers (sables et graviers) pour améliorer la drainance

de l'horizon s'il était trop argileux ; ou au contraire utiliser des fines de décantation sèches issues des processus de traitement des granulats pour augmenter la réserve utile d'un horizon trop drainant à l'origine.

Selon l'usage ultérieur envisagé pour la parcelle, les épaisseurs nécessaires varient (valeurs extrêmes trouvées dans les différents ouvrages consultés) :

- Entre 0,5 et 1,1 mètres dans le cas d'un réaménagement agricole (valeurs données dans le cas de cultures, mais pas de prairies)
- Entre 1 et 1,50 mètres pour un réaménagement forestier (les essences considérées influent l'épaisseur remise en place : peupliers, chênes et hêtres étant plus exigeants par exemple)

L'opération de régalinge doit être effectuée par temps sec et par des engins exerçant une faible pression sur le sol. La pelle hydraulique sur chenilles travaillant sur les remblais en association avec un dumper est la solution idéale (Figure 3). Une alternative est l'utilisation d'un bulldozer. Cette technique est plus rapide mais le bulldozer circule sur les terrains qu'il régale (contrairement à la pelle hydraulique qui peut opérer depuis le toit des remblais en reculant), ce qui augmente les risques de tassement. Cette technique prend cependant plus de temps que lors de l'utilisation d'un bulldozer, l'inconvénient de celui-ci étant de circuler sur la couche de terre qu'il régale, contrairement à la pelle hydraulique qui peut évoluer sur le toit des remblais. Si l'utilisation du bulldozer est retenue, il faut s'assurer que celui-ci est équipé de chenilles larges (type marais) et limiter au maximum les passages sur les terres remises en place.

Horizon humifère :

La terre végétale est la zone la plus active biologiquement d'un sol, et est donc très importante pour le cycle des nutriments dans le sol. C'est également une réserve importante en eau pour la flore. Son bon état est donc crucial pour le bon développement de la végétation (Redente et al. (1997)).

Les agriculteurs sont donc très sensibles à la bonne remise en place de cet horizon, puisqu'il a une incidence directe sur les rendements des parcelles après réaménagement. Comme pour l'horizon minéral, les épaisseurs de terre végétale nécessaires dépendent de l'usage ultérieur (valeurs extrêmes trouvées dans les différents ouvrages consultés) :

- Entre 15 et 40 centimètres pour un réaménagement agricole (valeurs données dans le cas de cultures, mais pas de prairies)
- Entre 25 et 75 centimètres dans le cadre d'un réaménagement forestier

Dans le cadre d'un réaménagement forestier, les jeunes plants sont souvent remis en terre dans des potets remplis de terre végétale afin de leur assurer un apport maximum en nutriments les premières années. La parcelle est recouverte d'une couche de terre végétale plus fine, sauf là où sont plantés les arbres (par exemple 15cm sur la parcelle et 75cm dans les potets). En plus de favoriser la croissance des arbres plantés, cette technique permet de limiter celle des espèces concurrentes indésirables entre les rangées de plantation.

Les préconisations quant aux engins à utiliser pour le régalinge sont les mêmes que pour l'horizon minéral : la pelle hydraulique roulant sur les remblais par temps sec est la meilleure solution (Figure 6).

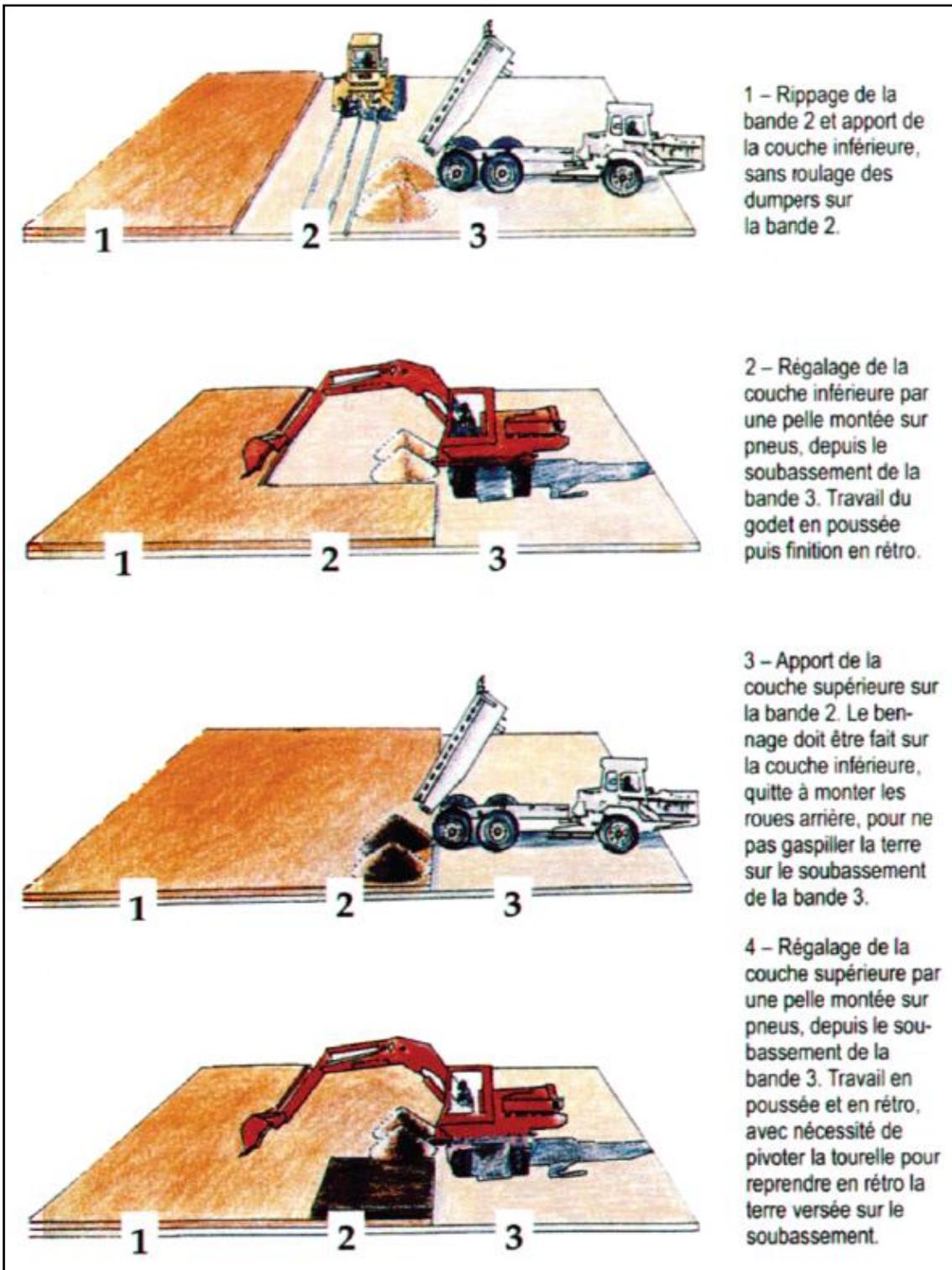


Figure 6 : Protocole de régilage des stériles de découvertes et de la terre végétale (source : S.VANPEENE-BRUHIER *et al.*, 2002)

3°) Revégétalisation et entretien ultérieur :

Apport de bois raméal fragmenté :

Le bois raméal fragmenté (BRF) correspond aux branches fines stockées lors de l'opération de déboisement de la parcelle et qui ont ensuite été broyées afin d'être épandues sur et/ou enfouies dans le sol. La taille des copeaux de bois est importante : c'est un des facteurs qui régit leur vitesse de dégradation : plus les copeaux sont petits, plus la surface de contact avec les micro-organismes saprophytes est grande et plus la vitesse de décomposition est potentiellement élevée. Cependant, lors du processus de dégradation, les micro-organismes consomment de l'azote et se retrouvent en compétition avec la végétation. Si la dégradation est trop rapide (copeaux trop petits), la consommation d'azote est trop élevée et les plantes subissent une carence en azote. Des copeaux d'environ 5 centimètres assurent une dégradation efficace tout en évitant le phénomène de « faim d'azote ». Un apport d'engrais azoté permet de réduire les risques de carence, tout en favorisant la dégradation du BRF.

Le BRF peut être utilisé en paillis (sur une épaisseur de quelques centimètres) ou enfouis dans les premiers centimètres du sol.

L'intérêt de l'utilisation du BRF afin d'améliorer les propriétés des sols a été démontrée (Barthès, 2010, Figure 7) : cela apporte au sol une quantité importante de matière organique et de nutriments qui stimulent son activité biologique, notamment fongique. Cette augmentation de l'activité biologique favorise ensuite la disponibilité de nutriments pour les plantes, notamment grâce à la multiplication des complexes mycorhiziens. Elle entraîne cependant une immobilisation significative de N et P la première année, qui peut toutefois être modérée par des apports azotés. Dès l'année suivante, les rendements des parcelles amendées par BRF redeviennent significativement supérieurs à ceux des parcelles témoins non amendées.

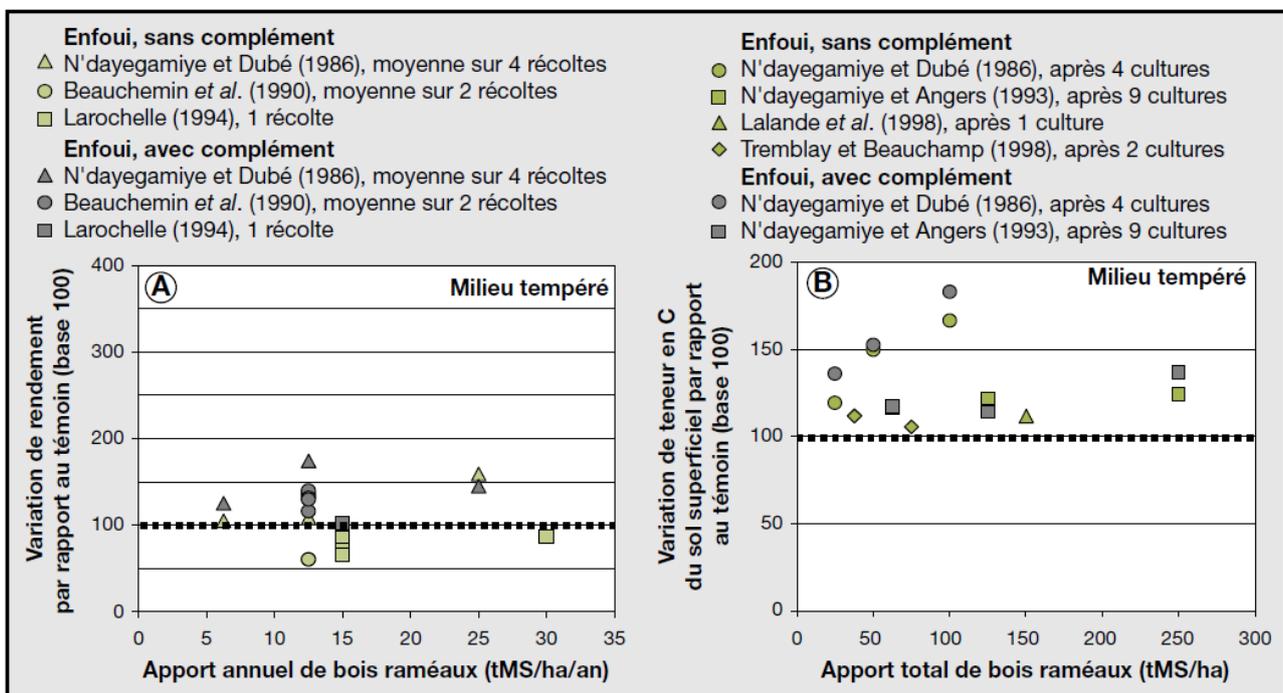


Figure 7 : Influence de l'apport de BRF sur la variation relative du rendement (A) et sur la variation relative de la teneur en C du sol superficiel (B), par rapport au témoin sans apport (base 100) (modifié d'après BARTHES B. *et al.*, 2010).

Si le BRF est utilisé en paillis sur le sol plutôt qu'en y étant enfouis, il permet également de modérer ses variations de température et d'en limiter l'évaporation en réduisant l'incidence du soleil. Cette application de surface limite également l'érosion (hydrique et éolienne) des sols nus.

Ainsi, l'apport de BRF améliore les rendements des parcelles (dès la première année si un amendement azoté est mis en place en support) en stimulant l'activité biologique, pour un coût relativement faible puisque les branches utilisées sont des résidus de l'opération de déboisement.

A/ Réaménagement prairial/agricole :

Un sol fraîchement réaménagé a nécessairement des propriétés agronomiques moindres qu'un sol non perturbé, car durant les manipulations il a perdu une partie de sa structure et son activité biologique a diminué. Des mesures spécifiques permettent cependant au sol de retrouver des propriétés et rendements comparables au sol initial.

A la fin du réaménagement, une période de convalescence doit ainsi être respectée avant la remise en culture ou l'utilisation en prairie fourragère afin de permettre au sol de retrouver un équilibre dans son fonctionnement. En Angleterre et en Suisse ces périodes sont obligatoires à mettre en place, pendant environ 5 ans. Durant cette période, le but est de restructurer le sol, de reconstituer ses stocks de nutriments et de remettre en place une activité biologique efficace. Pour cela, la plantation de légumineuses est intéressante : les légumineuses ont en effet la capacité de fixer l'azote atmosphérique ($N_2 \rightarrow NH_3$) et de le rendre biodisponible. Un mélange avec des graminées permet de structurer le sol plus efficacement : en effet, les légumineuses (luzerne, trèfle, lotier...) ont un enracinement en profondeur tandis que les graminées (ray-grass, dactyle, fétuque, fléole, brome...) s'enracinent plus superficiellement. Cette prairie améliorante peut être fauchée et récoltée mais on évitera de faire pâturer des bêtes durant les premières années à cause des risques de tassement par piétinement, les sols n'étant pas encore suffisamment structurés.

Avant la mise en culture définitive, on peut effectuer un broyage et un retournement afin de jouer un rôle d'engrais vert. Le respect de cette période de convalescence assure de meilleurs rendements à long terme.

Prairie à vocation écologique

Les semis commercialisés sont adaptés au développement de prairies de fauche ou de pâture, mais pas de prairies favorisant la biodiversité. Afin de mettre en place ce type de prairie il faut donc réussir à se procurer en quantité importantes des graines d'espèces variées pouvant former un cortège floristique. Une piste de réflexion pour ce type de projet est l'utilisation de résidus de fauches de prairies naturelles. Cette technique a été utilisée sur le site de GSM à Balloy, en Seine et Marne : suite à une fauche d'entretien d'une prairie classée ENS (Espace Naturel Sensible), les résidus de fauche récoltés ont pu être répandus sur le terrain géré par GSM qui était alors recouvert par une prairie fourragère. Cette opération, effectuée deux fois, a eu pour effet une nette amélioration de la biodiversité par rapport au milieu initial de culture intensive. Des individus isolés d'espèces de la prairie de fauche, dont des espèces patrimoniales ont réussi à s'installer.

Une autre possibilité pour favoriser la diversité dans les prairies est de varier les épaisseurs de terre remises en place. En effet, Bowen et al. (2005) et Redente et al. (1997) démontrent que les cortèges floristiques se développant sur les parcelles réaménagées varient en fonction de l'épaisseur de terre superficielle (mélange de terre végétale et des stériles de découverte) : les sols les plus profonds sont recouverts majoritairement par des graminées vivaces compétitives tandis que les sols plus minces permettent aux herbacées non graminées moins compétitives mais plus diversifiées de se développer.

B/ Réaménagement forestier :

Le choix des essences adaptées au réaménagement est délicat. Il est donc fortement recommandé de faire appel à un forestier et à un pépiniériste, et cela dès le début du projet. En effet, il faut définir suffisamment à l'avance quels seront les arbres nécessaires, afin de laisser le temps au pépiniériste de se les procurer ou de les faire pousser correctement.

Les arbres à replanter se présentent sous deux formes : soit à racines nues, soit en conteneur. Les premiers sont cultivés en terre pendant plusieurs années (jusqu'à 5 à 6 ans) avant d'être déterrés et vendus, tandis que les seconds sont cultivés dans des conteneurs de terreaux individuels pendant une saison de végétation (afin

que les racines ne se développent pas trop dans le godet et se déforment). Les arbres en conteneurs suffisamment vastes (>400 cm³) sont préférables : malgré un coût plus élevé, leur mortalité est plus faible que ceux à racines nues. Cela est dû au bon état de leur système racinaire, protégé par le conteneur. Ainsi, une fois planté, l'arbre n'a pas à recréer de nouvelles racines pour se procurer eau et nutriments et le phénomène de crise de transplantation est donc moins rare. Le surcoût initial est donc compensé par les plus faibles dépenses ultérieures pour remplacer les plants décédés.

Si la parcelle à replanter est de mauvaise qualité, il peut être intéressant de sélectionner des plants inoculés : ils possèdent des associations symbiotiques avec des champignons (mycorhizes) ou des bactéries qui leur permettent d'améliorer leurs capacités à prélever des nutriments dans le sol, de mieux se protéger contre certains pathogènes, de supporter plus efficacement les périodes de sécheresse et de résister à des teneurs en éléments nocifs plus élevées. Là encore, le surcoût initial est amorti par la plus faible mortalité des plants.

Afin de protéger les jeunes plants du broutage par la faune, des grillages individuels doivent être installés. Un autre danger est la concurrence de la strate herbacée : celle-ci peut d'une part limiter la photosynthèse du jeune plant, mais surtout consommer une grande quantité d'eau à ses dépens. Un entretien régulier de la strate herbacée entre les lignes de plantation est donc nécessaire, notamment durant les premières années. Les plants en conteneur, plantés plus jeunes et donc plus petits que ceux à racines nues nécessitent un entretien plus rigoureux de la strate herbacée.

Enfin, une attention particulière doit être portée sur la présence éventuelle de plantes invasives (Renouée du Japon, Robinier faux-acacia, Berce du Caucase, Balsamine de l'Himalaya...) et il faut les éliminer rapidement selon le protocole adéquat en évacuant les déchets de coupe. Le respect des protocoles est très important car une simple fauche sans précautions particulières peut parfois se révéler contre-productif, du fait des capacités de dispersion importantes de ces plantes : par rejets (Robinier faux-acacia) ou à partir de fragments de rhizomes (Renouée du Japon). Cette dispersion étant souvent exponentielle, il convient donc de traiter le problème le plus tôt possible.

4°) Conclusion :

Les principaux points garantissant la réussite d'un réaménagement par remblaiement sont donc :

- La planification : chaque étape doit être réalisée pendant une période précise afin de perturber le moins possible la faune, de limiter la compaction des terres, d'assurer une reprise efficace des semis ou arbres plantés. Il est donc nécessaire de planifier à l'avance ces opérations, en gardant cependant une marge de manœuvre pour pouvoir modifier le programme en cas d'imprévu (semaine pluvieuse empêchant la manipulation des terres, ou modification du plan de phasage).
- Le plan de phasage : pour que le réaménagement soit optimal, il doit coordonner au maximum les opérations de décapage avec celles de remblaiement afin de minimiser les manipulations de terre et les volumes de terres en stockage.
- Le respect des préconisations pour les opérations de manipulation ou de stockage des terres afin de limiter leur dégradation.
- La prise en compte des caractéristiques des parcelles pour adapter le projet de réaménagement : le caractère humide de la parcelle, la nature des sols, les antécédents cultureux, la topographie...
- La concertation avec les différents intervenants du projet afin d'en assurer la réussite :
 - Les ouvriers afin de leur faire comprendre comment ils affectent la qualité des sols et comment ils peuvent limiter leur impact
 - Les exploitants agricoles : il faut leur expliquer que les parcelles qui leur sont restituées sont en convalescence et qu'il convient donc d'adapter les pratiques culturales qui y sont mises en place.
 - Les responsables d'exploitation afin que la problématique de la qualité des sols soit prise en compte dans l'élaboration des plans de phasage.

II] Etat des lieux : réaménagements déjà réalisés

Afin d'évaluer l'état des réaménagements par remblaiement déjà réalisés, une série de sondages pédologiques a été faite dans un premier temps afin de déterminer la nature des sols, suivie de prélèvements d'échantillons afin de pouvoir effectuer des analyses chimiques.

1°) Présentation des parcelles

A/ Vigneulles

Les Sables :

Située à l'Est de la commune de Vigneulles, la parcelle des Sables (17ha) a été exploitée pour la production de granulats entre 1996 et 2009. Elle a été réaménagée sous forme de plan d'eau dans sa partie Nord et remblayée en prairie au Sud (Figure 8).

Pour le remblaiement, des remblais externes inertes ont été recouverts des matériaux extraits sur place lors de la découverte : terres de découvertes puis terre végétale. Cependant, ces matériaux ont parfois été mal gérés (terre végétale utilisée pour le remblaiement), ce qui a entraîné des déficits de matériaux dans les dernières étapes du réaménagement. Afin de compenser cela, de la terre végétale a été importée d'autres sites, notamment celui de Farampré qui est très proche.

La végétation se développant est celle d'une prairie de fourrage classique, localement humide : graminées (fétuque et ray-grass), cardamine des prés, trèfle blanc, marguerites, plantain, pissenlit et également quelques joncs et des iris des marais dans les zones humides.

Le Breuillot :

Le Breuillot est une parcelle qui borde celle des Sables à l'Ouest (Figure 8), mais qui n'a jamais été exploitée. Actuellement, elle est gérée en prairie de fourrage classique : fétuque, ray-grass, pissenlit, plantain, trèfle blanc.



Figure 8 : Parcelle des Sables, réaménagée au Nord en étang (11ha) et en une zone prairiale au Sud (17ha). Le Breuillot est la prairie à l'Ouest. L'implantation des points de sondage est indiquée.

Les sondages et analyses effectuées à cet endroit ont servi de témoin, puisque les sols n'ont pas été excavés.

Farampré :

La parcelle de Farampré (Figure 9), après avoir été exploitée en 1988 pour l'extraction de granulats, a servi de bassin de décantation des eaux de traitement de l'installation : le bassin s'est alors progressivement rempli de particules de tailles variables (allant du sable aux argiles). La terre végétale de la parcelle ayant été utilisée pour le réaménagement de celle des Sables, il n'a pas été possible d'en remettre à la fin du réaménagement : la végétation se développe directement sur les matériaux issus de la décantation.



Figure 9 : La parcelle de Farampré et l'implantation des points de sondage.

Suite à des engorgements à répétition de la parcelle pendant l'hiver, des tranchées d'1m/1m20 de profondeur remplies de galets pluri-décimétriques ont été aménagées afin d'améliorer la drainance du terrain.

La parcelle est actuellement cultivée en prairie, la végétation s'y développant est donc majoritairement constituée de graminées avec également quelques pissenlits, oseille, trèfles blancs, et plus localement d'une herbe plus touffue et de joncs (autour de S4).

B/ Tonnoy

Le site de Tonnoy a été excavé pour la production de granulats. L'exploitation a commencé en 1995 et la parcelle a été restituée une fois le réaménagement finalisé en 2011.



Figure 10 : La parcelle de Tonnoy, reboisée au Nord et réaménagée en prairie dans la partie Sud. Les points de sondages sont indiqués.

La partie Sud-Est (5ha) a été réaménagée en prairie, avec réensemencement par canon hydraulique (ray-grass, fétuque, trèfle et luzerne) tandis que la partie Nord-Ouest a quant à elle été réaménagée en bois, par plantation de jeunes bouleaux, aulnes, frênes et saules (Figure 10). La partie la plus au Nord-Ouest (du

portail d'accès jusqu'à la pointe de la parcelle) a été excavée sur environ 80cm après la fin du réaménagement à la suite d'une mise en demeure de VNF (Voies navigables de France) afin de redescendre à la cote initiale.

2°) Sondages pédologiques

Les sondages ont été réalisés à l'aide d'une tarière manuelle, avec un espacement entre 50 et 100 mètres entre chaque point de sondage afin d'avoir une répartition la plus homogène possible. Les profils observés ont été regroupés en profils types selon leurs similitudes afin de synthétiser les résultats.

Excepté ceux observés sur la parcelle du Breuillot, les sols sont tous des anthroposols reconstitués (Référentiel Pédologique), car ils sont issus de la superposition récente et artificielle de matériaux de natures différentes.

A/ Vigneulles, les Sables

Profil-type 1 : (sondages S1 à S16) (Figure 11)

L'horizon superficiel, entre 5 et 10cm, est un horizon brun à texture grumeleuse, présentant une activité biologique correcte. On y trouve quelques galets siliceux et du sable fin. Les racines fines sont très nombreuses et le structurent. Cet horizon correspond à la fine couche de terre végétale remise en place lors des travaux de réaménagement.

Au-delà, le second horizon apparaît. Epais d'environ 40cm (entre 25 et 50cm), il est d'un brun plus clair et de texture sablo-limoneuse à limono-sableuse. La pierrosité se limite à quelques galets siliceux centimétriques. Les racines présentes sont fines et s'enfoncent rarement au-delà de 20cm de profondeur. Quelques rares traces d'oxydation existent le long des racines, mais pas forcément sur tous les points de sondages. Cet horizon correspond aux terres de découverte limoneuses remises au sommet des remblais.

Le passage à l'horizon suivant se fait assez nettement et se caractérise principalement par le changement de texture : la texture devient sableuse à sablo-limoneuse, avec une forte teneur en galets siliceux centimétriques. L'oxydation y est légèrement plus marquée, même si elle reste non significative. Il est généralement impossible d'en observer plus de 10cm car la tarière est bloquée. C'est là le sommet des matériaux de remblai. Il est très probable que cet horizon soit très variable, mais il est difficile de l'observer en profondeur.

Les traces d'oxydation étant rares au-dessus de 50cm de profondeur, les sols de la zone ne sont pas marqueurs d'une zone humide selon l'Arrêté du 24 Juin 2008 modifié par l'Arrêté du 1^{er} Octobre 2009, quand bien même des marques d'oxydation et/ou de réduction importantes apparaîtraient plus profondément (les sols seraient alors dans la classe d'hydromorphie III du GEPPA) (Annexe 3).

Au point de sondage S2, on observe une variation de l'horizon profond (remblais) : la texture est plus argileuse et les marques d'oxydation sont importantes, ce qui dénote une hydromorphie. Cependant, la



Figure 11 : Les Sables, photographie du profil au sondage S12.

végétation à cet endroit ne diffère pas de celle à l'emplacement des points de sondages, ce qui semble indiquer que le phénomène n'est pas trop marqué.

Profil-type 2 : (sondage S17) (Figure 12)

Le point de sondage S17 a volontairement été réalisé en dehors du quadrillage initial, afin de pouvoir étudier le sol en place dans cette petite zone caractérisée par une végétation hygrophile : joncs, iris des marais, mousses et quelques algues. Une légère dépression dans la topographie (à peine 10 centimètres) est observable à cet emplacement.

Le profil est humide au toucher sur toute la hauteur et la nappe phréatique apparaît dès 40 centimètres de profondeur. En outre, aucune pédofaune n'a été observée.

Le premier horizon, épais d'environ 5cm, est brun gris et contient des galets siliceux centimétriques. Des traces d'oxydation sont présentes le long des racines. Il correspond à la terre végétale remise en place et fortement affectée par les phénomènes d'hydromorphie.

Le second horizon apparaît aux alentours de 5cm de profondeur, et s'étend jusqu'à 40cm. Il est gris, de texture limono-argileuse, contient quelques galets centimétriques et présente quelques taches d'oxydation. Il correspond aux terres de découvertes remblayées et affectées par

l'hydromorphie de la zone.

Le passage au troisième horizon se fait à 40 centimètres. Il est argilo-sableux, très pâle et présente quelques traces d'oxydation. A 65cm, la tarière est bloquée par des galets pluri-centimétriques.

Présentant dès les premiers centimètres des indices de phénomènes réductiques, ce profil correspond à la classe VI d'hydromorphie du GEPPA (Annexe 3), ce qui en fait un sol de zone humide.

B/ Vigneulles, le Breuillot

Profil-type : (Figure 13)

Le premier horizon est un horizon organo-minéral sombre, grumeleux, présentant une forte activité biologique ainsi que de nombreuses racines fines. Il contient moins de sable que la parcelle remblayée et quelques galets. Aucune oxydation n'est observée.

Le passage au second horizon se fait aux alentours de 35cm de profondeur. Ce second horizon est un horizon de transition : la teinte passe de brun foncé à brun ocre et la texture de limoneuse à sablo-limoneuse. Les traces d'oxydation font leur apparition progressivement.

L'horizon suivant s'installe aux environs de 60cm de profondeur (80cm pour A). C'est un horizon sablo limoneux bien oxydé.



Figure 12 : Les Sables, photographie du profil au sondage S17.

Le dernier horizon se met en place plus en profondeur (100, 105 et 70cm de profondeur respectivement pour A, B et C). C'est un horizon sableux, contenant de nombreux graviers (pas dans le cas de A), et présentant des teintes pâles propres aux horizons réductiques (pas dans le cas de B).

La nappe phréatique est atteinte sur deux sondages : à 100cm sur le sondage A et à 65cm sur C.

Dans la classification du Référentiel Pédologique, ces sols correspondent à un Fluviosol brunifié - Rédoxisol. Au point de vue du caractère humide, ils appartiennent à la classe d'hydromorphie IIIc du GEPPA (Annexe 3), ce qui les exclut des sols dits de zone humide définis par l'Arrêté du 24 Juin 2008 et modifié par l'Arrêté du 1^{er} Octobre 2009.

C/ Vigneulles, Farampré

Il est délicat d'établir un profil type des sols en place sur la parcelle de Farampré. En effet, la parcelle étant un ancien bassin de décantation, la nature du matériau varie très vite à la fois latéralement et verticalement. Toutes les gammes de granulométrie sont ainsi rencontrées, parfois sur un même profil : des argiles aux sables grossiers, les horizons limono-sableux ou sablo-limoneux étant malgré tout majoritaires. Des galets siliceux pluri-centimétriques sont aussi présents dans la plupart des profils.

Cependant, les 5 différents profils réalisés partagent des caractéristiques communes :

- Ils sont une accumulation de matériaux de décantation de toutes granulométries, avec une plus forte proportion des matériaux limono-sableux ou sablo-limoneux, ainsi que quelques galets siliceux centimétriques. De fines strates argileuses centimétriques se retrouvent dans le profil.
- Une absence de terre végétale, compensée progressivement par le développement d'une fine couche plus riche en matière organique au sommet du profil par l'activité biologique sur la parcelle et son amendement.
- Une oxydation significative, dès 20cm de profondeur et s'intensifiant avec la profondeur, ce qui en fait des sols de zone humide de classe d'hydromorphie V selon les critères du GEPPA (Annexe 3).

Ces variations de texture des horizons ont une influence directe sur la dégradation de la matière organique et son brassage dans le sol : les sondages S3, S4 et S5 qui possèdent un horizon de surface plus sableux (qui limite l'activité des vers de terre) se caractérisent par une fine épaisseur de matière organique très peu décomposée qui s'accumule. Au contraire, dans les profils S1 et S2 possédant un horizon superficiel plus limoneux, on ne voit pas cette accumulation nette en surface, la matière organique étant plus efficacement incorporée aux horizons superficiels au fur et à mesure, principalement grâce à l'action des vers de terre.



Figure 13 : Le Breuillot, photographie du profil au sondage B

D/ Tonnoy, prairie

Profil-type : (Figure 14)

La prairie est constituée de graminées, trèfles, chardons et quelques jeunes saules, mais également de joncs localement.

Le premier horizon s'étend jusqu'à 10 centimètres de profondeur. Il est brun grisâtre, légèrement grumeleux, et contient de très nombreuses racines fines, quelques galets siliceux centimétriques et de légères traces d'oxydation le long des racines. Les vers de terre y sont assez nombreux. Cet horizon correspond à la terre végétale remis en place à la fin du réaménagement.

L'horizon suivant apparaît après une transition rapide. Il est brun ocre, de texture limoneuse à limono-sableuse. Les racines ne persistent que sur les premiers centimètres de l'horizon. La pierrosité est variable, pouvant être localement pluri centimétrique. Des traces d'oxydation sont présentes. Cet horizon semble correspondre aux matériaux de découverte remis au sommet des remblais.

Au-delà de 50/60 centimètres de profondeur, transition rapide vers un horizon beaucoup plus sableux et pâle, marqué par une pierrosité importante (en taille et en proportion) bloquant rapidement les sondages. Ce dernier horizon correspond aux remblais externes.



Figure 14 : Tonnoy prairie, profil au sondage S3.

E/ Tonnoy, zone reboisée

Sur les 8 sondages réalisés sur cette zone, il n'a pas été possible de regrouper de manière convenable les profils les uns avec les autres, les sols étant très hétérogènes. Cette hétérogénéité a d'ailleurs un impact visible sur la végétation (Figure 15) :

- Des roselières se développent à l'extrémité Nord de la parcelle (sondage S1). Dans cette zone, la circulation des engins de travaux pendant la remise à niveau après la fin des travaux de réaménagement a entraîné un tassement des terrains (au moins de manière superficielle) limitant leur perméabilité.
- Des bosquets denses de jeunes saules se développent aux endroits où le sol est profond et la pierrosité raisonnable, par exemple à la verticale des sondages S4 et S5. Dans ces zones, les arbres plantés poussent bien, mais la pression exercée par les autres arbres apparus spontanément pourrait à terme leur porter préjudice.
- Des étendues de hautes herbes se développent dans des zones où la pierrosité est importante (sondages S2, S3, S6, S7 & S8) et qui entraîne une drainage forte qui empêche les saules de se développer. Les arbres plantés poussent plus ou moins bien, selon leurs essences, la pierrosité et l'épaisseur de terre végétale.
- Des espèces pionnières des milieux pauvres colonisent peu à peu les zones les plus arides où les remblais sont à jours, formant des pierriers (entre S2 et S3): Tussilage, Robinier faux-acacia, colonies de nostoc...

Au point de vue écologique, cette hétérogénéité n'est pas forcément dérangeante, au contraire : elle va permettre à un grand nombre d'espèces différentes de s'installer. Cependant, le réaménagement n'est pas en accord avec le projet initial qui prévoyait un reboisement à base de saules, bouleaux, aulnes et frênes.



Figure 15 :
Photographies des différents types de végétation
en place sur la parcelle de Tonnoy : roselière (A),
bosquet dominé par les jeunes saules (B), zone
d'herbes hautes (C) et pierrier (D)
(Mars 2014)

3°) Analyses chimiques

La parcelle de Tonnoy n'a pas fait l'objet de prélèvements afin de réaliser des analyses à cause de la forte hétérogénéité de la zone reboisée et car il n'y a pas de prairie témoin à proximité immédiate.

Les 7 échantillonnages ont donc été réalisés à Vigneulles, les 16 et 17 juin :

- Les Sables : un échantillon de surface (5 centimètres), un des terres de découverte (30/40 centimètres), et un dans la zone humide (S17)
- Le Breuillot : un échantillon de surface (5 centimètres) et un du second horizon (40/50 centimètres)
- Farampré : un échantillon de surface (5 centimètres) et un des terres de découverte (30/40 centimètres)

Chaque échantillon est issu du mélange de plusieurs sous échantillons afin de réduire les biais qui pourraient être dus à un mauvais échantillonnage sur le terrain. Une fois les échantillons collectés, le laboratoire SadeF s'est chargé des analyses chimiques. Les méthodes utilisées pour chaque analyse sont spécifiées en Annexe 1.

Les résultats des analyses ont été compilés sous la forme de tableaux :

Echantillon	Refus à 2 mm (%)	Argile (‰)	Limon (‰)	Sable (‰)	Texture (USDA) (cf Annexe 2)
Les Sables, horizon supérieur	3,5	274	189	537	Limon argilo-sableux
Les Sables, horizon inférieur	36,0	254	180	566	Limon argilo-sableux
Les Sables, zone humide, horizon inférieur	15,0	127	191	682	Limon sableux
Farampré, horizon supérieur	8,9	240	252	508	Limon argilo-sableux
Farampré, horizon inférieur	24,0	290	278	432	Limon argileux
Le Breuillot, horizon supérieur	14,0	342	231	427	Limon argileux
Le Breuillot, horizon inférieur	13,0	238	219	543	Limon argilo-sableux

Echantillon	pH eau	Carbonates totaux (‰)	CEC (me/kg)	P ₂ O ₅ (‰)	K ₂ O (‰)	MgO (‰)	CaO (‰)	Na ₂ O (‰)
Les Sables, horizon supérieur	7,4	3,0	185	0,20	0,44	1,10	5,52	0,059
Les Sables, horizon inférieur	7,5	7,3	178	0,13	0,16	0,92	4,60	0,071
Les Sables, zone humide, horizon inférieur	8,2	22,0	99	0,11	0,12	0,38	8,35	0,069
Farampré, horizon supérieur	6,9	2,3	145	0,10	0,22	0,94	3,41	0,030
Farampré, horizon inférieur	7,5	2,1	176	0,05	0,20	1,06	3,92	0,027
Le Breuillot, horizon supérieur	7,3	11,0	292	0,13	0,10	1,57	9,31	0,051
Le Breuillot, horizon inférieur	7,8	3,3	153	0,02	0,07	0,95	5,13	0,019

Echantillon	N _{total} (‰)	Rapport t C/N	COT (‰)	MO (‰)	C _{microbien} (mg/kg)	Statut organique (g C _{mic} /100g COT)
Les Sables, horizon supérieur	2,30	10,0	23,1	40,0	76,6	0,33
Les Sables, horizon inférieur	1,75	9,3	16,3	28,2	75,7	0,46
Les Sables, zone humide, horizon inférieur	0,65	12,0	8,1	13,9	60,7	0,75
Farampré, horizon supérieur	1,79	10,0	19,3	33,4	31,9	0,17
Farampré, horizon inférieur	1,02	9,8	10,0	17,4	94,7	0,94
Le Breuillot, horizon supérieur	7,29	9,0	65,8	113,0	87,2	0,13
Le Breuillot, horizon inférieur	2,22	8,4	18,7	32,3	83,9	0,45

Ces résultats révèlent des informations importantes pour la compréhension des parcelles :

- Hormis une teneur en éléments grossiers (>2mm) plus importante en profondeur (jusqu'à 36% aux Sables), les terrains remblayés sont proches au niveau granulométrique du sol témoin du Breuillot. Ces éléments grossiers proviennent probablement de mélanges accidentels avec les remblais sous-jacents lors de la manipulation des terres.
- Les sols ont tous un pH légèrement basique à basique, le sol en zone humide ayant le pH le plus élevé probablement à cause de sa forte teneur en carbonates
- Au niveau de la répartition en nutriments, il existe moins de variations verticales sur les sols réaménagés que sur le sol naturel : les processus de pédogenèse n'ont pas encore affecté et mobilisé les nutriments
- Les teneurs en matière organique et en azote sont environ 3 fois plus élevée au Breuillot (le sol était d'ailleurs bien plus sombre) que sur les parcelles réaménagées : les processus de décomposition de la matière organique et son intégration au profil se fait plus efficacement et sur une épaisseur plus importante
- Étonnement, les teneurs en micro-organismes varient peu (hormis en surface sur Farampré où la teneur en carbone microbien est la plus faible). Les souches bactériennes sont cependant peut-être de natures très différentes, mais cela n'a pas été vérifié.

Les analyses ne montrent pas de déficits majeurs en nutriments, mais il semble que les processus de pédogenèse n'ont pas encore réellement affecté les sols réaménagés (étonnante homogénéité des 40 premiers centimètres), ce qui est cohérent avec le fait que les sols n'ont qu'entre 5 et 15 ans.

Actuellement l'intégration de la matière organique aux sols réaménagés n'est pas encore parfaite, mais cela devrait s'arranger progressivement puisque leur activité biologique est bonne.

4°) Conclusion

Les observations faites sur le terrain ainsi que les analyses chimiques réalisées permettent de dresser un bilan des travaux de réaménagements :

- Les Sables
 - La prairie se développe correctement et ne laisse pas deviner au premier abord les modifications majeures qu'ont subies les sols
 - La petite zone à végétation hygrophile s'explique par l'accumulation de deux facteurs : une légère dépression qui concentre les eaux ainsi que des remblais localement plus argileux et donc étanches
 - Les épaisseurs de terre végétale et de terres de découverte sont relativement faibles : respectivement 5 à 10cm et 40cm. Ces lacunes obligent les agriculteurs à assurer des amendements réguliers
- Farampré
 - La végétation se développe correctement mais le cortège floristique est moins diversifié que celui de la parcelle voisine des Sables. Cela s'explique par l'absence totale de terre végétale lors du réaménagement. La parcelle est en convalescence : l'horizon organique doit se reconstituer avant de pouvoir envisager un usage agricole, cependant l'engorgement récurrent l'hiver ne favorise pas cette régénération. Un amendement régulier est nécessaire.
 - Le caractère humide de la parcelle est dû aux strates argileuses qui limitent la drainance.
 - Même si ce réaménagement n'est pas parfait, il prouve qu'il est possible de réaménager des anciens bassins de décantation. Cependant, les procédés de traitement des granulats ont été optimisés et dorénavant les eaux rejetées dans les bassins de décantation contiennent presque

exclusivement des particules fines. Les futurs réaménagements de bassins de décantation seront donc peut être encore plus délicats à réaliser...

- Tonnoy, prairie
 - Le réaménagement donne les résultats attendus et la prairie pousse correctement, avec un amendement azoté
- Tonnoy, zone reboisée
 - Le reboisement de la parcelle n'est pas satisfaisant puisqu'une partie des arbres plantés n'ont pas repris.
 - Cela s'explique par des plantations tardives (les arbres n'ayant pas eu le temps de reconstituer leur réseau racinaire avant les sécheresses estivales), et par la forte hétérogénéité du réaménagement. En effet, les épaisseurs des profils varient grandement, ainsi que leur pierrosité : par endroits les arbres n'ont pas d'espace suffisant pour l'exploration racinaire et trouver des nutriments et des réserves hydriques.
 - La remise à niveau de l'extrémité Nord s'est faite en enlevant l'horizon organique et a causé des tassements, ce qui explique le caractère humide de cette zone.

Les principaux problèmes des réaménagements étudiés concernent la terre végétale : l'épaisseur remise en place est faible (Les Sables et zone prairiale à Tonnoy), voire inexistante par endroits (Farampré et certaines zones reboisée à Tonnoy). La terre végétale étant la partie du sol la plus active biologiquement parlant, cela se répercute inévitablement sur la diversité de la végétation et son développement.

Ces lacunes s'expliquent principalement par des problèmes de gestion : les travaux de décapage ont parfois eu lieu dans de mauvaises conditions (Tonnoy) et aucun stockage de terres n'a été réalisé.

Le même constat peut être fait pour les terres de découverte, bien que les problèmes soient moins sérieux pour cet horizon d'après les observations faites sur le terrain.

III] Conclusion : préconisations pour améliorer les réaménagements

1°) Comparaison entre théorie et pratique

En comparant les protocoles ayant été mis en place pour le remblaiement des parcelles et ceux préconisés, on constate qu'il existe des décalages importants sur certains points :

- Les opérations de décapage (et plus généralement de manipulation des terres) n'ont pas toujours été faites dans les conditions optimales, c'est-à-dire lorsque la terre était ressuyée
- Les terres n'ont pas été stockées, même lorsque cela était préférable à une réutilisation immédiate
- Aucun rippage n'a été réalisé au sommet des remblais
- La plantation des arbres à Tonnoy n'a pas eu lieu aux périodes prévues
- Des engins lourds ont circulé sur le sol à Tonnoy lors de la remise à niveau d'une partie de la parcelle après la fin du réaménagement
- Les parcelles ont été remises en culture sans passer par une période de convalescence

Il est normal que des différences existent entre la théorie et la pratique, car le cas théorique est souvent irréalisable en termes techniques et financiers. Cependant, les différences citées ci-dessus sont suffisamment importantes pour avoir affecté la qualité du réaménagement. Les principaux problèmes en découlant sont :

- De trop faibles épaisseurs de matériaux de remblaiement
- Une mortalité élevée des arbres plantés sur certaines zones à Tonnoy
- L'apparition de zones humides

2°) Mesures à mettre en place

Les solutions à mettre en place prioritairement pour résoudre les problèmes mis en avant lors des études de terrain sont :

- Le respect des consignes pour la manipulation des terres : par temps sec à la pelle hydraulique à chenille circulant sur les remblais. L'utilisation du bulldozer n'est pas souhaitable car celui-ci circule sur l'horizon qu'il régale. Si malgré tout le bulldozer est utilisé, il faut qu'il soit équipé de chenilles larges.
Cela permettra de maximiser les volumes de terres végétales et de découvertes réutilisables pour le remblaiement et de limiter leur tassement.
- La constitution de stocks de terre végétale et de stériles de découverte pour les premières zones décapées et lorsque la réutilisation immédiate est impossible, selon les méthodes présentées précédemment. Cela permettra de mieux gérer les volumes de terres végétales extraites et d'éviter leurs pertes, tout en conservant leurs propriétés agronomiques.
- La mise en place de périodes de convalescence en collaboration avec les exploitants et les propriétaires en leur faisant comprendre l'intérêt à long terme pour les rendements de la parcelle.

D'autres mesures sont importantes à mettre en place dans certains cas pour résoudre des problèmes précis mais non généralisés à toutes les parcelles :

- Un rippage au sommet des remblais avant de régaler les terres de découverte pour les terrains remblayés avec des matériaux fins, ou compactés par des passages d'engins mal coordonnés afin de favoriser la drainance et la prospection de racines.
- L'usage de plants inoculés (microbes ou mycorhizes) est une piste intéressante pour améliorer les taux de reprise des jeunes plants. Ces arbres sont plus chers à l'achat, mais permettent de limiter les coûts d'entretien ultérieurs, surtout dans le cas de terrains pauvres où le taux de reprise des plants est plus faible. Leur usage est donc à réserver pour des sites à reboiser qui ne possèdent pas des qualités agronomiques optimales

- La réalisation de fossés drainants permet de résoudre de manière rapide les problèmes d'engorgements chroniques s'ils sont correctement réalisés. Ils peuvent être ménagés pendant le réaménagement ou plus tard, une fois le phénomène d'engorgement constaté.
- Eliminer les éléments les plus grossiers (>10 centimètres) lors du régalage des horizons de surface si leur proportion est élevée. Si l'excavation des terres ainsi que leur manipulation a été correctement effectuée, il n'y a normalement pas de raison de se retrouver avec une pierrosité plus importante qu'au départ.
- Un entretien des espaces reboisés dans les premières années suivant la plantation afin d'assurer une reprise rapide des plants. Une attention particulière doit être portée à l'élimination des plantes invasives.

IV] Bibliographe

- BARTHES Bernard G., MANLAY Raphaël J., PORTE Olivier. Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cah agric.* 2010, vol.19, n°4, p.280/287.
- BOWEN C.K., SCHUMAN G.E., OLSON R.A., INGRAM J. Influence of topsoil depth on plant and soil attributes of 24-year old reclaimed mined lands. *Arid land research and management.* 2005, vol.19, p.267/284.
- BOYER Stephane, WRATTEN Stephen, PIZEY Mark, WEBER Paul. Impact of soil stockpiling and mining rehabilitation on earthworm communities. *Pedobiologia – International journal of soil biology.* 2011, p.99/102.
- REDENTE E.F., McLENDON T., AGNEW W. Influence of topsoil depth on plant community dynamics of a seeded site in northwest Colorado. *Arid soil research and rehabilitation.* 1997, vol.11, p.139/149.
- STROHMAYER Patti. Soil stockpiling for reclamation and restoration activities after mining and construction. *Restoration and reclamation review.* 1999, Vol.4, No.7, 6p.
- VANPEENE-BRUHIER Sylvie, PIEDALLU Christian, DELORY Isabelle. Réaménagement agricole des carrières de granulats. *Cemagref editions.* 2002. 160 pages.
- VANPEENE-BRUHIER Sylvie, PIEDALLU Christian, DELORY Isabelle. Réaménagement forestier des carrières de granulats. *Cemagref editions.* 2003. 320 pages.

Réaménagement forestier, prairial ou agricole des carrières de granulats

Résumé :

De nos jours, les carrières sont de plus en plus sollicitées pour remblayer les carrières qu'ils exploitent, pour répondre notamment aux souhaits de certains propriétaires ou à une pression croissante du monde agricole quant à la disparition des terres cultivables. Dans ce contexte, l'entreprise GSM a souhaité faire un bilan des parcelles qu'elle a déjà pu remblayer par le passé, afin de voir s'il était possible d'améliorer le process pour les réaménagements futurs.

Le but du stage était donc de faire un bilan et une analyse des pratiques qui ont été mises en place jusqu'alors, et de proposer un ou plusieurs protocoles selon la finalité du réaménagement en s'appuyant sur des publications scientifiques et les données de terrain, tout en prenant en compte les problèmes de faisabilité technique et économique.

Mots clés : réaménagement, remblaiement, sols, carrières, granulats

ANNEXE 1

Extrait du rapport d'analyse de SadeF listant les différentes méthodes utilisées (normes françaises ou européennes).

CARACTERISATION PHYSIQUE /

	Résultats	Unités	Méthodes
* Refus à 2 mm	14	%	NF ISO 11464
* Argile (fraction < 2µm)	342	o/oo	NFX 31-107 sans décarbonatation
* Limon Fin (fraction >2 µm et < 20 µm)	158	o/oo	NFX 31-107 sans décarbonatation
* Limon Grossier (fraction > 20 µm et <50 µm)	73	o/oo	NFX 31-107 sans décarbonatation
* Sable fin (fraction > 50 µm et < 200 µm)	109	o/oo	NFX 31-107 sans décarbonatation
* Sable Grossier (fraction > 200 µm et < 2mm)	318	o/oo	NFX 31-107 sans décarbonatation

STATUT CALCIQUE pH IPC

	Résultats	Unités	Méthodes
* pH eau	7.3	-	NF ISO 10 390
* Carbonates totaux	11	o/oo	NF ISO 10 693

STATUT ORGANIQUE

	Résultats	Unités	Méthodes
* Carbone organique total	65.8	o/oo	NF ISO 14 235
* Matière organique	113	o/oo	NF ISO 14 235
Carbone microbien	87.2	mg/Kg	FD ISO 14240-2
Statut Organique (g de CMic/100g COrg)	0.13	g /100g	FD ISO 14240-2

* Azote Total	7.29	o/oo	NF ISO 13 878 (méthode DUMAS)
* Rapport C/N	9.0		NF ISO 13 878

PHOSPHORE ASSIMILABLE

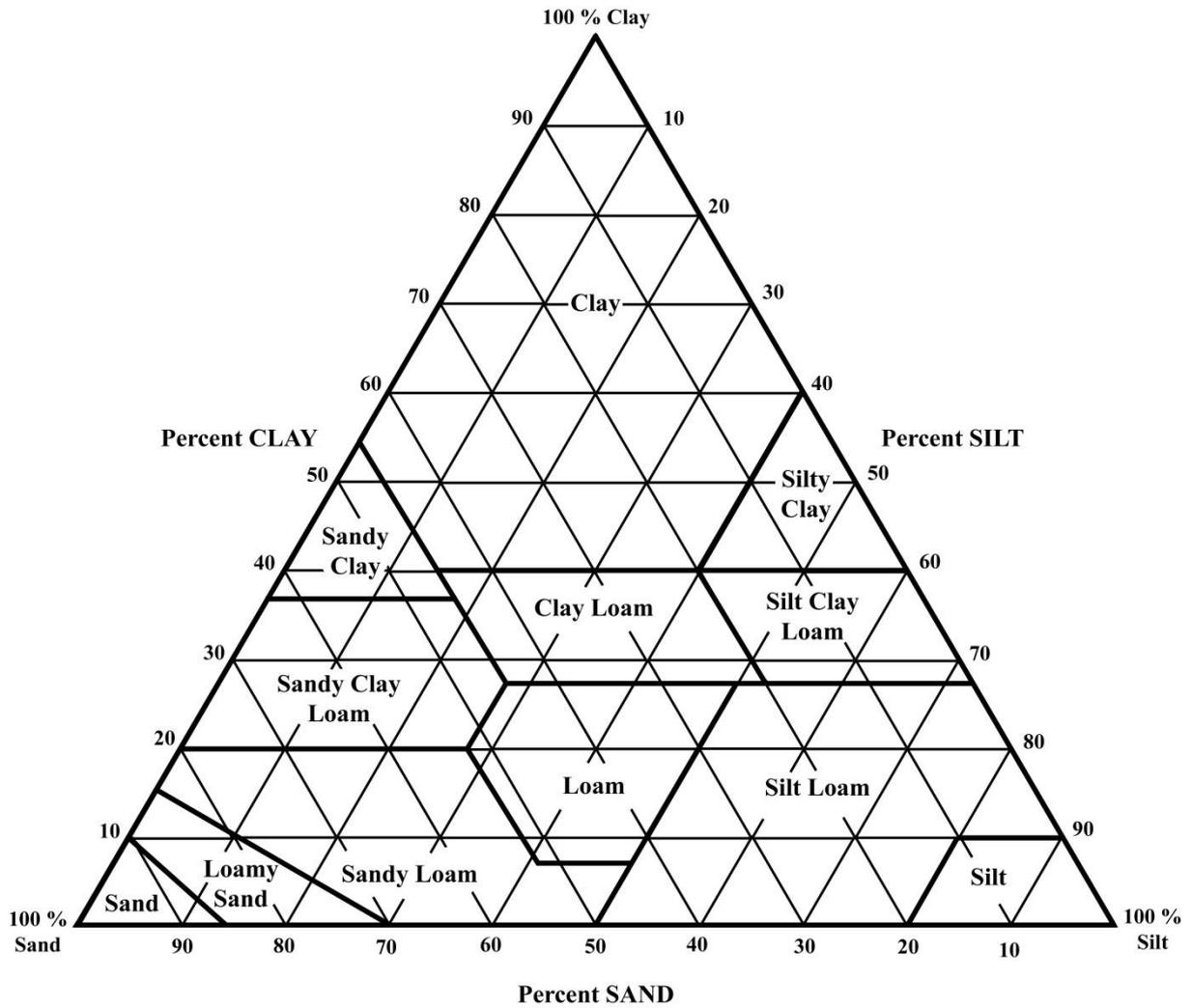
	Résultats	Unités	Méthodes
* Phosphore Joret Hebert (P2O5)	0.13	o/oo	NFX 31-161

COMPLEXE CEC CATIONS ECHANGEABLES

	Résultats	Unités	Méthodes
* CEC Metson	292	me/Kg	NFX 31-130
* K2O échangeable	0.10	o/oo	NFX 31-108 Dosage ICP AES
* MgO échangeable	1.57	o/oo	NFX 31-108 Dosage ICP AES
* CaO échangeable	9.31	o/oo	NFX 31-108 Dosage ICP AES
* Na2O échangeable	0.051	o/oo	NFX 31-108 Dosage ICP AES

ANNEXE 2

Triangle des textures USDA



ANNEXE 3

Classes d'hydromorphie des sols du GEPPA

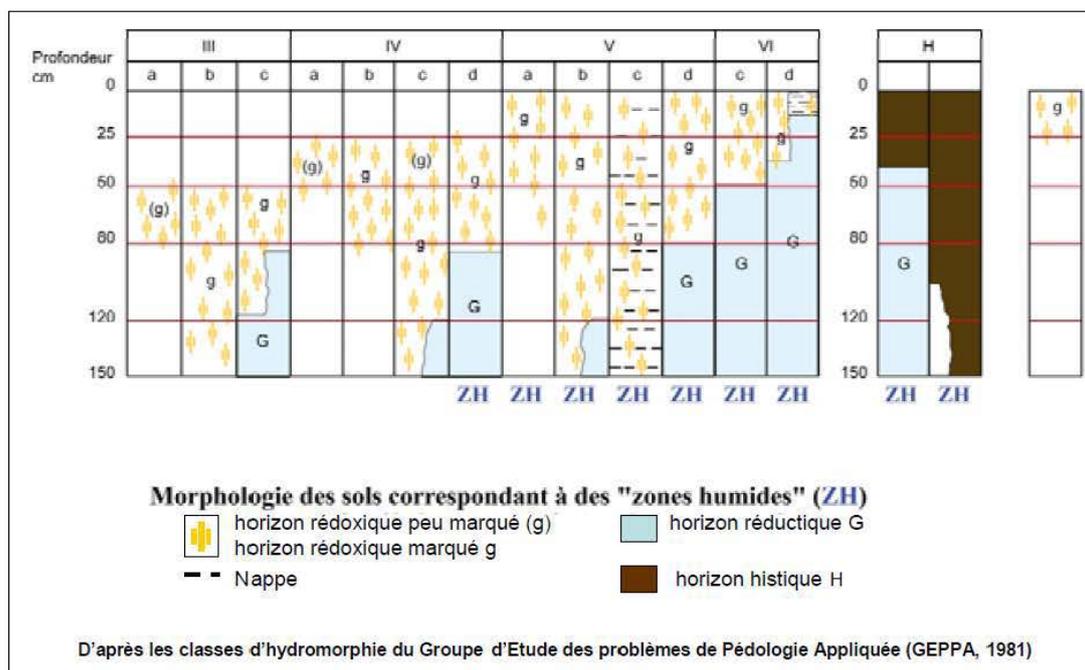


Figure 2 : Classes d'hydromorphie (GEPPA 1981 ; modifié). Les classes Vb, Vc, Vd, VI, H correspondent à des sols de zones humides ; les classes IVd et Va et les types de sols correspondants peuvent être exclus par le préfet de région après avis du conseil scientifique régional du patrimoine naturel