

Utilisation de compost de déchets verts pour la réhabilitation des parcs à cendres volantes : l'exemple de l'ancienne centrale thermique de Pont-sur-Sambre (Nord)

Françoise Dinger et Jean Philippe Falcy

Les parcs à cendres volantes sont des terrils de cendres des anciennes centrales électriques thermiques devant faire l'objet de programmes de réhabilitation. Cet article présente la méthodologie et les essais réalisés pour la végétalisation d'un parc d'une ancienne centrale avec des composts de déchets verts. L'analyse des résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain est commentée ; des perspectives encourageantes sont ouvertes pour la réhabilitation paysagère des sites et la protection du sol contre les phénomènes érosifs.

Aujourd'hui en France, 80 % des besoins en électricité sont couverts par les centrales nucléaires, 15 % par les centrales hydrauliques et le complément est assuré par les centrales thermiques. Dans ces dernières, la combustion du charbon produit des cendres dont une partie peut être valorisée par les cimentiers, mais avec la fermeture progressive des centrales thermiques, des stocks anciens de cendres doivent faire l'objet de programmes de réhabilitation. Il est important de réussir la végétalisation de ces parcs essentiellement pour que les cendres soient « piégées » au sol, car elles se présentent sous la forme d'un produit pulvérulent fin, sensible à l'érosion éolienne. La végétalisation permet à terme d'intégrer ces parcs à leur environnement naturel.

Pour réhabiliter le parc à cendres volantes de Pont-sur-Sambre, Électricité de France (EDF) a souhaité que des essais soient mis en place. Ce substrat étant très particulier, nous avons proposé des essais mettant en œuvre des composts de déchets verts.

L'état des lieux

Le parc à cendres de Pont-sur-Sambre de 7,7 ha de superficie est implanté au cœur d'une Zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF).

Les résidus de combustion ont été produits par la centrale thermique entre 1958 et 1997 (date de sa fermeture) ; le stock restant de cendres a été estimé à environ 900 000 tonnes.

Depuis 1997, ce site fait l'objet d'un vaste programme de reconversion économique (démantèlement des installations industrielles, implantation de nouvelles entreprises) et dans ce contexte, il convient de définir les conditions de réhabilitation du parc à cendres.

Trois grands secteurs caractérisent le terril (carte 1, page 66) : une zone boisée, une zone partiellement végétalisée, une zone en cours d'exploitation, ces deux dernières étant concernées par nos essais.

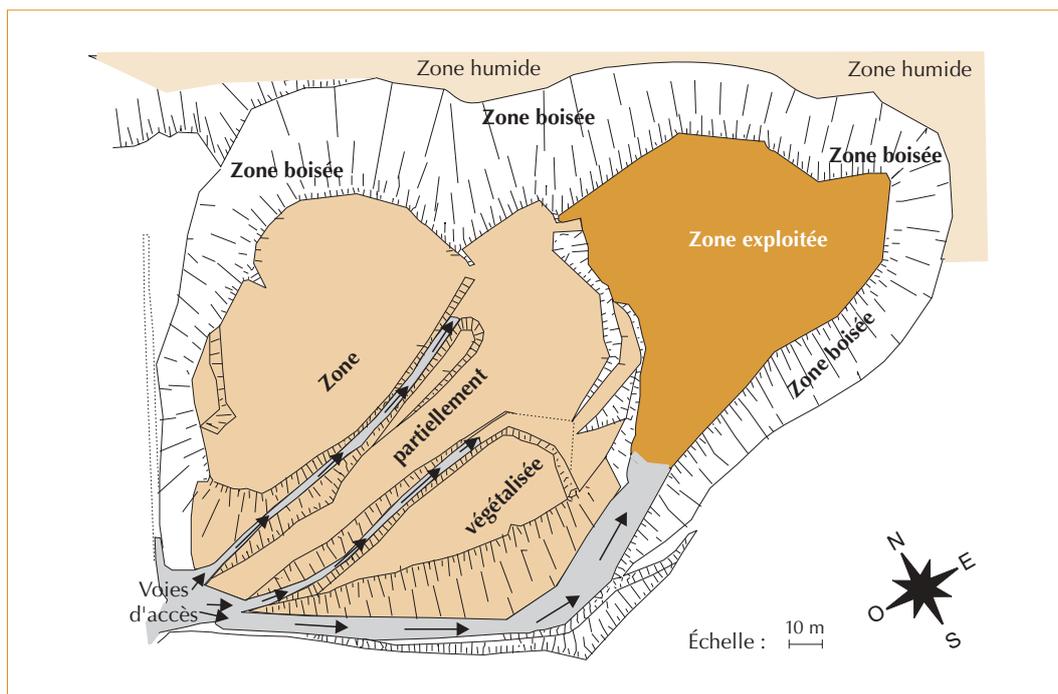
La zone partiellement végétalisée est localisée sur les plateaux supérieurs du terril, elle représente les deux tiers de la superficie totale du parc à cendres. Le couvert végétal spontané est principalement composé d'espèces herbacées. Cette colonisation naturelle des cendres reste néanmoins très limitée dans la mesure où le pourcentage de recouvrement total observé reste en dessous du seuil des 50 %.

Dans **la zone en cours d'exploitation** (photo 1, p. 66), d'importantes quantités de cendres sont prélevées ponctuellement chaque année ; elles sont valorisées comme liant dans le procédé de

Contact

Cemagref
UR Écosystèmes et
paysages
montagnards
BP 76
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

► Carte 1 – Cartographie générale de la végétalisation du parc à cendres de la centrale EDF de Pont-sur-Sambre (fond de carte EDF).



fabrication du ciment. Cette zone fréquemment perturbée se caractérise par l'absence de végétation. C'est cette zone qui, à terme, devrait être végétalisée.

La végétation du parc à cendres

De nombreuses espèces de lichen ont été observées sur le terril. Les conditions de vie particulières régnant sur cette zone ont permis l'installation de certaines espèces végétales méditerranéennes qui peuvent s'accommoder de faibles apports hydriques tout en bénéficiant du réchauffement de la couche superficielle du sol, favorisé par la couleur sombre du substrat.

Enfin, le pH basique des cendres de charbon fait du terril de Pont-sur-Sambre un lieu unique dans la région. Nous avons caractérisé le terril d'un point de vue floristique au travers de nombreux relevés botaniques. Le couvert végétal naturellement présent sur le site se compose d'une soixantaine d'espèces avec essentiellement :

– **la fétuque ovine** (*Festuca ovina*), graminée vivace, héliophile, poussant dans les endroits sablonneux, secs et arides à pH plus ou moins acide ;

– **l'épilobe en épi** (*Epilobium angustifolium*), herbacée vivace, héliophile, colonisant les sols remués secs, riches en éléments nutritifs, à pH neutre à acide ;

– **le millepertuis perforé** (*Hypericum perforatum*), plante héliophile vivace poussant sur les sols incultes légers et sablonneux à pH neutre à acide ;

– **la sabine à feuilles de serpolet** (*Arenaria serpyllifolia*), espèce vivace héliophile s'implantant sur les sols sableux et secs à pH neutre à légèrement acide ;

– **l'érigeron du Canada** (*Conyza canadensis*), espèce végétale originaire du Canada très présente sur les sols incultes et sablonneux remués ;

▼ Photo 1 – Pont-sur-Sambre : les cendres exploitées.



Photo – Jean Philippe Falcy

– **le panais cultivé** (*Pastinaca sativa*), espèce poussant dans les endroits secs à pH basique de préférence ;

– **le bouleau blanc** (*Betula alba*), arbre pionnier, héliophile, s'adaptant à tous les types de substrats.

L'écologie de ces quelques espèces permet de comprendre leur présence sur les cendres de charbon ; elles sont capables de pousser sur substrat sec, sablonneux, pauvre en nutriments... Toutefois, nous notons la présence d'espèces poussant habituellement sur sol à pH neutre voire acide (sabine, féтуque...). Ce constat nous laisse penser que la couche superficielle des cendres (< 15 cm), fortement lessivée, présente des conditions physico-chimiques nettement plus favorables que celles des couches plus profondes (à 30 cm de profondeur). En effet, nous avons constaté que le lessivage partiel de la couche superficielle de cendres diminue le pH et le fait tendre vers la neutralité. Dès lors, il est possible que la germination des semences et l'installation des jeunes pousses soient facilitées tant que leur système racinaire ne prospecte pas les cendres trop en profondeur.

Une seconde observation réalisée sur le terrain nous a permis de remarquer l'impact bénéfique de l'apport — même à de faibles quantités — de matière organique sur le terril. En effet, nous notons ici et là de petites surfaces de cendres recouvertes d'excréments de lapins sur lesquelles prolifèrent des espèces herbacées (graminées) dont la couverture totale au sol atteint facilement les 80 % sur ces zones. Sur les bas de pente du terril, la présence de matière organique semble amplifiée. En effet, la présence importante de populations d'orties traduit un processus d'humification marqué de la matière organique (décomposition des feuilles de bouleaux). En outre, sur ces mêmes bas de pentes se développent des espèces préférant les sols basiques telles que *Inula conyza*, *Cruciata laevipes* et *Epipactis helleborine*, ce qui semble confirmer le phénomène de lessivage des cendres.

Dans les deux cas, nous pouvons alors légitimement penser qu'un apport de compost aura des conséquences bénéfiques sur la dynamique de végétalisation du terril. Le caractère héliophile, voire xérique, des espèces végétales présentes sur le terril doit être impérativement pris en compte pour le choix des espèces à semer. Il sera en effet indispensable d'opter pour des cultivars résistants aux conditions de sécheresse.

Les recherches bibliographiques

L'analyse du couvert végétal du site étant réalisée, les recherches bibliographiques nous ont apporté des informations importantes.

Concernant les cendres

De nombreux articles scientifiques récents (TORDOFF *et al.*, 2000 ; BIDAUD C., 1998 ; ROBERT M., 1995 ; Mc MURPHY L., RAYBURN A., 1993 ; ZEVENBERGEN C. *et al.*, 1999 ; CUNNINGHAM S., OW D., 1996) ont permis de tirer des enseignements importants pouvant être appliqués au projet de végétalisation du terril de Pont-sur-Sambre :

– la présence majoritaire d'éléments de petite taille (< 2 mm) dans les cendres peut donner lieu à des phénomènes de compaction et de cimentation naturelle formant une couche de surface difficilement pénétrable par les racines des plantes ;

– les éléments-traces métalliques ont un pouvoir d'inhibition plus ou moins grand sur la croissance des espèces végétales, en particulier sur le développement de leur système racinaire. Ils ont pour effet de rendre les plantes hypersensibles à la sécheresse ;

– le pH a une influence directe sur la biodisponibilité des éléments-traces métalliques. Ces derniers ont la propriété d'être solubles à des pH bas (acide) alors qu'ils précipitent dans le sol à des pH élevés (basique) ;

– les cendres de charbon ont la particularité d'évoluer rapidement au fil des années lorsqu'elles sont stockées à l'air libre. Elles contiennent des verres d'alumino-silicate qui ont la propriété de s'altérer rapidement au cours du temps pour se transformer en argiles non-cristallines. La formation d'argile peut être bénéfique dans la mesure où elle participe activement à la fixation des métaux lourds, soit en les encapsulant, soit en les intégrant directement à leur structure.

Concernant la végétation

La littérature scientifique confirme l'utilité de végétaliser des sites difficiles similaires à celui de Pont-sur-Sambre (BAKER Alan J.-M. *et al.*, 1997 ; TORDOFF G.-M. *et al.*, 2000 ; FILCHEVA E. *et al.*, 1999 ; PICHTEL J.-R. *et al.*, 1994 ; RAINER *et al.*, 1995 ; United States Environmental Agency, 1997 ; SALT D.-E. *et al.*, 1998 ; ERNST W.-H.-O., 1996 ; HART S., 1996 ; CUNNINGHAM S., OW D., 1996 ;

BROOKS R.-R. *et al.*, 1998). En effet, la mise en place d'une couverture végétale artificielle permet entre autres :

- d'améliorer la stabilité du terrain par la création de liens entre les particules du substrat et les racines des plantes ;
- de réduire la dissémination des cendres par le vent sur les terrains alentours ;
- de réduire l'impact des facteurs érosifs sur le terrain (ruissellement des eaux de pluie, vent...);
- de réduire les risques de pollution des nappes phréatiques grâce à l'interception par les racines des plantes d'une grande partie des eaux de pluie, limitant d'autant la solubilité des éléments-traces métalliques (Zn, Pb, Cd...) ou autres éléments-traces indésirables (PCB, HAP...);
- de renforcer l'immobilisation des éléments-traces métalliques au sein du substrat en stabilisant la couche superficielle du sol ;
- de garantir une meilleure intégration paysagère du site.

La technique de végétalisation la mieux à même d'être employée dans le cadre du projet de réhabilitation du terrier de Pont-sur-Sambre fait appel à la classe des opérations dites de *phytoremédiation*¹ (SALT D.-E. *et al.*, 1998) et plus particulièrement de *phyto-stabilisation*². Ce terme fait référence à l'emploi d'espèces végétales aptes à se développer dans des conditions de vie extrêmes tout en réduisant la biodisponibilité des éléments phytotoxiques du sol (métaux lourds) dans l'environnement.

Cette technique de végétalisation peut être optimisée si l'on opte pour une voie *améliorative*³ (TORDOFF G.-M. *et al.*, 2000) qui se traduit par l'emploi d'un amendement organique comme « barrière biologique » temporaire favorisant une implantation et un développement rapides du couvert végétal.

La voie améliorative présente plusieurs avantages en végétalisation (RAINER *et al.*, 1995 ; PICHEL J.-R. *et al.*, 1994 ; WALI M.-K., 1999 ; GARCIA-GIL J.-C., 2000) tels que :

- l'amélioration de la qualité du sol pollué (nutriments, capacité de rétention en eau...);
- l'amélioration de la capacité d'échange cationique dans le but d'assurer une décharge lente en nutriments vers les racines des plantes ;
- l'augmentation du phénomène de complexation des éléments-traces métalliques (éléments phytotoxiques) ;

- l'amélioration de l'aération du sol ;
- l'augmentation de la biodiversité des micro-organismes ;
- l'amélioration du pouvoir tampon du sol ;
- l'apport de fertilisants et de co-substrats ;
- l'amélioration de la dégradation des contaminants organiques par les micro-organismes du sol ;
- l'amélioration de l'interaction matière organique/éléments-traces métalliques au sein de la matrice humique ;
- la diminution des concentrations en éléments-traces métalliques dans les tissus végétaux.

Dans la mesure où il est préférable de conserver la valeur basique du pH des cendres qui favorise l'immobilisation des métaux lourds, l'apport d'amendement devra être entrepris en couche de surface, sans incorporation avec le substrat « cendres ».

Le recours à la voie améliorative en végétalisation ne dispense pas d'utiliser des espèces végétales sélectionnées pour leur aptitude à vivre dans un milieu à fortes contraintes, tel que peut l'être le terrier de Pont-sur-Sambre (sécheresse estivale marquée, présence d'éléments-traces métalliques...). Dès lors, le travail bibliographique a dans un premier temps été orienté vers la recherche d'espèces végétales à la fois tolérantes aux éléments-traces métalliques et disponibles en grande quantité dans le commerce.

La notion de *tolérance* aux éléments-traces métalliques est ici importante à préciser. Les espèces tolérantes ont la capacité de s'implanter sur des sites dont les sols sont fortement chargés en éléments-traces métalliques. La stratégie mise en œuvre par ces plantes leur permet d'immobiliser au sein de leur système racinaire les éléments-traces indésirables. À la différence des espèces dites hyper-accumulatrices, les plantes tolérantes n'accumulent pas dans leurs parties aériennes (feuilles, tiges) les éléments polluants. La notion de phyto-stabilisation est donc confirmée dans la mesure où il n'existe pas de transfert d'éléments indésirables depuis le sol vers les plantes.

Plusieurs articles scientifiques (ERNST W.-H.-O., 1996 ; TORDOFF G.-M. *et al.*, 2000/EPA) ont permis d'identifier certaines espèces végétales reconnues comme étant tolérantes à un ou plusieurs métaux lourds (tableau 1).

1. Utilisation de plantes vertes et de leur microbiote associé, d'amendement du sol et de techniques agricoles pour éliminer, contenir, ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux (Cunningham, 1995).

2. Stabilisation et séquestration des contaminants du sol par la couverture végétale.

3. Faire appel à un amendement organique pour favoriser l'implantation d'une couverture végétale sur un sol contaminé.

D'autres articles (SHU J., 1995 ; WOODBURY P.-B., 1998 ; GORMAN J.-M., 2000 ; JUSAITIS M., PILMAN A., 1996), relatant des opérations de végétalisation de terrils de cendres de charbon ont fait appel à des espèces végétales différentes (tableau 2).

Ces dernières données mettent en évidence l'emploi d'espèces végétales appartenant à la famille des *légumineuses*. Bien que non tolérantes aux métaux lourds, ces espèces ont la propriété de fixer l'azote atmosphérique dans leur système racinaire et de là d'améliorer la teneur en éléments nutritifs des sols. Leur utilisation pour la végétalisation du parc à cendres s'avère dès lors être une option bénéfique en vue de l'installation d'un couvert végétal pérenne.

Les essais en laboratoire

Avant la mise en place d'essais sur le site, des essais en laboratoire ont été entrepris au cours de l'année 2000 ; ils avaient pour objectif de valider le choix non seulement des espèces végétales considérées comme tolérantes aux métaux lourds, mais également de certaines plantes herbacées recensées sur le terril et pouvant être utilisées lors de l'opération de végétalisation. 11 espèces végétales différentes ont été testées en laboratoire (tableau 3).

Pour chaque espèce, 24 graines par barquette ont été semées sur 3 types de substrats :

– compost de déchets verts (témoin) ;

Famille végétale	Nom français	Nom scientifique
Graminée	Fétuque ovine	<i>Festuca ovina</i>
Graminée	Fétuque rouge	<i>Festuca rubra</i>
Graminée	Agrostide stolonifère	<i>Agrostis stolonifera</i>
Graminée	Canche cespiteuse	<i>Deschampsia caespitosa</i>
Graminée	Pâturin des prés	<i>Poa pratensis</i>

– cendres à charbon « nues » prélevées à Pont-sur-Sambre ;

– cendres à charbon « nues » prélevées à Pont-sur-Sambre + fertilisation (engrais 15-15-15).

L'expérimentation, répartie sur une durée de 44 jours, a consisté à mesurer successivement le taux de germination, le taux de survie, la longueur de la feuille la plus grande (dynamique de croissance) ainsi que la biomasse aérienne.

▲ Tableau 1 – Espèces végétales tolérantes aux éléments-traces métalliques.

▼ Tableau 2 – Espèces végétales utilisées en végétalisation de terril de parc à cendres de charbon.

Famille végétale	Nom français	Nom scientifique
Légumineuse	Trèfle rampant	<i>Trifolium repens</i>
Légumineuse	Trèfle des prés	<i>Trifolium pratense</i>
Légumineuse	Lotier corniculé	<i>Lotus corniculatus</i>
Légumineuse	Luzerne cultivée	<i>Medicago sativa</i>
Graminée	Agrostide tenu	<i>Agrostis tenuis</i>
Graminée	Fléole des prés	<i>Phleum pratense</i>
Graminée	Dactyle aggloméré	<i>Dactylis glomerata</i>
Graminée	Fétuque élevée	<i>Festuca arundinacea</i>

Famille végétale	Nom français	Nom scientifique
Graminée	Fétuque rouge gazonnante	<i>Festuca rubra gazonnante*</i>
Graminée	Fétuque rouge traçante	<i>Festuca rubra traçante*</i>
Graminée	Fétuque ovine	<i>Festuca ovina*</i>
Graminée	Pâturin des prés	<i>Poa pratensis*</i>
Graminée	Ray-grass	<i>Lolium perenne****</i>
Graminée	Agrostide stolonifère	<i>Agrostis stolonifera*</i>
Légumineuse	Anthyllis vulnéraire	<i>Anthyllis vulneraria**</i>
Composée	Marguerite	<i>Leucanthemum vulgare***</i>
Graminée	Canche cespiteuse	<i>Deschampsia caespitosa***</i>
Graminée	Flouve odorante	<i>Anthoxanthum odoratum***</i>
Hypericinée	Millepertuis	<i>Hypericum perforatum***</i>

◀ Tableau 3 – Désignation des 11 espèces végétales testées en laboratoire.

* Espèces tolérantes aux métaux lourds (cf recherche bibliographique).

** Légumineuses.

*** Espèces recensées sur le terril.

**** Espèces à fort pouvoir de recouvrement et à développement rapide.

Nous avons été confrontés à un problème d'assèchement du substrat dans les barquettes contenant les cendres et ceci malgré un arrosage journalier. Ce paramètre a été la cause du retrait de trois espèces en cours d'expérience : anthyllis, marguerite, et millepertuis. Au final, seules les graminées ont résisté et n'ont pas semblé avoir souffert de ce phénomène. En outre, le mode d'arrosage des barquettes d'essai associé au fonctionnement de la chambre de culture a contribué à renforcer le phénomène de cimentation des cendres. La formation superficielle d'une couche durcie a fortement limité la croissance d'un nombre important de jeunes pousses.

Les essais en laboratoire nous ont cependant permis de tirer les enseignements suivants.

Taux de germination et taux de survie

Les taux de germination sont dans l'ensemble satisfaisants (> 80 %) pour la majorité des espèces testées. Toutefois, il est important de noter que les espèces telles que fétuque rouge gazonnante, pâturin des prés, flouve odorante présentent les plus faibles taux de germination (proches de 60 %).

Ces résultats nous ont permis d'ajuster la quantité de graines par espèce à incorporer dans notre mélange, pour optimiser au mieux l'expression de chacune d'entre elles sur le terrain.

Les taux de survie sont majoritairement bons (proche ou > 80 %, 44 jours après la germination des graines). Le substrat cendres semble tout de même avoir un impact sur l'installation des espèces, puisque leurs taux de survie sont légèrement plus faibles que ceux obtenus sur compost. Nous devons noter le cas de la canche cespiteuse (*Deschampsia caespitosa*) qui semble être l'espèce la moins résistante (taux de survie < 60 % sur

cendres et cendres + engrais), les conditions de sécheresse marquées en début d'expérience en étant très certainement la cause. Dans une moindre mesure, il en est de même pour *Anthoxanthum odoratum* ainsi que pour *Festuca rubra* gazonnante (taux de survie < 60 %). Néanmoins, il est important de préciser qu'un faible taux de survie n'implique pas forcément que les individus restants ont une mauvaise dynamique de croissance.

L'interprétation de ces deux paramètres présente l'intérêt d'ajuster au mieux, d'un point de vue quantitatif, la composition du mélange de graines à semer.

Courbes de croissance

L'analyse de la croissance des espèces nous permet de tirer les enseignements suivants :

- le substrat « compost » a un effet bénéfique sur la croissance des plantes ;
- le substrat « cendres », avec ou sans engrais, contribue à ralentir fortement la croissance des plantes ;
- la présence d'engrais ne semble pas apporter un plus significatif ;
- au bout de 44 jours, la croissance des plantes (sur cendres et cendres avec engrais) se ralentit fortement, puis se stabilise pour la majorité des espèces testées.

Biomasses aériennes (figure 1)

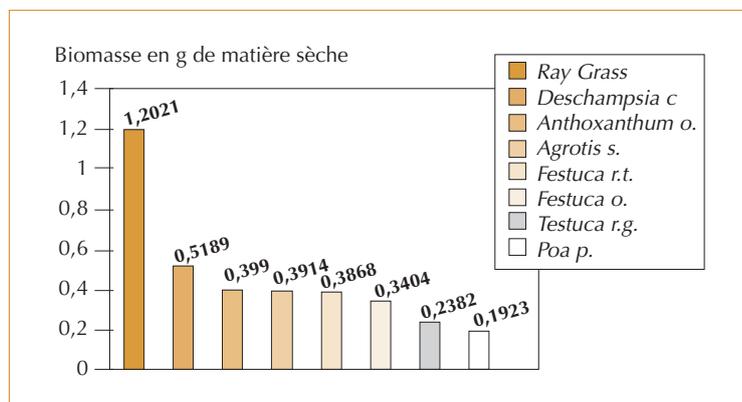
En fin d'expérience, 7 individus par espèces testées ont fait l'objet d'une mesure de biomasse aérienne (découpe des parties « vertes », mise à l'étuve à 100°C pendant 2 jours, pesée).

Les valeurs obtenues sont concordantes avec les résultats de la dynamique de croissance. En effet, la biomasse aérienne, toutes espèces confondues, est beaucoup plus faible sur les substrats « cendres » (avec et sans engrais) que sur le substrat « compost de déchets verts ». Nous notons également que la hiérarchie interspécifique de production de biomasse aérienne n'est pas respectée selon le type de substrat, l'effet substrat/espèce semblant se confirmer, d'où la nécessité d'employer des espèces tolérantes aux cendres.

Analyse statistique des données

Le traitement statistique (ANOVA) des résultats de laboratoire a permis d'établir une hiérarchisation au sein des espèces testées en fonction de leur

▼ Figure 1 – Résultats des mesures de biomasse aérienne réalisées.



Groupe	Performance sur le substrat « cendres »
1 ^{er} groupe : Ray-Grass (<i>Lolium perenne</i>)	+
2 ^e groupe Fétuque rouge traçante (<i>Festuca rubra traçants</i>)	
3 ^e groupe Fétuque ovine (<i>Festuca ovina</i>) Fétuque rouge gazonnante (<i>Festuca rubra gazonnante</i>) Flouve odorante (<i>Anthoxanthum odoratum</i>)	
4 ^e groupe Agrostide stolonifère (<i>Agrostis stolonifera</i>) Canche cespiteuse (<i>Deschampsia caespitosa</i>) Pâturin des prés (<i>Poa pratensis</i>)	
	–

◀ Tableau 4 – Hiérarchisation des espèces testées en fonction de leur comportement sur le substrat « cendres ».

comportement sur le substrat « cendres ». Quatre groupes ont pu ainsi être distingués (tableau 4).

Il est à noter que les résultats obtenus lors de ces expériences n'ont pas démontré d'effet bénéfique de l'engrais sur la croissance des espèces testées sur le substrat « cendres ».

En conclusion, ces expérimentations réalisées en laboratoire ont permis :

- de souligner l'impact des cendres sur la dynamique de croissance des espèces testées (ralentissement) ;
- de confirmer pour partie la tolérance de certaines espèces au substrat « cendres » (fétuque ovine, fétuque rouge), à l'exception de l'agrostide et du pâturin ;
- de constater la très bonne tolérance du ray-grass sur le substrat « cendres ».

Compte-tenu des conditions particulières constatées au cours des essais en laboratoire (sécheresse, phénomène de cimentation), il était important de comparer ces premières données à celles issues d'expérimentations réalisées en conditions réelles sur le terrier de Pont-sur-Sambre.

Les essais mis en place sur le site

L'analyse botanique du terrier, la bibliographie et les essais en laboratoire ont permis de retenir les espèces végétales à proposer pour le mélange de végétalisation. Mais le choix judicieux des espèces végétales ne suffit pas pour réussir une opération de végétalisation, il faut aussi que le substrat sur lequel elles doivent germer et s'installer de façon durable,

soit de bonne qualité. En effet, les cendres de charbon constituent un « substrat original » qui présente des caractéristiques particulières qu'il convient d'analyser pour juger de leur compatibilité avec l'installation d'un couvert végétal pérenne et de qualité. Les cendres ont un pH basique, cependant on a pu distinguer deux types de cendres :

- les cendres dites « stabilisées » qui ont un pH de l'ordre de 8 à 8,5 ; elles caractérisent le secteur du terrier naturellement mais partiellement végétalisé ;
- les cendres dites « fraîches » qui ont un pH de l'ordre de 9,5 ; elles caractérisent la zone du terrier en cours d'exploitation.

La forte teneur en limon des cendres donne lieu, lors d'événements pluvieux, à des phénomènes de « cimentation » de la couche superficielle. L'absence de teneurs suffisantes en éléments nutritifs dans les cendres limite l'installation et le développement naturels des espèces végétales locales. La granulométrie relativement fine des cendres (60 % des éléments ont une taille inférieure à 2,5 mm de diamètre) est à l'origine d'une faible capacité de rétention en eau de ce substrat, ce qui a pour conséquence d'accentuer fortement l'impact des périodes de sécheresse estivale. Enfin, bien que d'un point de vue réglementaire (circulaire n°96-85 du 11 octobre 1996, relative aux cendres issues de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans les ICPE — dite « circulaire cendres »), les cendres de charbon soient considérées comme des déchets inertes, potentiellement non dangereux ni écotoxiques, la présence d'éléments-traces métalliques peut être à l'origine de mécanismes phytotoxiques pour les plantes.

Localisation des essais

Plusieurs types d'essais ont été mis en place pour tester l'efficacité :

- du compost de déchets verts à favoriser le développement rapide de la végétation semée (zones I à IV),
- d'un semis et d'une fertilisation appropriée sur couvert végétal existant (zone V),
- de la toile de jute à retenir les fines sur forte pente (zone VI),
- du grillage galvanisé ancré au sol pour limiter l'envahissement du site par les lapins (zone VII).

L'ensemble des zones d'essais peut être localisé sur la carte 2, sur la photo 2 et la figure 2 des essais avec composts (zones I à IV).

Seuls les essais de semis et fertilisation sur couvert végétal spontané et de végétalisation sur composts de déchets verts seront développés dans cet article.

Protocole d'essai

Les essais sur compost de déchets verts mis en place sont au nombre de 4, répartis de la manière suivante :

ZONES I à IV (SECTEUR EXPLOITÉ)

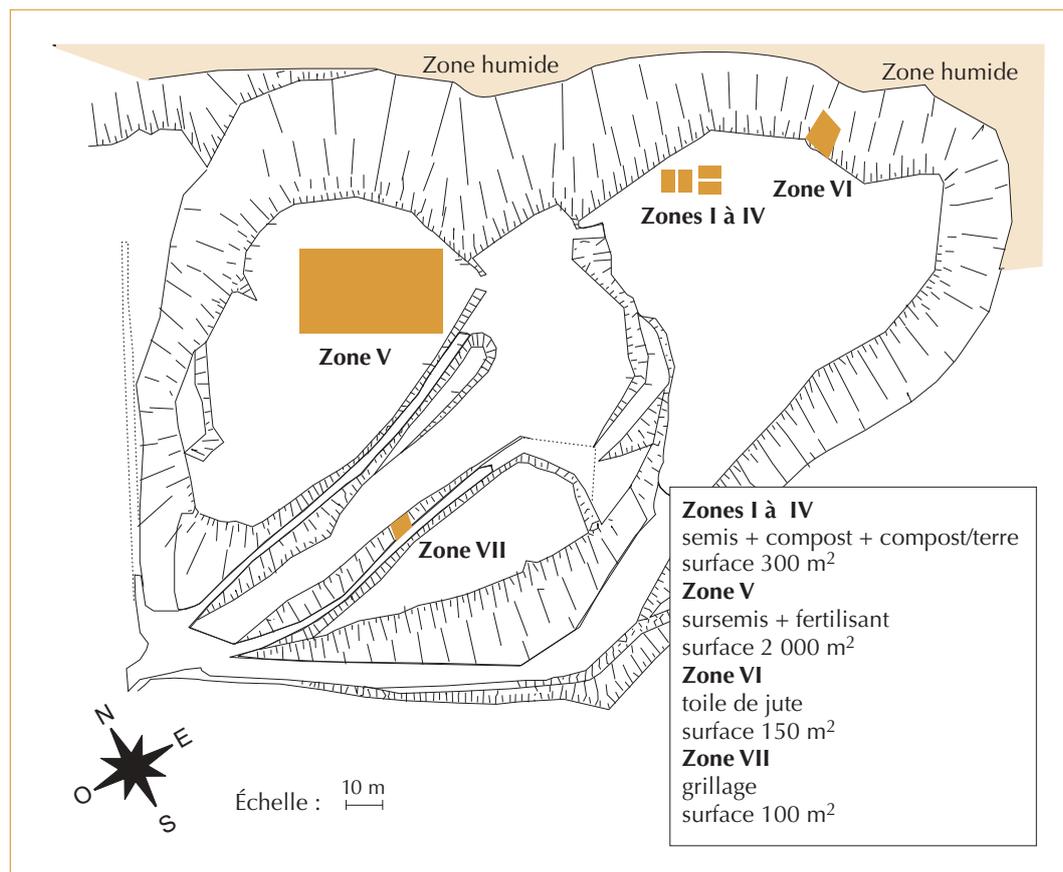
4 PARCELLES DE 10 M PAR 20 M

Apport en surface de compost de déchets verts sur 4 épaisseurs testées :

- 5 cm ;
- 10 cm ;
- 20 cm ;
- 20 cm avec mélange 40 % compost et 60 % de terre végétale.

Il convient dans cet essai de constater qu'elle est l'épaisseur idéale pour à la fois protéger le sol des phénomènes d'érosion éolienne et s'opposer ainsi à l'envol des cendres et permettre le développement d'une végétation pérenne qui permettra à terme et

▼ Carte 2 – Localisation des essais.



sans entretien de réussir l'intégration paysagère de cette zone avec un retour progressif des espèces végétales caractéristiques de l'environnement naturel du terroir.

ZONE V : SEMIS AVEC FERTILISATION SUR ENVIRON 2 000 M²

Il convient de constater si cette intervention permet d'améliorer le taux de recouvrement du couvert végétal en cours d'installation spontanée.

Descriptif technique

– **le semis** a été réalisé avec un mélange (tableau 5) apporté à raison de 200 kg/ha ;

– **un engrais ternaire (NPK : 15/15/15)** a été apporté sur les zones I à IV à raison de 350 kg/ha et sur la zone V à raison de 250 kg/ha ;

– **un fixateur** a été utilisé ; il s'agit de cellulose à fibres longues ;

– **les caractéristiques du compost de déchets verts étaient :**

• **provenance** : société Hainaut Compost (groupe Fertinord) de Trith-Saint-Léger (Nord) ;

• **caractéristiques** : compost à base de déchets verts de particuliers, de collectivités ou d'entreprises de paysage ;

• **qualité** : conforme à la norme AFNOR 44-051 « Amendement organique » conforme aux critères de l'écolabel européen EC 171 « Amendements pour sols », criblé à 40 mm ;

• **mise en œuvre** : au chargeur puis ratissage manuel ;

– **technique d'ensemencement** : par projection hydraulique (*hydroseeding*) du mélange eau + graines + fixateur + engrais.

Résultats

ZONES I À IV : VÉGÉTALISATION SUR COMPOST

Les 4 zones d'essais montrent des résultats très encourageants :

– pas d'export de compost malgré les fortes intempéries de l'hiver 2000-2001 ;

– taux de recouvrement du couvert végétal supérieur à 90 % ;

– pas de traces de carences visibles sur les feuilles des plantes.



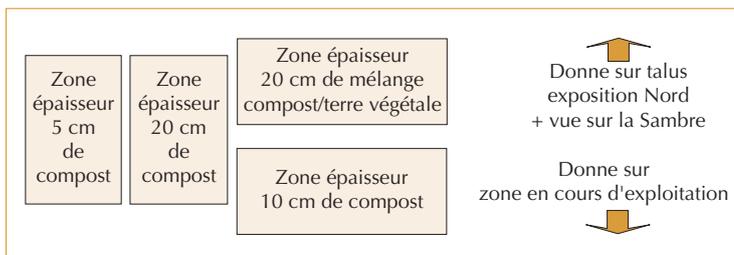
▲ Photo 2 – Vue des essais des zones I à IV avec compost.

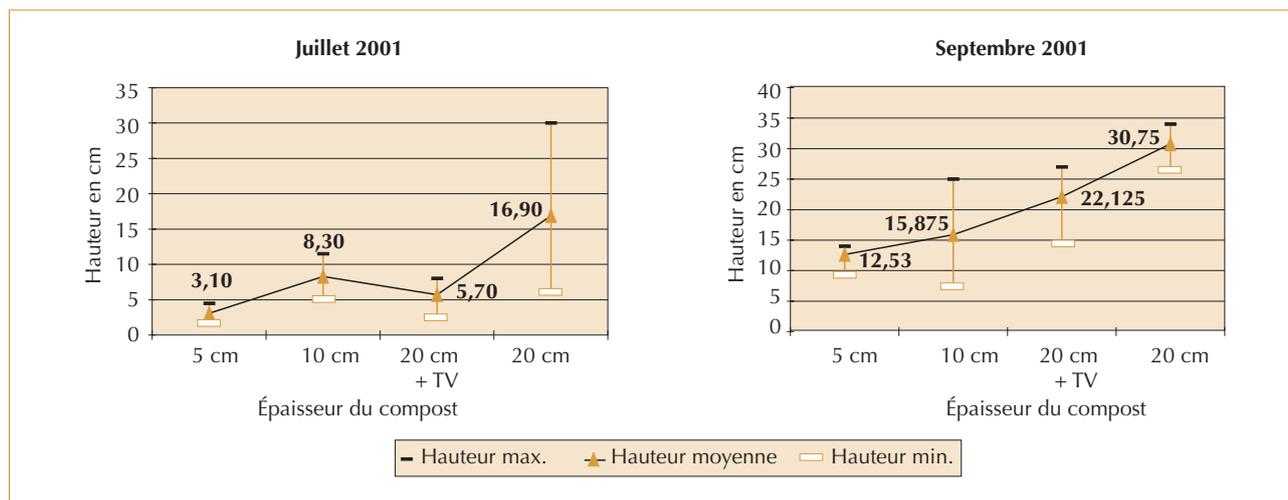
Photo – Jean Philippe Falcy

▼ Tableau 5 – Composition du mélange semé sur les zones I à IV.

Espèces semées	Pourcentages pondéraux
<i>Ray Grass Anglais Concerto</i>	10 %
<i>Festuca rubra traçante Salsa</i>	15 %
<i>Festuca rubra gazonnante Nimrod</i>	15 %
<i>Festuca ovina Reliant</i>	10 %
<i>Phleum pratense</i>	8 %
<i>Poa pratensis Princeton</i>	10 %
<i>Agrostis stolonifera Crenshaw</i>	8 %
<i>Anthyllis vulneraria</i>	6 %
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	5 %
<i>Hypericum perforatum</i>	5 %
<i>Achillea millefolium</i>	1 %
<i>Deschampsia cespitosa</i>	5 %
<i>Leucanthemum vulgare</i>	2 %

▼ Figure 2 – Disposition des parcelles des essais I à IV avec compost.





▲ Figure 3 – Valeurs moyennes des hauteurs du couvert végétal observées en juillet et septembre 2001.

Les différentes épaisseurs de compost apportées (5, 10, 20 cm avec compost seul et 20 cm avec terre végétale et compost) semblent agir sur deux éléments caractéristiques du couvert végétal :

– **la hauteur moyenne des plantes** (biomasse aérienne) : globalement la hauteur de la végétation est proportionnelle à la quantité de compost apportée ;

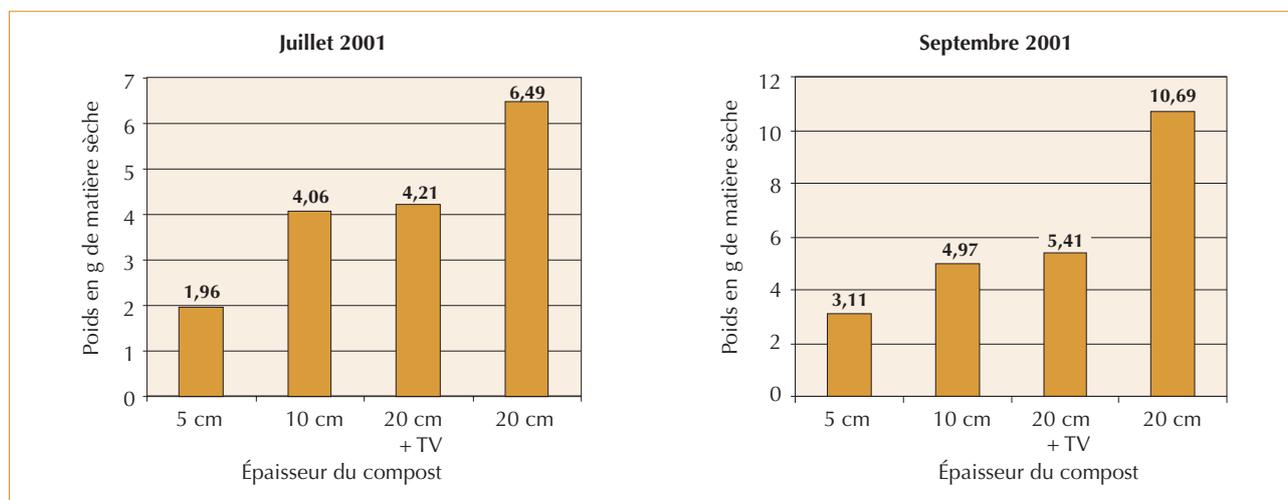
– **la composition floristique du couvert végétal** : il semble que la parcelle compost + terre végétale présente une meilleure expression du mélange de graines semées, les autres essais avec le compost seul se caractérisant par l'omniprésence des graminées. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les composts ont naturellement de fortes teneurs en azote, ce qui a pour conséquence de

favoriser le développement des graminées au détriment d'autres familles végétales (phénomènes de compétitions interspécifiques).

La figure 3 représente les valeurs moyennes de hauteur du couvert végétal mesurées lors des campagnes de suivi de juillet et septembre 2001, tandis que la figure 4 montre pour cette période les poids moyens de biomasses aériennes. Ces représentations graphiques permettent de tirer deux conclusions importantes :

– pour chaque parcelle, le couvert végétal n'a pas souffert de la sécheresse (augmentation de la biomasse aérienne entre juillet et septembre 2001) malgré quelques signes précurseurs (jaunissement des feuilles) notés lors de la campagne de suivi du mois de juillet ;

▼ Figure 4 – Valeurs moyennes des poids de biomasse aérienne observés en juillet et septembre 2001.



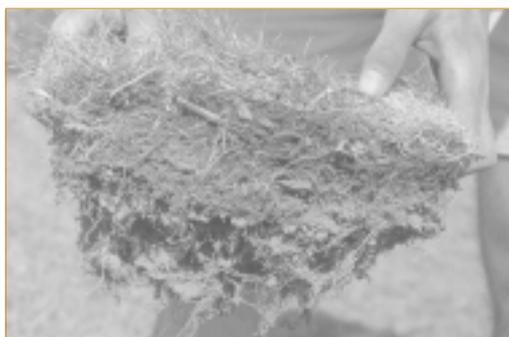


Photo – Jean Philippe Falcy

▲ Photo 3 – Avec 5 cm de compost, le système racinaire pénètre dans les cendres (en juillet 2001).

– trois grandes ambiances de couvert végétal peuvent être distinguées :

- une ambiance « prairie rase et éparse » pour les épaisseurs de 5 à 10 cm de compost ;
- une ambiance « prairie moyenne » (stade intermédiaire) pour l'épaisseur 20 cm compost/terre végétale ;
- une ambiance « prairie haute et dense » pour l'épaisseur 20 cm de compost.

Ces trois descriptions devront être prises en compte lors du choix final de la technique de végétalisation en vue de limiter au maximum les coûts d'entretien futurs du site (fauche).

À l'exception de la parcelle avec 20 cm de compost seul, le système racinaire des plantes pénètre pour partie dans le substrat « cendres » (photo 3). Cela semble donc confirmer que l'apport de matière organique doit être considéré comme une voie améliorative à la dynamique de végétalisation, qui n'a pour fonction que d'accélérer la mise en place d'un couvert végétal ancré au final dans le substrat « cendres ».

Le tableau 6 indique les différents niveaux d'adaptation des espèces observés lors des essais. Certaines espèces végétales « naturelles » (tableau 7, p. 76) ont profité de ces essais pour s'implanter et se développer .

Au bout d'un an, seules les graminées ayant poussé sur la parcelle avec 20 cm de compost seul ont réussi à fructifier et à donner des graines. Mais il faut noter que la présence sur ce site de nombreux lapins a sans doute compromis la mise à fleur et la fructification de nombreuses espèces (broutage excessif des plantes).

L'apport de compost de déchets verts contribue de manière certaine à l'installation d'un couvert végétal dense et pérenne sur le teruil (photos 4 à 7, p. 76). De manière à limiter les coûts d'entretien, il semble qu'une épaisseur de compost de l'ordre de 10 cm permette d'obtenir une végétation satisfaisante de type « prairie sèche éparse ».

Espèces semées	Espèces observées
Graminées	
Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>)	Espèces majoritaires (espèces difficilement reconnaissables entre elles)
Fétuque rouge (<i>Festuca rubra</i>)	
Fétuque ovine (<i>Festuca ovina</i>)	
Agrostide tenu (<i>Agrostis tenuis</i>)	
Pâturin des prés (<i>Poa pratensis</i>)	
Flouve odorante (<i>Anthoxanthum odoratum</i>)	S'exprime mais ne survit pas à la sécheresse
Canche cespiteuse (<i>Deschampsia cespitosa</i>)	S'exprime mais ne survit pas à la sécheresse
Fléole des prés (<i>Phleum pratense</i>)	Rare
Autres	
Achillée Millefeuille (<i>Achillea millefolium</i>)	Présente
Millepertuis (<i>Hypericum perforatum</i>)	-
Marguerite (<i>Leucanthemum vulgare</i>)	Rare
Anthyllis vulnérable (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	Présente (meilleure expression avec terre végétale)

◀ Tableau 6 – Différents niveaux d'adaptation des espèces observés lors des essais.

► Tableau 7 – Espèces végétales « naturelles » relevées sur les essais avec compost.

Chardon (*Cirsium vulgare*)
 Inule à feuilles de Spirée (*Inula squarrosa*)
 Erigeron du Canada (*Conyza Canadensis*)
 Luzerne cultivée (*Medicago sativa*)
 Trèfle blanc (*Trifolium repens*)
 Renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*)
 Composée (*Taraxacum sp.*)

Il faut noter que l'apport de terre végétale semble permettre une meilleure expression du mélange de graines semées, et que la taille de criblage du compost retenue pour les essais est trop élevée (40 mm), ce qui a eu pour conséquence l'utilisation d'un produit avec des déchets non-décomposés à fort pouvoir de recouvrement (bouts de bois), empêchant pour partie la germination des graines et le développement des jeunes pousses. Il sera donc conseillé d'opter pour une maille de criblage plus faible, de l'ordre de 20 à 30 mm.

La végétation mise en place sur l'ensemble des parcelles a présenté tout au long de l'année un comportement très satisfaisant à peine marqué par la sécheresse estivale en juillet 2001.

ZONE V : ENSEMENCEMENT ET FERTILISATION SUR COUVERT VÉGÉTAL NATUREL

Aucune amélioration notable du couvert végétal naturel n'a été observée (tableau 8) :

– peu de graines ont germé ; il semble que les autres aient été emportées par le vent, qui peut être particulièrement fort au sommet du terri ;

– les rares graines ayant germé sont des graminées (espèces difficiles à déterminer : ray-grass, fétuques, agrostis), quelques pousses d'anthyllis, et quelques pousses de millepertuis ;

– les jeunes pousses qui ont résisté à la sécheresse estivale se caractérisent par une dynamique de croissance très lente à laquelle s'ajoutent des signes de carences nutritives (feuilles jaunies ou rougeâtres), ce qui confirme les informations tirées de la recherche bibliographique ;

– l'engrais n'a pas agi de manière significative tant sur les pousses issues des graines semées que sur le couvert végétal d'origine.

En conclusion pour la zone V, la simple technique d'ensemencement avec fertilisation ne donne pas de résultats satisfaisants ; la végétalisation rapide de ce secteur du terri ne peut s'envisager qu'avec

Photo 4

Octobre 2000



Photo 5

Avril 2001



Photo 6

Juillet 2001



Photo 7

Octobre 2001



Photos – Jean Philippe Falcy

Espèces semées	Espèces observées
Graminées	
Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>)	Rares (espèces difficilement reconnaissables entre elles)
Fétuque rouge (<i>Festuca rubra</i>)	
Fétuque ovine (<i>Festuca ovina</i>)	
Agrostide tenu (<i>Agrostis tenuis</i>)	
Pâturin des prés (<i>Poa pratensis</i>)	
Flouve odorante (<i>Anthoxanthum odoratum</i>)	
Canche cespiteuse (<i>Deschampsia caespitosa</i>)	
Fléole des prés (<i>Phleum pratense</i>)	
Autres	
Achillée Millefeuille (<i>Achillea millefolium</i>)	-
Millepertuis (<i>Hypericum perforatum</i>)	Rare
Marguerite (<i>Leucanthemum vulgare</i>)	-
Anthyllis vulnéraire (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	Rare

▲ Tableau 8 – Appréciation des résultats de l'ensemencement avec fertilisation sur couvert végétal naturel.

un apport complémentaire en matière organique (compost), seul support capable de fournir aux plantes des quantités suffisantes en éléments nutritifs. De plus, cette couche de surface contribuera activement à protéger les graines de l'érosion éolienne.

Concrètement, il suffirait d'apporter du compost sur une faible épaisseur (5 cm) pour pouvoir, d'une part, favoriser la germination et le développement des plantes issues des semis, et d'autre part, conserver les espèces végétales ayant colonisé naturellement le site tout en renforçant leur dynamique de croissance.

Conclusion

L'ensemble du travail d'analyse entrepris au cours des années 2000 et 2001 a permis de déterminer une approche technique en matière de génie biologique capable d'assurer les meilleures chances de succès au projet de végétalisation du teruil de Pont-sur-Sambre. Les observations et conclusions tirées du travail de recherche bibliographique ainsi que des diverses expérimentations et essais tant en laboratoire que sur le site lui-même permettent d'établir les données globales suivantes :

– la formation rapide d'un couvert végétal dense sur le teruil ne peut être envisagée sans un apport

de matière organique afin de compenser les contraintes biologiques et physiques propres au substrat « cendres » (faible capacité de rétention en eau, absence de complexe argilo-humique, phénomène de cimentation...);

– le choix et l'emploi de l'amendement organique, en l'occurrence du compost, doivent répondre tant à des critères qualitatifs (type de déchet valorisé, qualité agronomique, innocuité, maille de criblage) que quantitatifs (dose d'apport) ;

– l'emploi d'espèces végétales tolérantes aux métaux lourds constitue une solution de végétalisation intéressante dans la mesure où elle contribue à limiter le transfert éventuel de métaux lourds des cendres vers les parties aériennes des plantes ; par ailleurs l'introduction de légumineuses dans le mélange assure un processus d'auto-fertilisation du sol en élément azote ;

– la composition du mélange de graines préconisée est fonction des contraintes de vie régnant sur le teruil (présence de métaux lourds, sécheresse estivale marquée) ; elle tient compte également des spécificités écologiques du site et de la dynamique naturelle de recolonisation du teruil en associant aux espèces tolérantes aux éléments-traces métalliques des espèces végétales naturellement présentes sur le teruil.

La technique de végétalisation sur compost de déchets verts, permettra si elle est appliquée à l'ensemble du site de tenir compte de sa vocation future ; en effet, EDF souhaite rétrocéder le site à la collectivité locale de Pont-sur-Sambre sous une forme réhabilitée et intégrée d'un point de vue

paysager, c'est l'objectif essentiel de la végétalisation qui s'opposera en plus à la dégradation du sol sous l'action des facteurs érosifs, particulièrement actifs dans cette région : emport des cendres par le vent ou par des phénomènes de ruissellement d'eaux de pluie dans les talus à fortes pentes. □

Résumé

Avec la fermeture progressive des centrales thermiques, des stocks anciens de cendres doivent faire l'objet de programmes de réhabilitation. Il est important de réussir la végétalisation de ces parcs pour que les cendres pulvérulentes et donc sensibles à l'érosion soient « piégées » au sol, et pour intégrer ces parcs à leur environnement naturel.

Pour réhabiliter le parc à cendres volantes de Pont-sur-Sambre, Électricité de France (EDF) a souhaité que des essais soient mis en place. Ce substrat étant très particulier, nous avons proposé des essais mettant en œuvre des composts de déchets verts.

Nous avons caractérisé le terril d'un point de vue floristique. L'écologie des espèces présentes sur le terril et les recherches bibliographiques ont permis de déterminer le mélange d'espèces herbacées à semer en fonction du substrat d'origine et de l'apport de composts de déchets verts. Ce choix a été confirmé par des essais en laboratoire. Puis des essais ont donc été mis en place pour tester en vraie grandeur l'efficacité du compost de déchets verts.

Nous avons ainsi pu constater la formation rapide d'un couvert végétal dense sur le terril.

La végétalisation réussie sur compost de déchets verts, permettra la réhabilitation paysagère du site et la protection du sol contre les phénomènes érosifs, particulièrement actifs dans cette région : emport des cendres par le vent ou par des phénomènes de ruissellement d'eaux de pluie dans les talus à fortes pentes.

Abstract

With the progressive closing of thermal power stations in France, lot of fly ash dump (coal) should be rehabilitated. The revegetation of these places is necessary to have a good landscape integration and to protect soil against erosion. In this context, EDF (French Electric Company) wanted to install experimental plots on one of its fly ash dump in Pont-sur-Sambre (North of France).

The fly ash dump has been described by floristic summaries. The selection of herbaceous species and the choice of a green waste compost have been determined due to the scientific literature and the ecological knowledge of the place. These choices have been confirmed by laboratory experimentations. At last, experimental plots have been disposed on the dump area.

By this way a fast installation and growth of the vegetation has been observed on the plots. Thus, the use of green waste compost can be a good issue to obtain a good landscape integration and a sufficient protection against erosion (ash losses with the wind or the rain-water).