

Impact du *Miscanthus* sur la biodiversité végétale de sols contaminés par des éléments traces métalliques

A. Hayet^(1, 2), B. de Foucault⁽¹⁾, F. Douay⁽³⁾ et A. Deram^(1, 2)

- 1) Laboratoire des sciences végétales et fongiques (LSVF), Faculté des sciences biologiques et pharmaceutiques, Université de Lille 2, 3, rue du Professeur Laguesse 59 206 Lille Cedex
- 2) Faculté d'ingénierie et de management de la santé (UFR ILIS), Université de Lille 2 42 rue Ambroise Paré 59 120 Loos
- 3) Groupe ISA, Equipe Sols et Environnement, Laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement Lille Nord de France (LGCgE, EA 4515), 48 boulevard Vauban 59 046 Lille

* : Auteur correspondant : audrey.hayet@univ-lille2.fr

RÉSUMÉ

Dans le cadre du programme Phytener, une évaluation de l'influence de la production de *Miscanthus giganteus* sur la biodiversité végétale de parcelles cultivées a été réalisée afin d'apprécier la viabilité écologique de ce type de culture sur sols contaminés. Pour ce faire, la flore vasculaire de six parcelles expérimentales, toutes plantées en *Miscanthus*, a été analysée. Quatre de ces parcelles présentent des sols contaminés à des degrés divers par des éléments traces métalliques (ETM). Les concentrations en ETM des deux autres parcelles avoisinent celles des teneurs agricoles habituelles (TAH). Ces parcelles ont été considérées comme des références dans la démarche. Les résultats montrent que la flore adventice des cultures de *Miscanthus* se compose essentiellement d'espèces indigènes, communes et peu menacées (niveau de préoccupation mineure). Au niveau communautaire, deux grands types biologiques sont représentés : les annuelles (végétation thérophytique) et les vivaces. Ces communautés d'adventices témoignent des perturbations occasionnées par la plantation de *Miscanthus* et de l'hétérogénéité locale du milieu. Sur la base des résultats obtenus, la production de *Miscanthus* ne semble pas exercer d'influence néfaste sur les adventices de culture. En retour, les adventices ne semblent pas nuire au développement de *Miscanthus*, une fois la période d'implantation réussie. Dans notre contexte, la contamination des sols ne semble pas constituer un obstacle à la colonisation des cultures par les adventices. Les facteurs influant sur la colonisation des cultures par les adventices sont étroitement liés au contexte environnant et à la durée du cycle des cultures. En effet, une hétérogénéité spatiale des paysages à proximité des parcelles permet une meilleure diversité des adventices et un cycle de culture long est favorable à une reprise de la dynamique évolutive de la végétation.

Mots clés

Phytomanagement, *Miscanthus*, adventices, impact, phytosociologie, sols contaminés.

SUMMARY**IMPACT OF MISCANTHUS ON PLANT BIODIVERSITY OF SOIL CONTAMINATED WITH METALS**

Under the Phytener program, an evaluation of the influence of the production of *Miscanthus giganteus* on plant biodiversity of cultivated fields plots was conducted in order to assess the sustainability of this type of culture. To do this, the vascular flora of six experimental plots, planted with *Miscanthus giganteus* crops, was analyzed. Four of these six plots present topsoils contaminated with metals. The two other plots present concentrations in metals close to the regional usual agricultural contents and are considered as control. The results show that the weed flora of *Miscanthus* crop essentially consists of native, common and some endangered species (level of minor concern). At the community level, two major biological types are represented : the annual (therophytes) and perennials. Overall, the weed communities present bear witness to the disturbances caused by the planting of *Miscanthus* and the local community heterogeneity. On the basis of the results obtained, production of *Miscanthus* does not appear to have any negative influence on the weeds of culture. In return, the weeds do not appear to interfere with the development of *Miscanthus*, once the period of successful implementation. Moreover, soil contamination does not appear to constitute an obstacle to colonization of the crops by weeds. On the other hand, colonization of the cultures is closely linked to the surrounding context and the duration of the crop cycle. Overall, spatial heterogeneity of landscape near the cultures allows a better diversity of weeds and a long crop cycle is favorable to a resumption of the evolutionary dynamics of vegetation.

Key-words

Phytomanagement, *Miscanthus*, weeds, impact, phytosociology, contaminated soils.

RESUMEN**IMPACTO DE MISCANTHUS SOBRE LA BIODIVERSIDAD VEGETAL DE SUELOS CONTAMINADOS POR LOS ELEMENTOS TRAZA METÁLICOS.**

En el cuadro del programa Phytener, se realizó una evaluación de la influencia de la producción de *Miscanthus giganteus* sobre la biodiversidad vegetal de parcelas cultivadas para apreciar la variabilidad ecológica de este tipo de cultivo. Por eso, se analizó la flor vascular de seis parcelas experimentales, todas plantadas en *Miscanthus*. Cuatro de estas parcelas presentan suelos contaminados en diversos grados por elementos traza metálicos (ETM). Las concentraciones en ETM de dos otras parcelas rondan las de los contenidos agrícolas usuales (TAH). Se consideran estas parcelas como referencias en el enfoque. Los resultados muestran que la flora adventicia de los cultivos de *Miscanthus* se compone esencialmente de especies indígenas, comunes y poco amenazadas (nivel de preocupación menor). Al nivel comunitario, dos grandes tipos biológicos están representados : las anuales (vegetación terofítica) y las vivaces. Estas comunidades de adventicias atestiguan de las perturbaciones ocasionadas por la plantación de *Miscanthus* y de la heterogeneidad local del medio. Sobre la base de los resultados obtenidos, la producción de *Miscanthus* no parece ejercer influencia perjudicial sobre las adventicias de cultivo. En retorno, las adventicias no parecen perjudicar al desarrollo de *Miscanthus*, una vez que el periodo de implantación ha tenido éxito. En nuestro contexto, la contaminación de suelos no parece constituir un obstáculo a la colonización de los cultivos por las adventicias. Los factores que influyen sobre la colonización de los cultivos por las adventicias están estrechamente ligados al contexto circundante a la duración del ciclo de los cultivos. En efecto, una heterogeneidad espacial de los paisajes cerca de las parcelas permite una mejor diversidad de las adventicias y un largo ciclo de cultivo es favorable a una reanudación de la dinámica evolutiva de la vegetación.

Palabras clave

Fitomanagement, *Miscanthus*, adventicias, impacto, fitosociología, suelos contaminados.

La contamination des sols par les éléments trace métalliques (ETM) en relation avec les activités humaines constitue une préoccupation majeure dans les pays industrialisés. Les réflexions relatives à la remédiation de ces sols, ou à la requalification des sites contaminés, nécessitent de tenir compte de leur degré de contamination, de leurs usages et des risques de transfert des polluants vers d'autres compartiments tels que les nappes, les chaînes trophiques et *in fine* la population. Compte tenu des contraintes techniques et économiques, l'étendue des surfaces à remédier peut constituer un facteur excluant le recours à des techniques classiques de remédiation (décapage, confinement, washing...). Des techniques plus douces, comme le phytomanagement, peuvent s'avérer pertinentes, tout en présentant un caractère acceptable sur le plan social et économique. Elles reposent sur la mise en culture de végétaux dont la physiologie leur confère une aptitude, soit à extraire les polluants métalliques du sol et à les accumuler dans leurs tissus aériens (phytoextraction), soit à les stabiliser dans les sols (phytostabilisation) (Clijsters *et al.*, 2000; Cunningham *et al.*, 1997; Salt *et al.*, 1995; Vangronsveld, 2000; Bert, 2012).

Par ailleurs, une graminée vivace, *Miscanthus giganteus*, rencontre un intérêt croissant de la part de l'industrie et d'une partie du monde agricole en raison de sa productivité importante et de sa teneur élevée en lignocellulose. Découverte à la fin de XII^e siècle et utilisée au départ comme plante ornementale, *Miscanthus giganteus* est une graminée proche de la canne à sucre. Elle est parfois désignée à tort sous le nom d'"herbe à éléphant", terme correspondant en réalité au Napier (*Pennisetum purpureum*, originaire d'Afrique). *Miscanthus giganteus* utilisé en grande culture est un hybride stérile de *M. sinensis* et *M. sacchariflorus*. D'origine tropicale et subtropicale, ce végétal est étudié depuis plus de vingt ans comme culture à haute production de biomasse. Cette plante pérenne présente en effet l'avantage de repousser chaque année à partir des rhizomes qu'elle développe. Une plantation a une durée de vie moyenne de 15 à 20 ans. De part l'ensemble de ces caractéristiques, l'utilisation de cette espèce pour la production de biomasse à des fins énergétiques se développe à travers le monde. En France, moins d'un millier d'hectares de *Miscanthus* sont cultivés alors qu'en Grande Bretagne, plus de 14000 hectares sont recensés.

Parallèlement, l'intérêt de cette plante pour le phytomanagement est suggéré mais est encore à explorer, notamment en ce qui concerne les sols pollués par les éléments traces métalliques (ETM). Pour évaluer l'intérêt du *Miscanthus* pour gérer durablement des sols agricoles fortement contaminés par des ETM, un programme de recherche pluridisciplinaire, nommé Phytener, a été initié en 2010 et mis en place avec le soutien de l'ADEME (<http://www.phytener.fr/>). Un des objectifs est de contribuer au développement de techniques innovantes de gestion de sols fortement contaminés au moyen du *Miscanthus*. Sur le plan écologique, le caractère très compétitif de *Miscanthus* et la densité de ce type de culture, tant au niveau aérien (15000 à

20000 plants/ha en moyenne dans notre contexte d'étude et une hauteur comprise entre 2,5 et 3,5 mètres) que racinaire (1 cm de racine/cm³ de terre dans les 30 premiers centimètres), soulèvent la question du devenir de la flore messicole et donc du risque d'une perte de biodiversité. Or, comme le souligne Rowe *et al.* (2009), la recherche dans ce domaine reste à ce jour limitée et doit, à court terme, être complétée afin de mieux prédire les effets de ce mode cultural sur la biodiversité locale.

En se basant sur des données d'inventaires floristiques, nos travaux ont pour objectif d'évaluer (i) l'impact des plantations de *Miscanthus* sur les messicoles, (ii) l'influence de la contamination des sols et (iii) l'action des adventices sur le développement du *Miscanthus* après implantation. Par ailleurs, une analyse phytosociologique de la végétation permet d'évaluer les stratégies de recolonisation mises en place par les messicoles sur des cultures de *Miscanthus*.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Contexte expérimental

Six parcelles expérimentales, sur lesquelles *Miscanthus* a été implanté, ont été considérées. Quatre d'entre elles se situent à proximité de l'ancienne fonderie de plomb et zinc Metaleurop Nord à Noyelles-Godault (*figure 1*) qui, durant sa période d'activité, a entraîné la contamination des sols aux alentours notamment par des rejets massifs de poussières métalliques. Les sols de ces quatre parcelles expérimentales sont fortement contaminés par le plomb, le zinc et le cadmium. Elles ont été nommées MV, M1000, M500 et M200 de la plus contaminée à la moins contaminée. Le gradient a pour objectif d'apprécier l'influence du degré de contamination des sols sur les cultures de *Miscanthus*. Quelle que soit la parcelle considérée, les concentrations mesurées sont nettement supérieures aux teneurs agricoles habituelles (TAH) de la région définies par Sterckeman *et al.* (2002).

MV et M1000 se trouvent en zone semi-rurale, les parcelles voisines sont occupées soit par des terres agricoles soit par des plantations boisées. Localisée en zone péri-urbaine, M500 se situe en contrebas d'une route départementale et est bordée à l'ouest et au sud par des boisements et par un terrain agricole à l'est. A l'extrémité sud de la parcelle, un léger dénivelé jusqu'au filet Mouran (ruisseau délimitant la partie sud de la parcelle) entraîne sur le plan écologique la présence d'une zone de végétation hygrophile. M200 se localise en zone péri-urbaine, en contrebas d'une autoroute. La délimitation avec l'autoroute se matérialise par une frange arborée, un chemin rural et une vaste zone enherbée. Au sud et à l'ouest, M200 est bordée par des terres agricoles.

Pour compléter ce dispositif, *Miscanthus* a également été implanté sur deux autres parcelles dont les concentrations en ETM dans les sols sont proches des TAH. Elles ont été nommées

M2007 et M2010 et sont considérées comme des références dans la démarche. M2007 et M2010 se localisent toutes deux en zones rurales. M2007 est située au cœur d'un vaste ensemble de terres agricoles. M2010 se localise à l'intersection et en contre-haut d'un chemin rural et d'une route départementale.

Caractéristiques culturelles des parcelles expérimentales

L'implantation de *Miscanthus giganteus*, hybride stérile de *Miscanthus sinensis* et *sacchariflorus*, s'est faite en deux temps : en 2007 pour les parcelles M500, M200 et M2007 et en 2010 pour les parcelles MV, M1000 et M2010. Elle a été réalisée à partir de rhizomes ou de plants de *Miscanthus* provenant de trois souches nommées B, A et I. Pour M1000, M500, M200 et M2007, ce sont des rhizomes qui ont été implantés à une densité de 20000 pieds par ha. Pour MV, M1000 et M2010, ce sont des plants pré-démarrés à une densité de 15000 et 20000 pieds.

Le *tableau 1* reprend les principales caractéristiques de plantation de *Miscanthus*.

Méthodologie de caractérisation des sols

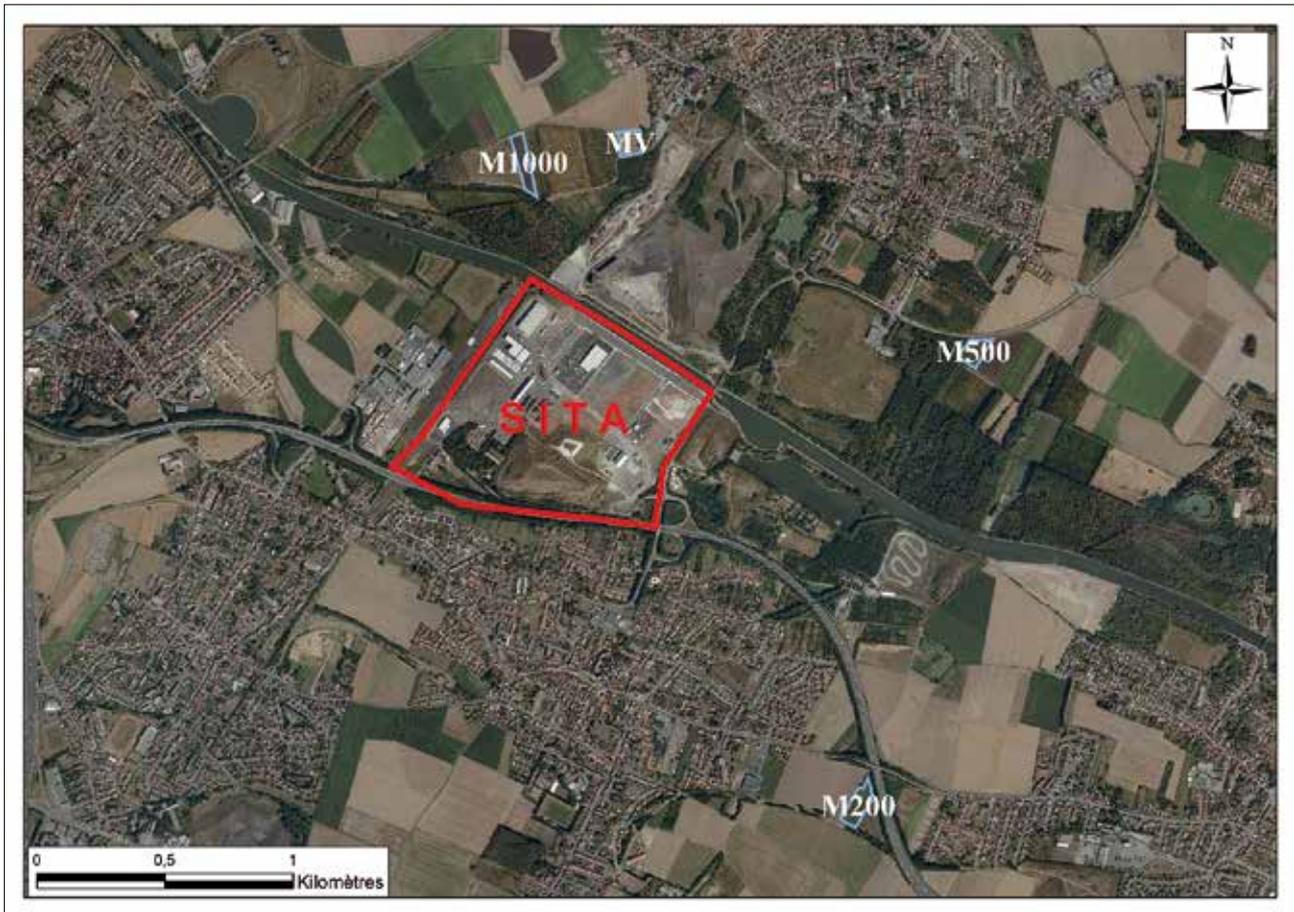
Sur chacune des parcelles étudiées, la méthodologie retenue pour la caractérisation des sols et des polluants correspond à une démarche emboîtée comprenant successivement :

- une reconnaissance des sols jusqu'à 1,20m de profondeur au moyen d'une tarière à main,
- la réalisation de prélèvements de sol sur la couche organo-minérale (0 - 25cm) avec, sur l'ensemble de ces échantillons, la mesure des concentrations pseudo-totales en Cd, Pb et Zn, ainsi que la détermination des paramètres agronomiques (pH, CaCO₃ total, CEC, cations échangeables...) sur environ 10 % des échantillons,
- la description et l'échantillonnage des sols en profondeur au moyen notamment d'une fosse par parcelle en vue d'évaluer la distribution verticale de Cd, Pb et Zn.

Il est à noter que la démarche présentée ci-dessous fait partie d'un dispositif plus complexe nécessaire aux autres questionnements du projet Phytener.

Figure 1 - Localisation des parcelles de *Miscanthus* sur sols contaminés.

Figure 1 - Location of the plots of *Miscanthus* on contaminated soils.



Méthodologie de caractérisation de la flore adventice

Inventaires floristiques

Sur chacune des six parcelles, des inventaires floristiques ont été réalisés sur deux années (2009 et 2010), au printemps et en été¹. La végétation des parcelles expérimentales a été caractérisée selon les principes de la méthode sigmatiste de Braun-Blanquet. La première étape consiste à déterminer une zone de végétation apparemment homogène. La deuxième étape est la réalisation d'un relevé floristique sur chacune des zones homogènes déterminées et sur une surface appelée «aire minimale» (surface contenant 90 à 95 % des espèces de la zone étudiée). Dans notre contexte, celle-ci a été assimilée à la totalité de la parcelle étudiée en raison de l'homogénéité de la couverture végétale et de la petite surface des parcelles. Seule exception, la parcelle M500 pour laquelle deux relevés ont été réalisés en raison de l'existence d'une zone nettement plus hydromorphe au sud de la parcelle, se traduisant par la présence d'une végétation caractéristique de ce type de milieu.

Sur le terrain, chaque espèce est identifiée par son taxon suivant la nomenclature principale de référence de la «Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché du Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines» (Lambinon *et al.*, 2004 – 5^e édition) et son nom vernaculaire. Toutes les plantes n'ayant pas la même importance (Faurie *et al.*, 2003), la seule liste des espèces ne suffit pas pour caractériser un milieu. Aussi, chaque espèce est affectée d'un coefficient d'abondance-dominance, défini par Braun-Blanquet, noté comme suit :

+	Recouvrement inférieur à 5% avec un faible nombre d'individus
1	Recouvrement inférieur à 5% avec un grand nombre d'individus
2	5% < recouvrement < 25%
3	25% < recouvrement < 50%
4	50% < recouvrement < 75%
5	Recouvrement > 75%

Tableau 1 - Caractéristiques des cultures de *Miscanthus*.

Table 1 - *Miscanthus* crops characteristics.

	Cultures sur sols contaminés				Cultures témoins	
	MV	M1000	M500	M200	M2007	M2010
Année de plantation	2010	2010	2007	2007	2007	2010
Origine de <i>Miscanthus</i>	B + A + I	A + B	B	B	B	B + A
Nature des plantations	plant	Rhiz + plant	Rhiz	Rhiz	Rhiz	plant
Densité de plantation*	15 000 et 20 000	20000, 15000	20000	20000	20000	15000

Légende : * : nombre de pieds par hectare; Rhiz = rhizome

¹ Les espèces inventoriées lors de ces deux périodes d'investigations alimentent le même relevé, il ne s'agit pas de relevés indépendants.

Au laboratoire, le statut régional, le degré de rareté régionale, la menace de l'espèce et ses éventuels niveaux de protection et la valeur patrimoniale de chaque espèce ont été précisés de manière à qualifier la diversité floristique des parcelles étudiées. Cette caractérisation est établie sur la base de l'inventaire de la flore vasculaire du Nord - Pas-de-Calais (ptéridophytes et spermatophytes) : raretés, protections, menaces et statuts établis par le Centre Régional de Phytosociologie (CRP) du Conservatoire Botanique National (CBN) de Bailleul (2005).

Analyse phytosociologique des relevés

L'analyse de la végétation des cultures de *Miscanthus* a été réalisée à partir de tableaux phytosociologiques. Pour ce faire, les données des relevés sont reportées dans un «tableau brut» à double entrée. À chaque ligne correspond une espèce, à chaque colonne un relevé et à la croisée des lignes et des colonnes figure le coefficient d'abondance-dominance qui constitue l'information descriptive. Ce tableau brut est ensuite ordonné (par permutations des lignes et des colonnes) de manière à «rapprocher les relevés qui se ressemblent le plus dans des catégories appelées syntaxons» (Gorenflot et de Foucault, 2005). Ainsi, par regroupement des relevés en fonction de la présence, l'abondance et la fréquence des espèces dans les relevés, l'identification et l'analyse des communautés végétales peuvent être effectuées.

Méthode de caractérisation de la flore adventice des cultures de *Miscanthus*

Pour caractériser la flore adventice des cultures de *Miscanthus*, trois indices ont été déterminés :

1. la **richesse spécifique** (S_{obs}) qui correspond à la somme des espèces (n_i) d'un relevé

$$S_{obs} = \sum n_i$$

2. l'**indice de rareté** (I_r) qui correspond au ratio entre le nombre d'espèces très communes à assez communes (N_c) et le nombre total des espèces d'un relevé (S_{obs})

$$I_r = \frac{N_c (= \sum n_i [C, CC, AC])}{S_{obs}}$$

I_r varie de 0 à 1. Plus il est proche de 1, plus les adventices de la culture étudiée sont communes.

3. l'indice d'indigénat (I_{nd}) qui correspond au ratio entre le nombre d'espèces indigènes (N_{ind}) et le nombre total des espèces d'un relevé (S_{obs}).

$$I_{nd} = \frac{N_{ind} (= \sum n_i [I])}{S_{obs}}$$

I_{nd} varie de 0 à 1. Plus il est proche de 1, plus les adventices de la culture étudiée sont indigènes.

Pour compléter cette approche, trois caractéristiques écologiques ont été considérées : le mode de reproduction (gamie), le mode de dispersion des diaspores (chorie) et le type biolo-

gique. Ces caractéristiques ont été définies pour chaque espèce par le biais de la base de données Baseflor (Julve, 1998).

RÉSULTATS

Caractérisation des sols

Les observations réalisées sur chacune des parcelles de *Miscanthus* au moyen de sondages à la tarière soulignent une grande variabilité des types de sols (tableau 2).

Les sols présentent en surface des textures limoneuses, limono-argileuses ou encore limono-argilo-sableuses. Ils peuvent être épais (plus de 1,20 m d'épaisseur) ou reposer parfois dès 30 cm sur un matériau à dominante argileuse (ar-

Tableau 2 - Paramètres pédogéo-chimiques des sols des parcelles de *Miscanthus* M2007, M200, M500, M2010, MV et M1000.

Table 2 - Soil geochemical parameters of *Miscanthus* crops M2007, M200, M500, M2010, MV et M1000.

Paramètres	unité	M2007	M200	M500	M2010	MV	M1000
Granulométrie moyenne							
Argile	g kg ⁻¹	199	213	311	208	196	175
Limons fins	g kg ⁻¹	265	177	183	250	180	191
Limons grossiers	g kg ⁻¹	425	321	339	418	350	378
Sables fins	g kg ⁻¹	105	259	147	112	234	226
Sables grossiers	g kg ⁻¹	6	30	20	12	40	30
Variables agronomiques moyennes							
Carbone organique	g kg ⁻¹	8,9	16,4	35,0	13,7	18,2	16,5
Matière organique	g kg ⁻¹	15,0	28,3	61,7	23,6	31,6	28,6
pHeau		6,1	7,8	8,0	7,4	8,2	8,1
CaCO ₃	g kg ⁻¹	≤ 1,10	7,7	22,7	2,1	10,2	6,6
P ₂ O ₅	g kg ⁻¹	0,13	0,16	0,11	0,18	0,16	0,12
CEC	cmolkg ⁻¹	10,0	16,3	32,8	10,7	14,9	14,8
Ca ²⁺	cmol +kg ⁻¹	10,0	17,2	33,9	12,2	16,6	16,4
Mg ²⁺	cmol +kg ⁻¹	0,50	0,72	1,00	0,68	0,61	0,65
Na ⁺	cmol +kg ⁻¹	0,06	0,04	0,07	0,04	0,08	0,04
K ⁺	cmol +kg ⁻¹	0,26	0,75	0,63	0,42	0,60	0,44
Teneurs pseudo-totales moyennes en métaux							
Pb	mg kg ⁻¹	23,7	227	524	26,3	819	549
Cd	mg kg ⁻¹	0,56	5,4	11,9	0,30	15,3	10,4
Zn	mg kg ⁻¹	47,5	359	573	55,7	1048	796
Cu	mg kg ⁻¹	14,5	24,3	40	15,1	36,0	25,3

gile, argile limono-sableuse, argile limoneuse ou argile sableuse). Les sols aux alentours de Metaeurop présentent souvent dès 25/50 cm des taches d'oxydo-réduction qui attestent d'un engorgement temporaire en lien avec la remontée de la nappe phréatique en période hivernale (REDOXISOLS ou BRUNISOLS rédoxiques issus de dépôts loessiques). Sur la partie sud-est de la parcelle M200, plus haute, les sols sont développés sur des limons argileux et des limons argilo-sableux. Vers le bas de la parcelle, le recouvrement limoneux s'épaissit pour excéder 1,20m. Les sols de la parcelle MV sont constitués de limons et limons argileux reposant sur des matériaux argilo-limoneux à argilo-sableux. Au nord de la parcelle M1000, ils sont issus de limons reposant à 30 cm sur des limons argileux. Au sud, sur 1/3 de la parcelle, les limons argilo-sableux reposent à 40 cm sur des dépôts à dominante argileuse. La parcelle M500 se différencie en présentant des sols issus d'alluvions limono-argileuses carbonatés (FLUVIOSOLS REDOXISOLS).

En ce qui concerne les parcelles considérées comme témoins, les sols de la parcelle M2007 sont développés sur des limons loessiques de plus de 1,20m d'épaisseur (BRUNISOLS luviqes). Les sols de la parcelle M2010 sont de texture limo-

no-argileuse et renferment une forte charge en cailloux de silice issus de l'altération de la craie (BRUNISOLS). Ces deux sols sont naturellement bien drainés.

Les pH des sols des parcelles contaminées et de la parcelle témoin M2010 sont alcalins (proche de 8) tandis que le sol de la parcelle M2007 a un pH légèrement acide (pH = 6,1). Les teneurs en carbonates totales, en azote total, en carbone organique, CEC, Ca^{2+} et Mg^{2+} sont les plus élevées sur la parcelle M500 et sont significativement différentes des teneurs en ces éléments mesurées sur les autres parcelles. Il est à noter qu'en comparaison des autres parcelles, le sol de la parcelle M2007 se différencie par des teneurs en $CaCO_3$ total, carbone organique et une CEC et un ratio C/N significativement plus faibles. Ce ratio C/N est plus élevé sur le sol de la parcelle MV (15,2) que sur les autres parcelles.

L'horizon labouré (0 - 25 cm) des parcelles M2007 et M2010 présentent des concentrations en ETM conformes aux teneurs agricoles habituelles (TAH) en région Nord - Pas de Calais (Sterckeman *et al.*, 2002), à l'exception du plomb pour M2010 (tableau 3).

Les résultats obtenus sur les parcelles aux alentours de l'ancienne fonderie soulignent le fort degré de contamination des

Tableau 3 - Valeurs moyennes et écart-type des concentrations en Pb, Zn et Cd des sols (0 – 25 cm) des 6 parcelles de *Miscanthus* étudiées.

Table 3 - Means \pm SD of Pb, Zn and Cd concentrations in topsoil (0 – 25 cm) Cd, Pb et Zn .

	Teneur moyenne* (en mg.kg ⁻¹) en Pb, Zn et Cd des sols des parcelles de <i>Miscanthus</i>						TAH (en mg.kg ⁻¹)
	MV	M1000	M500	M200	M2007	M2010	
Plomb	731 \pm 67	549,3 \pm 64,6	532 \pm 46	215 \pm 24	20 \pm 3	94	33
Zinc	1000 \pm 88	796,5 \pm 134,2	584 \pm 49	330 \pm 43	62 \pm 2	56	56
Cadmium	14,1 \pm 1,4	10,4 \pm 1,3	9,7 \pm 07	3,8 \pm 06	0,2 \pm 0,1	0,3	0,4

* n=3 pour les parcelles expérimentales sauf pour M2010; TAH : teneurs agricoles habituelles

Tableau 4 - Comparaison des indices de diversité, de rareté et d'indigénat de la flore adventices des cultures de *Miscanthus*.

Table 4 - Comparison of diversity, rarity and native indices of *Miscanthus* crop.

		MV	M1000	M500	M200	M2007	M2010
Sobs	2010	9	14	31	22	26	Nm
	2011	25	27	39	25	30	26
Ind	2010	1	1	1	1	0,91	/
	2011	0,92	0,96	0,92	0,96	1	0,94
Ir	2010	1	1	0,96	1	1	/
	2011	1	1	0,97	1	1	1

Légende du tableau 4 : Nm = Non mesuré

sols. Le gradient de contamination selon la distance à la source de contamination est confirmé.

Caractérisation de la flore adventice des parcelles de *Miscanthus*

Le tableau 4 précise les indices de richesse spécifique, de rareté et d'indigénat de la flore des parcelles plantées en *Miscanthus* en 2010 et 2011.

La diversité totale des adventices des cultures étudiées (Sobs) varient selon les parcelles considérées. M500 est la parcelle contaminée où se développe le plus grand nombre d'espèces. Cette diversité est d'ailleurs supérieure aux parcelles témoins M2007 et M2010.

En ce qui concerne la composition en espèces du couvert végétal, ce sont majoritairement des espèces locales qui colonisent les parcelles plantées en *Miscanthus* (Ind supérieur à 0,90) (tableau 4). Sur l'ensemble des espèces recensées en 2011, trois d'entre elles sont naturalisées : la Conyze du Canada (*Erigeron canadensis*) qui est le seul taxon de l'échantillonnage à présenter un caractère invasif, l'Amarante réfléchie (*Amaranthus retroflexus*) et l'Epilobbe cilié (*Epilobium ciliatum*).

En termes de rareté, la flore vasculaire des parcelles de *Miscanthus* est commune à très commune (Ir compris entre 0,96 et 1). Une espèce est néanmoins considérée assez rare à l'échelle régionale : le Vélar fausse-girolée (*Erysimum cheiranthoides*). Cette espèce, observée exclusivement sur la parcelle M500, est également le seul taxon considéré comme « quasi-menacé » à l'échelle régionale selon les critères de l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) (les autres espèces étant

de préoccupation mineure). Plutôt liée aux zones humides, cette brassicacée doit probablement sa présence au caractère hydromorphe des sols de la parcelle M500 (sols développés sur des alluvions argilo-calcaires). Cette espèce peut être considérée d'intérêt patrimonial dans le Nord - Pas de Calais. Néanmoins, elle ne fait l'objet d'aucune mesure de protection particulière.

En matière de stratégie de reproduction de la flore vasculaire, les insectes jouent un rôle important dans la dispersion du pollen (près de la moitié des espèces les utilisent comme agent de dispersion). Ces interactions biotiques sont importantes dans le développement du couvert végétal. Dans notre contexte, elles témoignent de l'intégration des agrosystèmes *Miscanthus* dans la dynamique biocénotique générale. La dissémination des diaspores est principalement assurée par le vent (anémochorie), la pesanteur (barochorie) et la faune (épizoochorie). Ainsi, la flore vasculaire des parcelles de *Miscanthus* utilise des facteurs écologiques biotiques et abiotiques lui permettant d'étendre son aire de répartition.

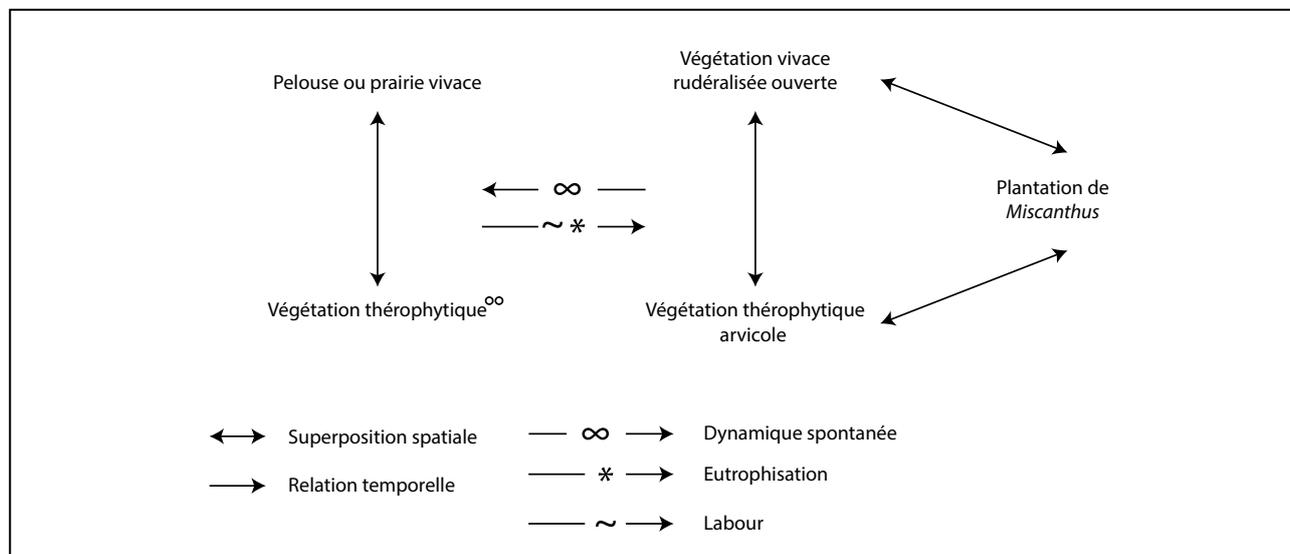
Description des communautés d'adventices des parcelles de *Miscanthus* étudiées

La végétation des parcelles plantées en *Miscanthus* montre la présence de deux grands types biologiques : les espèces annuelles ou thérophytes (Th) et les espèces vivaces (V) hémicryptophytes (bourgeons persistants à la surface du sol durant l'hiver) et géophytes (organes pérennants dans les sols durant l'hiver).

Avec *Capsella bursa-pastoris*, *Chenopodium album*, *Anagallis arvensis*, *Erigeron canadensis*, *Matricaria chamomilla*,

Figure 2 - Schéma systémique de la dynamique évolutive des plantations de *Miscanthus*.

Figure 2 - Systemic pattern of the evolutionary dynamics of plantations of *Miscanthus*.



Légende de la figure 3 : ∞ signifie « très fragmentaire » ; arvicole est un adjectif pour qualifier la végétation des champs cultivés

Mercurialis annua, *Myosotis arvensis*, *Polygonum aviculare*, *P. lapathifolium*, *P. persicaria*, *Senecio vulgaris*, *Sinapis arvensis*, *Sonchus asper*, *Veronica persica*, *Stellaria media*, la végétation thérophytique se rattache clairement aux *Stellarietea mediae*.

M1000 et MV peuvent se rattacher au *Kickxietum spuriae* des champs plutôt calcaires, alors que, avec *Apera spica-venti* et *Matricaria chamomilla*, M2010 se rapproche plutôt de l'*Alchemillo arvensis* – *Matricarietum chamomillae* des champs modérément acides. La végétation thérophytique des parcelles plantées en 2007 est plus difficile à interpréter car le cortège annuel est bien plus restreint. Notons la présence de *Erysimum cheiranthoides* sur M500 et la présence de *Echinochloa crus-galli* et *Setaria verticillata* sur M200, deux graminées à photosynthèse en C4 qui rapprochent cette végétation du *Panico* – *Setarion viridis*, adaptée aux traitements herbicides appliquées aux plantes cultivées elles-mêmes en C4 (telles que le Maïs, *Miscanthus*).

Avec *Cirsium arvense*, *Convolvulus arvensis* et *Equisetum arvense*, globalement, la végétation vivace observée se rapproche des friches culturales du *Convolvulo arvensis* – *Agropyron repentis* et témoigne des perturbations qui ont accompagné la plantation de *Miscanthus*.

Nous n'irons pas plus loin que ce niveau hiérarchique d'alliance du *Convolvulo*– *Agropyron repentis* pour les parcelles M1000, MV et M2010 plantées en 2010 car la végétation vivace y est trop fragmentaire.

En revanche, sur les parcelles M500, M200 et M2007 plantées en 2007, la présence de quelques espèces prairiales (*Agrostis capillaris*, *Holcus lanatus*, *Dactylis glomerata*), y compris hygrophiles (*Agrostis stolonifera*, *Ranunculus repens*, *Epilobium hirsutum*, *E. parviflorum*, *E. ciliatum*) laisse supposer qu'une prairie locale tend à se reconstituer par dynamique progressive sur les parcelles de *Miscanthus* les plus anciennes de notre échantillon. Les parcelles plantées en 2007 s'enrichissent en *Sonchus arvensis*, *Daucus carota*, *Plantago major*, *Urtica dioica*. Reliée au groupement thérophytique à *Erysimum cheiranthoides*, la parcelle M500 accueille des taxons hygrophiles (*Eupatorium cannabinum*, *Humulus lupulus*, *Calamagrostis epigejos*, *Calystegia sepium*, *Lythrum salicaria*, *Mentha arvensis*, *Polygonum amphibium* f. terrestre, *Symphytum officinale*, *Pulicaria dysenterica*) qui montrent une relation dynamique vers une mégaphorbiaie eutrophe du type *Convolvulo sepium*–*Eupatorietum cannabini*. Avec *Achillea millefolium*, *Heracleum sphondylium*, *Agrostis*

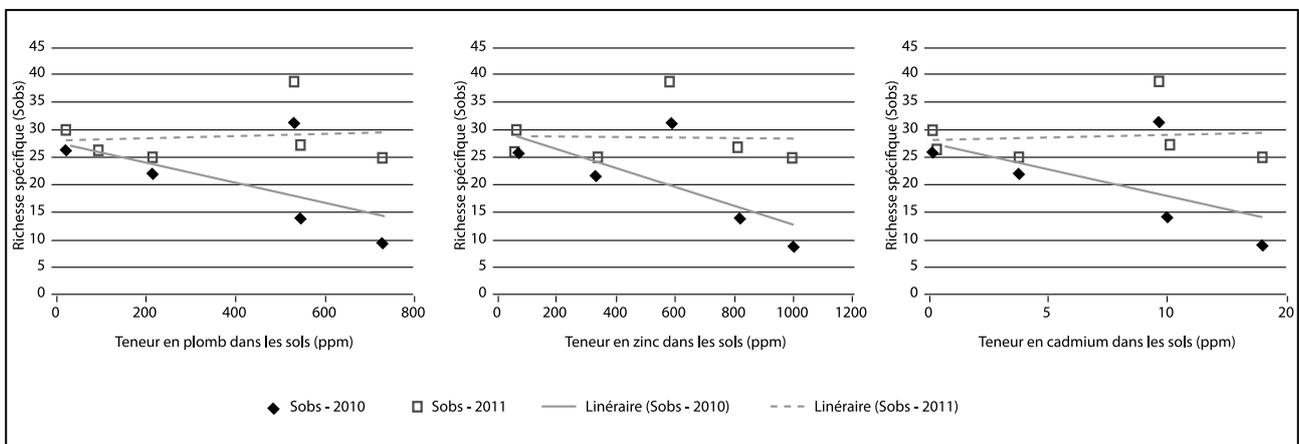
Tableau 5 - Mise en relation du rapport thérophytes/vivaces (Th/V) et de l'année de plantation de *Miscanthus*.

Table 5 - Linking therophytes/perennial report and the year of planting of *Miscanthus*.

	MV	M1000	M500	M200	M2007	M2010
Année de plantation	2010	2010	2007	2007	2007	2010
Th/V 2010	0,28	1,16	NC	0,57	0,26	0,66
Th/V 2011	1,08	2,14	0,66	1	0,76	2,71

Figure 3 - Relation entre les teneurs en plomb, zinc et cadmium mesurées dans les sols et la richesse spécifique des adventices des cultures de *Miscanthus*.

Figure 3 - Relationships between lead, zinc and cadmium concentrations measured in topsoil and species richness of weed species of *Miscanthus* crops.



capillaris..., M200 montre une relation avec une prairie méso-hygrophile eutrophile.

Dynamique évolutive des communautés d'adventices

L'analyse des communautés d'adventices incite à considérer que deux types de communautés sont intriquées dans les parcelles de *Miscanthus*, l'une thérophytique, l'autre vivace. Sur la base de nos observations, la dynamique évolutive de ces communautés a été synthétisée par de Foucault, dans le schéma systémique proposé en *figure 2*.

Après le travail du sol et la plantation des rhizomes, s'installent spontanément et très rapidement de nombreuses thérophytes pionnières qui ne trouvent qu'une faible concurrence, y compris de la part des jeunes plants de *Miscanthus*. Quelques vivaces issues de la végétation initiale ou traduisant la perturbation par la mise en culture sont également présentes. La végétation thérophytique va peu à peu se trouver en concurrence avec les espèces vivaces qui colonisent les parcelles. À l'appui de ce phénomène, notons qu'en 2011, le rapport thérophytes/vivaces (Th/V) variaient entre 0,66 et 1 pour les parcelles mises en place en 2007, contre 1,08 à 2,71 pour celles plantées en 2010 (*tableau 5*).

Cette dynamique spontanée de la végétation est attendue lorsqu'il s'agit d'une culture pérenne. Ces résultats indiquent que la culture de *Miscanthus* ne semble pas interrompre la dynamique évolutive des communautés sur les parcelles étudiées.

Comme l'illustre la *figure 3*, une eutrophisation du milieu et/ou un retour aux pratiques agricoles sur la parcelle considérée (ex. labour) modifierait la dynamique évolutive de la végétation et pourrait de nouveau la faire évoluer vers une végétation vivace rudéralisée ouverte superposée à une végétation thérophytique arvicole.

Analyse de l'influence de la contamination du sol et de la culture du *Miscanthus* sur les communautés d'adventices

La *figure 4* met en relation les teneurs en plomb, zinc et cadmium mesurées dans les sols et la richesse spécifique (Sobs) des parcelles étudiées.

En 2010, quel que soit l'élément considéré, le nombre d'espèces végétales recensées tend à diminuer lorsque les concentrations en ETM mesurées dans les sols augmentent, à l'exception de la parcelle M500 qui présente une biodiversité végétale élevée, supérieure à celle observée pour les parcelles de référence. Néanmoins, la richesse spécifique élevée de M500 s'explique notamment par la variabilité de l'humidité des sols de la parcelle qui entraîne localement le développement d'une végétation riche et caractéristique de milieux nitrophiles hu-

mides. Ainsi, l'hypothèse d'une relation possible entre les concentrations en ETM des sols et la richesse spécifique pour les parcelles de *Miscanthus* étudiées est cohérente avec les résultats obtenus lors de cette première année d'observation.

En 2011, aucune relation n'est mise en évidence entre le nombre d'espèces recensées et les concentrations en ETM dans les sols; l'hypothèse émise en 2010 est invalidée. En revanche, une augmentation de la richesse spécifique de l'ensemble des parcelles est observée. Ces résultats soulignent également que la variabilité inter-annuelle de la richesse spécifique est plus importante pour les cultures âgées d'un an (MV, M1000 et M2010) que pour les parcelles âgées de trois ans (M500, M200 et M2007). Autrement dit, l'augmentation de la richesse spécifique est plus importante pour les parcelles les plus récemment implantées.

DISCUSSION

Dans le contexte étudié, la flore adventice des parcelles de *Miscanthus* se compose essentiellement d'espèces indigènes, communes et peu menacées (niveau de préoccupation mineure). Seul le Vélar fausse giroflée, espèce assez rare dans la région, est considéré comme quasi-menacée.

En termes de diversité, l'inventaire floristique des cultures de *Miscanthus* a mis en évidence une richesse spécifique supérieure à celle des parcelles sous culture inventoriées dans le cadre du programme complémentaire au Réseau de Mesures de la Qualité des Sols dans la Région Nord-Pas de Calais (RMQS «régional complété») (Douay *et al.*, 2005). En effet, il a été montré que la diversité spécifique des parcelles était comprise entre 7 et 22 espèces toutes occupations des sols confondues et en moyenne de 13 espèces (n=6) pour des sols cultivés en maïs. Ces résultats ont été obtenus sur des sols présentant des teneurs moyennes en ETM inférieures à celles des parcelles de *Miscanthus*. De plus, le protocole de prospection botanique est moins représentatif car, dans le cadre du RMQS «régional complété» toute la parcelle n'était pas prospectée. Dans notre contexte d'étude, 66 espèces ont été inventoriées en 2010 et 84 en 2011 sur l'ensemble des parcelles de *Miscanthus* étudiées et la richesse spécifique de la flore adventice (Sobs) varie de 9 (pour MV en 2010) à 39 espèces (pour M500 en 2011). Cette richesse spécifique s'observe malgré la densité de *Miscanthus*. A titre de comparaison, Rowe *et al.* (2009) ont mis en évidence une richesse spécifique maximale de 25 espèces pour des cultures de *Miscanthus* de densité équivalente (environ 20000 plants par hectare).

Ainsi, nos résultats tendent à confirmer l'hypothèse, émise par Semere et Slater (2007), d'une diversité d'adventices importante pendant la période d'installation du *Miscanthus*, c'est-à-dire les trois premières années, en partie en raison d'une croissance lente du *Miscanthus* les premières années.

De plus, les richesses spécifiques les plus élevées sont observées au niveau des cultures jouxtant des milieux et habitats variés (ex. : M500). Ce résultat souligne l'importance du contexte environnemental de la culture, et notamment l'hétérogénéité des habitats proches, sur la diversité des adventices et rejoint les propos de l'OCDE (2001) qui stipule qu'en général, «*la qualité des terres agricoles, du point de vue de la biodiversité, est d'autant plus grande que (...) la diversité des structures des habitats est importante*». En lien avec cela, l'analyse de la stratégie de reproduction des adventices, illustrée par les modes de pollinisation et de dispersion des diaspores ainsi que le type biologique des espèces recensées, a mis en évidence des interactions fortes entre la flore vasculaire et le milieu environnant qui permettent un enrichissement de la biodiversité végétale des cultures. Ces résultats soulignent l'intégration et le fonctionnement de l'agrosystème *Miscanthus* dans son contexte écosystémique. Aussi, au niveau communautaire, une dynamique évolutive est observée. En effet, deux grands types biologiques sont représentés : les annuelles (végétation thérophytique) et les vivaces. Globalement, les communautés d'adventices présentes les premières années suivant l'implantation de *Miscanthus* témoignent des perturbations occasionnées lors de la plantation de *Miscanthus* et de l'hétérogénéité locale du milieu. Dès la deuxième année, ces influences s'amenuisent et une végétation de type prairial s'installe. Dans notre contexte expérimental, les cultures plantées en 2007 sont celles qui présentent à la fois une diversité plus importante et le plus grand nombre de vivaces. En permettant une reprise de la dynamique évolutive de la végétation, le cycle de culture long de *Miscanthus* est donc favorable à la viabilité écologique des cultures.

En ce qui concerne la contamination des sols, nos résultats n'ont pas mis en évidence de relation entre la contamination en ETM des sols et leur richesse spécifique. Sans que l'influence de ce facteur ne puisse totalement être exclue, il ne semble pas, dans cette période d'installation de *Miscanthus*, être un facteur prépondérant.

CONCLUSION

L'analyse de la dynamique évolutive des communautés arvicoles de *Miscanthus* a révélé une bonne capacité adaptative des adventices. En retour, les adventices ne semblent pas nuire au développement de *Miscanthus* cultivé sur sols contaminés, une fois la période d'implantation réussie. A plus long terme, le suivi de l'évolution des communautés arvicoles et leur stratégie de reproduction sur plusieurs années consécutives devraient permettre de conforter les hypothèses émises sur l'évolution dans le temps et dans l'espace de la flore adventice des cultures de *Miscanthus* sur sols contaminés. De la même façon, l'étude des liens statistiques entre les indices de diversité faunistique, les paramètres des sols et la détermination des groupements fonc-

tionnels sera d'intérêt et est envisagée en perspectives.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME pour son soutien au programme Phytener.

BIBLIOGRAPHIE

- Bert V., Hadj-Sahraoui A., Leyval C., Fontaine J., Ouvrard S., 2012 - Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués, état de l'art et guide de mise en œuvre. Edp sciences, 86 p.
- Centre Régional de Phytosociologie du Conservatoire Botanique National de Bailleul, 2005 - Inventaire de la flore vasculaire du Nord/Pas-de-Calais (Ptéridophytes et Spermatophytes) : raretés, protections, menaces et statuts. Version n°3a/26, septembre 2005, 90 p.
- Clijsters H., Vangronsveld J., Van der Lelie D., and Colpaert J., 2000 - Ecological aspects of phytostabilization of heavy metal contaminated soils. *In* : Topics in ecology : structure and function in plants and ecosystems. Ceulemans R. [edit.], e.a., Wilrijk, University of Antwerp, UIA, 299-306.
- Cunningham S., Germani S., Huang J., 1997 - Plant based soil remediation : Phytoextracting Pb from Pb-contaminated soils using novel techniques. Dupont Central Research and Development, Newark.
- Douay F., Fourrier H., Pruvot C., Schwartz C., Deram A., Descamps M., 2005 - Programme complémentaire au Réseau de Mesures de la Qualité des Sols dans la Région Nord-Pas de Calais. Conseil Régional Nord - Pas de Calais, ADEME, Agence de l'Eau Artois Picardie, DIREN. 49 p., annexes.
- Faurie C., Ferra C., Médori P., Dévaux J., Hemptinne J.-L., 2003 - Écologie, approche scientifique et pratique. TEC & DOC Lavoisier, 5^e Ed. 408 p.
- Guinochet M., 1973 - Phytosociologie. Masson & Cie. Paris, 227 p.
- Gorenflot R., de Foucault B., 2005 - Biologie végétale, les cormophytes. 7^{ème} Edition, Dunod, Paris, 594 p.
- Julve Ph., 1993 - Synopsis phytosociologique de la France (communautés de plantes vasculaires). Lejeunia NS 140 : 1-160.
- Lambinon J., De Langhe J.-E., Delvosalle L., Duvigneaud J., 1992 - Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché du Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes). 4^{ème} édition, Meise : édition du Patrimoine du jardin botanique national de Belgique, 1092 p.
- OCDE, 2001 - Réunion d'experts de l'OCDE sur les indicateurs de biodiversité agricole. Résumé et recommandations. 5-8 NOVEMBRE 2001, Zurich, Suisse, 35 p. En ligne : <http://www.oecd.org/fr/tad/agriculture-durable/40340033.pdf>
- Rowe R.L., Street N.R., Taylor G., 2009 - Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in UK. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 : 271-290.
- Salt D. E., Blaylock M., Kumar N. P. B. A., Dushenkov V., Ensley B., Chet I., 1995 - Phytoremediation : A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 468-474.
- Semere T., Slater F.M., 2007 - Ground flora, small mammal and bird species diversity in *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass & Bioenergy* 31 : 20-29.
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schwartz C., 2002 - Référentiel pédo-géochimique du Nord Pas de Calais. 130 p.
- Vangronsveld J., 2000 - Phytoremediation : general principles and overview of methods. *Proceedings of the Topical days on phytomanagement of contaminated environment*. Vandenhove H. [edit.] pp. 7-9. SCK-CEN, BLG-8

