

Développement d'un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région wallonne anticipant la future directive européenne sur les sols

Arnaud Warin ⁽¹⁾, René Bernaerdt ⁽²⁾, Émile Delcarte ⁽³⁾, Philippe Maesen ⁽³⁾, Jean Naud ⁽⁴⁾, Jean Marie Marcoen ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Céréales Plus asbl. Convention ARVA (Association pour la Recherche et la Valorisation en Agriculture). 123 rue de Huy. B-4300 Waremme (Belgique). E-mail : warin.a@fsagx.ac.be

⁽²⁾ Service Agricole de la Province de Liège. Céréales Plus asbl. 123 rue de Huy. B-4300 Waremme (Belgique).

⁽³⁾ Bureau d'études Environnement et Analyses de Gembloux (BEAGx). Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

⁽⁴⁾ Cellule Interdépartementale d'Analyses (CEAN). Université Catholique de Louvain. Bâtiment Mercator. 2 Place Pasteur. B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).

⁽⁵⁾ Laboratoire de Géopédologie. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

La Commission européenne finalise actuellement sa stratégie de protection des sols dans une Directive "sol" attendue pour la fin 2004. Le projet ARVA (= terres arables, en latin) de la Région wallonne a pour mission de mettre sur pied un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles. Son action se déroule en quatre phases : (i) la recherche d'une démarche de surveillance en adéquation avec la volonté européenne et les exigences de qualité de l'agriculture ; (ii) l'inventaire des connaissances déjà acquises sur la qualité des sols et l'analyse de leur utilité sur l'ensemble du territoire ; (iii) l'évaluation de la précision avec laquelle il est possible de détecter une évolution dans les sols en Région wallonne, moyennant les sites chantiers mis en place pour valider la méthodologie des mesures ; (iv) une analyse des stratégies de structuration d'un futur réseau de surveillance. Le choix d'une stratégie dépendant de la menace prise en compte, on veillera à ce que les options choisies ne compromettent pas de futures actions de surveillance.

Mots-clés. Qualité, sol, surveillance, indicateur, réseau, Belgique.

Setting-up of a soil monitoring system in Walloon Region anticipating the future European directive on soil. The European Commission currently finalizes its Framework Directive for soil protection waited for the end 2004. The project ARVA of the Walloon Region aims setting up the monitoring of arable land. The project proceeds in four phases: (i) the development of a soil monitoring which complies with the requirements of both the European regulation and the Walloon agriculture practices; (ii) the inventory of existing knowledge on the quality of soil in the Walloon Region and their relevance at Regional scale; (iii) the best estimate of the accuracy needed to detect evolutions in soil. To do this, test sites will help to validate the methodology used; (iv) an analysis of the strategies for structuring a future monitoring network. This strategy depends on the threat taken into consideration, as the selected options shall not compromise future needs for monitoring.

Keywords. Quality, soil, monitoring, indicator, network, Belgium.

1. INTRODUCTION

La qualité des sols fut d'abord définie comme une aptitude à fournir à l'ensemble de la biomasse, et en particulier aux plantes, un milieu propice à son développement (Power, Myers, 1989). La notion de qualité du sol s'apparente au concept de fertilité. Cette première définition correspond à une optique de production : c'est une "capacité à supporter la croissance

végétale". Répondant ensuite aux préoccupations liées à la dégradation des sols, la qualité des sols intègre progressivement une dimension environnementale. Elle devient la capacité d'un certain type de sol à fonctionner au sein d'un écosystème naturel ou aménagé, à supporter une production végétale ou animale, à contribuer à la qualité de l'air et de l'eau, et à assurer la santé des plantes, des hommes, des animaux et de leur habitat (Doran *et al.*, 1994). La

qualité est également associée à la notion de résilience : capacité à retrouver un équilibre après avoir subi une perturbation (Chaussod, 1996).

Ces définitions très larges traduisent la complexité de la notion de qualité des sols. D'une part, les multiples critères de qualité varient selon les types de sol, les modes d'exploitation, les fonctions considérées ou les menaces prises en compte. D'autre part, il est relativement difficile de définir des critères diagnostiques et de normaliser les processus complexes intervenant dans ce réacteur biogéochimique polyphasique qu'est le sol. La prise de conscience grandissante du fait que les sols soient une ressource non renouvelable et qu'ils jouent un rôle d'interface dans la biosphère a récemment poussé la Commission Européenne (CE) à établir une stratégie de protection des sols. Margot Wallström, la Commissaire chargée de l'environnement, a précisé : "Nous plaçons désormais la protection des sols au même plan que l'épuration de l'air et de nos ressources en eau. Pendant trop longtemps nous avons considéré le sol comme un bien acquis. Or, l'érosion, la diminution de la qualité et l'imperméabilisation des sols sont des problèmes majeurs dans toute l'Union Européenne (UE). Il s'agit d'un enjeu pour le développement durable car ces tendances sont en grande partie irréversibles et le sol est essentiel pour notre subsistance" (EEP, 2002). Cette volonté est retranscrite dans une Communication intitulée "Vers une stratégie thématique pour la protection des sols" (COM, 2002) qui décrit les fonctions et les caractéristiques des sols, les principales menaces et les politiques de l'UE importantes en la matière.

Les travaux scientifiques entamés par l'UE seront finalisés d'ici la fin 2004. Ils déboucheront sur une Directive donnant un ensemble de recommandations relatives à un système d'informations et de surveillance des sols ainsi qu'une série de propositions sur les mesures et actions futures. Le système de surveillance (monitoring) se fondera sur les systèmes d'informations et les bases de données existants. Il assurera l'harmonisation des méthodes et permettra de déterminer l'état des sols dans toute l'Europe. Ces mesures serviront de base à des travaux plus substantiels visant à assurer la protection des fonctions des sols

- la production d'aliments et de biomasse,
- le stockage, la filtration et la transformation de matières, matières premières et d'énergie,
- le rôle d'habitat d'une immense variété d'organismes vivants et de pool génique,
- les rôles physiques et culturels pour l'homme (élément du terroir, du paysage et du patrimoine, support des activités humaines).

L'UE axe son travail sur huit risques majeurs : l'érosion ; la contamination (localisée et diffuse) ; la

réduction du taux de matière organique ; le bétonnage et l'imperméabilisation du sol ; la compaction du sol ; l'appauvrissement biologique ; la salinisation ; les glissements de terrain et les inondations. Cinq groupes de travail ont été mis en place. Trois groupes travaillent sur les menaces prioritaires : l'érosion, les contaminations, les matières organiques. Les deux autres travaillent sur des thèmes horizontaux : la surveillance et la recherche. La coordination est assurée par une cellule interservices au sein de la Commission et par une cellule chargée de la représentation des États membres. Les groupes de travail techniques ont reçu pour consigne d'utiliser le cadre de travail "Driving Forces – Pressures – State – Impact – Responses" (CE – DG Env, 2003). Ce modèle est également utilisé par la Région wallonne pour dresser le Tableau de Bord de l'Environnement Wallon (TBEW). Pour le moment, la démarche wallonne n'intègre pas l'ensemble de la problématique "sol". En 2003, l'approche concernait les pollutions locales et la surveillance des sols forestiers (MRW-DGRNE, 2003). Les surfaces agricoles n'étaient que partiellement intégrées à ce bilan annuel.

Les huit risques cibles de l'UE ne menacent pas tous les sols de la Région wallonne. En 1994, l'État de l'Environnement wallon (MRW-DGRNE, 1994) désignait les risques régionaux pesant sur les sols. Sans constater d'importantes baisses de la qualité des surfaces agricoles, ce rapport soulignait : des baisses de fertilité liées à des diminutions de pH, à la déficience en certains éléments biogènes et à l'insuffisance des teneurs en matières organiques. Le rapport mentionnait également le risque de contamination lié à des apports excessifs de substances endogènes et exogènes : les éléments traces métalliques (ETM), les radionucléides, les micropolluants organiques (MPO). Ces apports diffus, potentiellement toxiques, pourraient provenir des engrais, des amendements, des produits recyclés, des pesticides, ou des retombées atmosphériques. Le rapport exposait enfin des pressions d'ordre physique en mettant l'accent sur le problème de l'érosion et de la compaction.

Témoignant d'une prise de conscience politique, le Plan d'Environnement pour le Développement durable (MRW, 1995) et le Contrat d'Avenir pour la Wallonie (MRW, 2002) ont inscrit dans leurs programmes l'amélioration de la législation sur les sols. Cette volonté s'est concrétisée par un décret, parfois dit "décret sol", relatif à l'assainissement des sols pollués et aux sites d'activités économiques à réhabiliter (voir Halen *et al.* ce numéro, p. 101-109). Précisons toutefois que les surfaces agricoles représentent la plus grande partie du territoire de la Région, soit environ 45 % de la superficie totale, et doivent encore faire l'objet d'une démarche spécifique. Comme le rappelle Cheverry *et al.* (2002), on assiste actuellement à un

renforcement des liens entre la production et la terre. Les surfaces agricoles doivent répondre à de nouveaux enjeux : la sécurité alimentaire, l'intérêt accru pour la qualité des produits (label de production, charte qualité), l'utilisation des sols agricoles pour valoriser certains types de déchets ou l'augmentation des contraintes environnementales dans le cadre de la réforme de la politique agricole commune, particulièrement la mise en œuvre des écoconditionnalités qui subordonnent le paiement des aides agricoles au respect des exigences environnementales européennes. Ces changements imposent de nouveaux objectifs de qualité.

2. LE PROJET WALLON ARVA

L'objectif d'ARVA "terres arables" en latin, (Association pour la Recherche et la Valorisation en Agriculture) est de proposer un système d'information sur les sols agricoles, par rapport à leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution temporelle de leurs qualités, en intégrant des aspects agricoles et environnementaux et en tenant compte de l'existant. En conséquence, l'approche suivie s'inscrit dans une optique de traçabilité et de durabilité du système sol qui s'inscrit dans la logique de la Charte P.E.R.F.E.C.T. : une Charte Qualité en Agriculture, mise au point par le Centre Maraîcher de Hesbaye, et qui garantit au consommateur la sécurité du produit et de l'environnement (CMH, 2001). Les contrôles préconisés portent notamment sur les apports au sol (contrôle qualité des intrants classiques et des produits de recyclage).

La surveillance des sols qui sera proposée devra valoriser l'information existante et permettre de répondre à échéance réaliste aux besoins régionaux, dans le contexte européen.

ARVA a également pour mission de favoriser la concertation et la coopération entre les acteurs régionaux dans le but de concevoir, d'orienter, de coordonner, et d'assurer que se réalisent dans les meilleures conditions la création et la gestion du système d'information. La démarche proposée est donc conçue pour être évolutive et permettre l'intégration de nouveaux partenaires. À l'heure actuelle, le groupe ARVA réunit des représentants de la Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx), de l'Université catholique de Louvain (UCL), du Centre de Recherche agronomique-Wallon (CRA-W), des laboratoires d'analyses (le Bureau d'études Environnement et Analyse de Gembloux et Requasud) et des acteurs du monde agricole (le Centre Maraîcher de Hesbaye, Céréales Plus et la Fédération Wallonne de l'Agriculture).

3. MÉTHODOLOGIE

L'action d'ARVA comporte quatre phases

- la recherche d'une démarche de surveillance en adéquation avec la volonté européenne et les exigences de qualité de l'agriculture,
- l'inventaire des connaissances déjà acquises sur la qualité des sols et l'analyse de leur utilité sur l'ensemble du territoire,
- l'évaluation de la précision avec laquelle il est possible de détecter une évolution dans les sols en Région wallonne, moyennant des sites chantiers mis en place pour valider la méthodologie des mesures,
- une analyse des stratégies de structuration d'un futur réseau de surveillance. Le choix d'une stratégie dépendant de la menace prise en compte, on veillera à ce que les options choisies ne compromettent pas de futures actions de surveillance.

3.1. Phase 1 : Choix d'une démarche de surveillance

La méthodologie d'acquisition des données doit permettre de suivre l'évolution du sol en la mettant en relation avec les pressions externes et les paramètres fonctionnels du sol. La détection des pressions externes concerne les contaminations via les intrants agricoles et les retombées atmosphériques. Cette surveillance correspond à la mesure d'une trentaine de paramètres chimiques parmi lesquels on retrouve les principaux ETM et MPO.

En Région wallonne, plusieurs études se sont attachées à ces problèmes de contamination des surfaces agricoles. L'une des dernières actions concernait l'évaluation des risques pour la santé humaine et l'environnement des apports d'ETM et de MPO (Halen *et al.*, 1998). Ce travail a permis de concevoir un modèle de calcul des normes de qualité pour les produits-déchets valorisables sur les terres agricoles. Les paramètres d'entrées requis par le modèle comprennent la détermination des retombées atmosphériques et des apports *via* les engrais. L'estimation de ces valeurs est basée sur les mesures du "réseau retombées" de l'ISSeP et la moyenne des teneurs dans les engrais proposées par différents auteurs : Feenstra (1978), Maas (1980), et l'IRC (1980). Outre le fait que ces valeurs sont relativement anciennes — en 20 ans, les teneurs en ETM, en micropolluants et les consommations d'engrais ont pu évoluer —, on constate la non prise en compte des apports d'ETM *via* les produits phytosanitaires. Pour pallier ce manque, le groupe de recherche ARVA a décidé de compléter et d'actualiser les données sur les sources de contamination des sols. Les concentrations

en ETM et MPO apportées par les intrants agricoles (amendements, engrais organiques et chimiques, phytosanitaires) et les retombées atmosphériques sont analysées sur différentes parcelles. En tenant compte de l'évolution des connaissances scientifiques, de nouveaux indicateurs caractérisant de nouvelles menaces (menaces biologiques : baisse de la biodiversité ou apport de composés abiotiques) pourraient par la suite être ajoutés.

Les critères de qualité du sol retenus par ARVA ont été sélectionnés sur base d'un inventaire des activités nationales (Montanarella *et al.*, 2004) et des recommandations européennes en matière de surveillance (Woiwode *et al.*, 2003 ; 2004). Les **tableaux 1 à 4** répertorient ces éléments de contrôle en les comparant aux critères proposés par les groupes de travail européens. Les premières colonnes (Loveland *et al.*, 2003 ; 2004) illustrent l'évolution et l'aboutissement de la réflexion scientifique européenne sur les indicateurs de qualité des sols. Précisons qu'il ne s'agit encore que d'un document de travail. La dernière colonne souligne l'anticipation et l'adéquation de la démarche ARVA avec la volonté européenne. Le **tableau 1** reprend les critères qui

Tableau 1. Paramètres intrinsèques des sols — *Soils intrinsic parameters.*

Paramètres	Paramètres préconisés par les TWG ¹		Paramètres retenus par ARVA 2003
	10/2003 ²	03/2004 ³	
Description de profil	+	+	+
Identification des matériaux parentaux	+	+	+
Classification du sol selon un référentiel	+	+	+
Description de l'environnement du site	+	+	+
Échantillonnage par horizon ou par profondeur	+	+	+
Densité apparente du sol	+	+	+
Granulométrie	+	+	+
pH (eau)	+	+	+
pH avec un électrolyte (ex : KCl)	+	+	+
Capacité d'échange cationique (CEC)	+	+	+
Engorgement et profondeur de la nappe	+	+	+
Teneur en eau et profondeur de la nappe	+	+	
Étude minéralogique des constituants du sol	+	+	
Conductivité hydraulique	+	+	

¹ TWG = Technical Working Group ; ² Loveland *et al.*, 2003 ; ³ Loveland *et al.*, 2004.

permettent de caractériser le sol étudié dans son contexte de fonctionnement (paramètres intrinsèques du sol). Les indicateurs des **tableaux 2 et 3** correspondent à l'évaluation des stocks du sol (total et biodisponible) ainsi qu'à l'évaluation des niveaux de contamination en substances potentiellement toxiques. Le **tableau 4** reprend une série d'indicateurs de fertilité sous l'aspect du statut organique des sols.

Tableau 2. Paramètres de caractérisation des stocks et des contaminations minérales — *Parameters for characterizing mineral stocks and mineral contaminations.*

Paramètres	Paramètres préconisés par les TWG ¹		Paramètres retenus par ARVA 2003
	10/2003 ²	03/2004 ³	
Concentration en éléments minéraux "totaux"			
Aluminium (Al)			+
Antimoine (Sb)			+
Arsenic (As)	+	+	+
Baryum (Ba)			+
Cadmium (Cd)	+	+	+
Chlorures (Cl)			+
Chrome (Cr)	+	+	+
Cobalt (Co)			+
Cuivre (Cu)	+	+	+
Étain (Sn)			+
Fer (Fe)			+
Fluor (F)			+
Mercuré (Hg)	+	+	+
Manganèse (Mn)			+
Nickel (Ni)	+	+	+
Phosphore (P)	+	+	+
Plomb (Pb)	+	+	+
Radionucléides	+		
Sélénium (Se)	+		
Sodium (Na)			+
Zinc (Zn)	+	+	+
Formes échangeables et éléments biodisponibles			
Acidité d'échange	+		
Aluminium (Al)	+		
Cadmium (Cd)			
Calcium (Ca)	+		+
Cuivre (Cu)	+		
Fluor (F)	+		
Magnésium (Mg)	+		+
Nickel (Ni)	+		
Phosphore (P)	+		+
Plomb (Pb)	+		
Potassium (K)	+		+

¹ TWG = Technical Working Group ; ² Loveland *et al.*, 2003 ; ³ Loveland *et al.*, 2004.

Tableau 3. Paramètres de caractérisation des contaminations organiques — *Parameters for characterizing organic contaminations.*

Paramètres	Paramètres préconisés par les TWG ¹		Paramètres retenus par ARVA 2003
	10/2003 ²	03/2004 ³	
Hydrocarbures aliphatiques			+
Hydrocarbures polyaromatiques (HAP)	+	+	+
Biphényles polychlorés (PCB)	+	+	+
Solvants halogénés	+	+	+
Hydrocarbures monoaromatiques (MAH dont BTEX)			+
Pesticides o-chlorés			+
Screening GC/MS			+
Alkylbenzène sulfonates linéaires (LAS)	+		
Di-(2-ethylhexyl)-phthalate (DEHP)	+		
Nonylphénol and nonylphénol-ethoxylates (NPE)	+		
Di-benzofuranes et di-benzodioxines (PCDF/PCDD)	+	+	

¹ TWG = Technical Working Group ; ² Loveland *et al.*, 2003 ;

³ Loveland *et al.*, 2004.

3.2 Phase 2 : Inventaire et évaluation des données portant sur la qualité des sols

Recensement des programmes régionaux. La Région wallonne dispose d'instruments de gestion des surfaces agricoles. Ces outils ont été élaborés dans le cadre de divers programmes : le Programme de Gestion durable de l'Azote en Agriculture (Vandenbergh, Marcoen, 2004), les Comités de Recherches sur la Matière organique du Sol (Geypens, Honnay, 1995 ; Culot, 2002), l'exploitation des banques de données des laboratoires provinciaux d'analyses de terre (Laroche, Oger, 1999) et le suivi administratif de la valorisation des matières organiques exogènes (Petit, Defoux, 2001). Ces travaux ont permis l'acquisition de nombreuses données sur les sols. Le **tableau 5** répertorie les différents programmes qui ont contribué à une mesure ou une observation des propriétés du sol. La plupart de ces travaux abordent la qualité par des approches statiques de comparaisons latérales. Les démarches intégrant un suivi temporel des propriétés des sols sont plus rares et se concentrent sur les éléments nutritifs et l'azote. La politique européenne concernant les nitrates est à l'origine de ce suivi plus intensif. À

Tableau 4. Paramètres de caractérisation du statut organique des sols — *Parameters for soil organic matter.*

Paramètres	Paramètres préconisés par les TWG ¹		Paramètres retenus par ARVA 2003
	10/2003 ²	03/2004 ³	
Carbone organique total (C)	+	+	+
Azote organique total (N)	+	+	+
Ratio C/N dérivé	+	+	+
N-NH ₄ ⁺			+
N-NO ₃ ⁻			+
N-NO ₂ ⁻			+
Caractérisation des pools du carbone	+	+	

¹ TWG = Technical Working Group ; ² Loveland *et al.*, 2003 ;

³ Loveland *et al.*, 2004.

l'inverse, la surveillance temporelle des éléments traces métalliques ou des micropolluants organiques s'effectue dans un cadre spatialement plus réduit : contrôle des parcelles ayant reçu des matières organiques exogènes (boues de station d'épuration et compost), des parcelles soumises à un cahier des charges spécifique (contrôle de certaines productions alimentaires : maraîchage) ou à une pollution localisée.

Les propriétés du sol varient dans l'espace. De ce fait, tout décalage de prélèvement entraîne une fluctuation et une augmentation de l'incertitude de la mesure. Par conséquent, le problème majeur des données existantes en Région wallonne est celui de la précision du géoréférencement des prélèvements. Les analyses de terre réalisées classiquement dans les laboratoires détectent les évolutions temporelles par comparaison des jeux de données couvrant des périodes différentes (Laroche, Oger, 1999). Néanmoins, l'échantillonnage par unité administrative (**Tableau 5**) est susceptible d'empêcher la détection fiable d'évolutions temporelles qui sont généralement de faibles amplitudes en regard des variations spatiales (Walter, 2002). Par ailleurs, les bases de données existantes ne contiennent qu'un nombre limité de paramètres (principalement des paramètres liés à la fonction de production des sols). De façon générale, ces synthèses d'analyses ne sont pas suffisantes pour assurer un suivi complet des différentes fonctions du sol.

3.3. Phase 3 : Validation d'une méthodologie d'acquisition des données par des sites chantiers

En Europe, les techniques d'implantation des sites de surveillance sont nombreuses. La taille des surfaces d'échantillonnage fluctue de quelques centaines de mètres carrés à quelques hectares. Les stratégies d'échantillonnage sont de types aléatoire, systématique ou

Tableau 5. Inventaire des données existantes sur les sols wallons — *Existing data on Walloon soils.*

Nom de l'étude Auteurs	Paramètres utilisés	Nombre et type d'observations	Types de données	Référencement des échantillons	Suivi temporel
Programme de Gestion durable de l'Azote en Agriculture. Vandenberghe, Marcoen, 2004 (NITRAWAL)	NO ₃ , pH, CEC, P, K, Mg, Ca, Na, C total, Norg, C/N	140 parcelles cultivées et 40 prairies	Échantillons moyens dans les horizons de surface et de profondeur	Localisation des parcelles (coord. Lambert)	Annuel
Base de Données Pollusol. Groupe d'Étude APPP, "Application de la pédologie aux problèmes de pollution" 2003 (SPAQuE, UCL, FUSAGx-BEAGx)	ETM & MPO normés	Principales séries de sols, 166 sites non pollués + 7 sites pollués, 112 sondages en zone agricole	Échantillons ponctuels dans les horizons diagnostiques, prélevés à partir d'un carottage	Géoréférencement des points de sondages (coord. Lambert)	Non
Inventaire de la Qualité des Sols. Petit, Defoux, 2001 (Office Wallon des Déchets DPS)	ETM, pH	2.100 parcelles Définition d'un sol moyen par région agricole	Échantillons moyens dans l'horizon de surface	Localisation des parcelles	Au minimum tous les 10 ans
Observatoire de la Qualité des Sols Agricoles de la Province de Luxembourg. Léonard, Sacré, Toussaint, Peeters, 2001	Paramètres de fertilité du sol (pH, C, P, K et éléments échangeables)	80 parcelles 2 × 40 exploitations	Échantillons moyens dans l'horizon de surface	Localisation des parcelles	Non
Base de Données Sols : Première Synthèse. Laroche, Oger, 1999 (REQUASUD)	Paramètres de fertilité du sol (pH, C, P, K et éléments échangeables)	Problème du référencement mais nombreuses analyses 31.500 en terres de culture 15.000 en prairies	Échantillons moyens dans l'horizon de surface	Localisation sur base du code postal	Nouvelle synthèse prévue en 2004
Suivi pédologique de l'inventaire permanent des ressources ligneuses Laroche, Weissen, Bock, 2003 ; Rondeux, Lecomte, Florin, Thirion, 1996	pH, N org, C total, P, et éléments échangeables, ETM	88 échantillons provenant des placettes de l'inventaire forestier (1 placette = 18 mètres de rayon)	Échantillons moyens au sein d'une placette (profondeur : jusqu'à 20cm)	Localisation : coord. Lambert du centre de la placette	Tous les 10 ans
Base de Données de la Carte des Sols Van Orshoven, Vandebroucke, 1993 (Base de données AARDEWERK)	Paramètres descriptifs et paramètres de fertilité	13.000 profils mais problème de comparabilité analytique	Échantillons ponctuels dans les horizons diagnostiques prélevés à partir d'un profil	Localisation des profils sur fond cadastral : (1/5.000 ^e)	Non

hiérarchisé. Les prélèvements sont ponctuels ou composites et s'effectuent à profondeur constante ou selon la typologie des horizons (Arrouays, 1998). Différents travaux analysent l'influence de la structure spatiale (horizontale et verticale) sur la précision du suivi. Parmi ces travaux, citons ceux de Papritz et Webster (1995) qui traitent des stratégies d'échantillonnage ainsi que les nombreux travaux présentant la logique de mise en place des réseaux suisse, français et européens (Meyer, 1991 ; Leprêtre, Martin, 1994 ; Arrouays *et al.*, 1997 ; King, Montanarella 1999 ; Arrouays *et al.*, 2000 ; Jolivet, 2000 ; Arrouays *et al.* 2001 ; Boulonne, 2002 ; Germaneau, 2002 ; King *et al.*, 2002 ; Colinet, 2003 ; Woiwode *et al.*, 2004).

L'optimisation d'un site de surveillance consiste à limiter l'incertitude des mesures. Par conséquent, la méthode d'échantillonnage des sols doit permettre de s'affranchir de la variabilité intraparcellaire. Les principaux facteurs à l'origine de cette fluctuation des propriétés du sol doivent être appréhendés. Il est nécessaire de prendre en compte les facteurs de différenciation pédogénétique, la topographie (Colinet, 2003), ainsi que l'historique des apports sur

le site (Arrouays *et al.*, 2000). Par ailleurs, le projet de norme ISO/DIS 16133 (ISO, 2002), formule des recommandations qui permettent de fiabiliser et de pérenniser la surveillance.

Choix méthodologique. Suivre l'évolution des sols nécessite de déceler des petits changements à travers des fluctuations spatiales potentiellement plus grandes. Pour optimiser la surveillance des sols, il est nécessaire de réduire l'écart standard de la mesure en adaptant la stratégie d'échantillonnage. La technique d'échantillonnage proposée consiste à géoréférencer une surface d'échantillonnage pour permettre un retour précis à chaque pas de temps de la mesure. La taille et le positionnement de la surface sont choisis de manière à garantir la plus grande homogénéité des teneurs et des volumes de sol étudiés. Une fosse pédologique est creusée à proximité de la surface d'échantillonnage pour permettre une description verticale des volumes de sol.

Une enquête préalable auprès de l'agriculteur et des sondages à la tarière permettent d'estimer le degré d'homogénéité du sol étudié par vérification de la typologie et de la profondeur des horizons, du dévelop-

pement de profil, de l'historique et du niveau d' "anthropisation" de la parcelle. Pour chaque site chantier, on délimite par des points fixes une surface d'échantillonnage de 20 × 20 m. Cette surface est implantée sur une zone de même topographie. Des échantillons composites de surface (0–30 cm) et de profondeur (30–60 cm) sont prélevés annuellement selon un quadrillage régulier. Chaque échantillon comprend 25 carottes prélevées à une même profondeur. Chaque horizon est prélevé à quatre reprises. Les quatre composites issus d'un même horizon sont comparés pour évaluer la justesse et la fidélité du prélèvement.

En juillet 2003, deux sites chantiers ont été mis en place pour valider la méthodologie choisie. Ces sites permettront de fixer les limites temporelles de cette stratégie d'échantillonnage des sols. La comparaison des mesures "sol" et des vitesses de contamination permettra de déterminer dans quelle mesure il est possible de détecter de façon précoce, l'apparition et les tendances évolutives des propriétés du sol. L'évaluation des vitesses de contamination consiste à mesurer les entrées et sorties d'éléments du système sol. La mesure des sorties s'effectue grâce à l'analyse des lixiviats du sol (récupération des eaux de drainage de cases lysimétriques) et l'analyse des récoltes. Les sites de validation ont été implantés en Hesbaye, une zone d'agriculture intensive. Au sein de la région limoneuse, la Hesbaye constitue un secteur de référence : on y retrouve les principaux sols caractéristiques de cette vaste région agricole.

Protocoles analytiques et standardisation. La plupart des méthodes analytiques que nous avons choisies s'inscrivent dans la démarche européenne de standardisation. Certaines méthodes préconisées par l'Europe semblent peu satisfaisantes de notre point de vue et pourraient être adaptées. En matière d'analyse totale des ETM, l'Europe préconise la mise en solution par une attaque à l'eau régale. Baize (2002) souligne les nombreux inconvénients de ce protocole. D'autres techniques comme la XRF (spectrométrie de fluorescence X) semblent offrir des avantages en termes de gain de temps, de coût et de performance pour certains types d'éléments (Brohée *et al.*, 2002).

Les analyses réalisées sur les sols, les eaux et les intrants agricoles sont effectuées par le Bureau d'études Environnement et Analyses de Gembloux (BEAGx), laboratoire agréé par le Ministère Fédéral de l'Agriculture, le Ministère de la Région wallonne, labellisé BPL pour les tests physico-chimiques des formulations et la détermination des résidus de produits phytopharmaceutiques, et le Centre d'Analyse par Fluorescence X (CAFX) commun à l'UCL, à la FUSAGx et au CRA-W. Ces laboratoires participent à des tests inter-laboratoires organisés par les institutions officielles.

3.4. Phase 4 : Structuration d'un réseau de surveillance

La mise en place d'un réseau de surveillance des sols impose de choisir des sites de référence correspondant à des portions limitées de territoire. Les stratégies d'implantation et de structuration des réseaux sont nombreuses en Europe. Il est possible de les classer en fonction des critères de sélection des sites qui dépendent des objectifs et des moyens nécessaires.

Sélection des sites sur base d'une grille systématique. Les sites sont sélectionnés sur la base d'une grille régulière. Pour qu'ils soient représentatifs, la distance entre les points doit être inversement proportionnelle à l'amplitude de variation des propriétés observées (ISO, 2002). Cette approche *a priori* non biaisée exige généralement un nombre élevé de sites. Par son caractère systématique, si la maille choisie est trop grande, cette méthode ne peut pas représenter certaines situations couvrant de faibles surfaces qui peuvent avoir un poids important en terme de bilan ou de conséquences environnementales. La conséquence principale est que ce type de réseau relativement dense peut avoir un coût élevé (Arrouays *et al.*, 2002).

Cette méthode est celle retenue par un grand nombre de réseaux à l'échelle européenne et nationale, notamment en Autriche (Federal Environment Agency – Austria, 2002)¹, au Royaume-Uni (Cranfield University, 2004)², au Danemark (Andreasen Finn M., 1998)³, en France (Boulonne *et al.*, 2002)⁴ et en Belgique (Rondeux *et al.*, 1996)⁵. À l'échelle européenne, les réseaux ICP-Forest (Haußmann, Lorenz, 2001)⁶ et LUCAS (CE, 2003)⁷ sont construits respectivement sur des mailles carrées de 16 km et 18 km de côté. Afin d'harmoniser la surveillance européenne, le Bureau européen des Sols a émis l'idée d'étendre la maille de l'un de ces réseaux à toute l'Europe. L'alignement sur de tels réseaux permettrait d'harmoniser et de valoriser la masse d'informations récoltées par cet organisme. Néanmoins, il serait alors nécessaire d'implanter d'autres sites spécialisés pour les menaces présentant un caractère local dont les contaminations locales, l'érosion et les risques hydrogéologiques. Ces sites constitueraient alors un deuxième niveau de monitoring (Woiwode *et al.*, 2004).

¹ BORIS : Système d'information sur les sols autrichiens.

² NSI: National Soil Inventory – England and Wales.

³ Square grid for nitrate investigations in Denmark.

⁴ RMQS: Réseau de Mesures de la Qualité des Sols en France.

⁵ Inventaire Forestier Permanent de la Région wallonne.

⁶ ICP-Forest : International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests.

⁷ LUCAS : Land Use – Cover Area from Statistical Survey.

En Région wallonne, le réseau de l'Inventaire forestier permanent est également conçu sur une grille de points à maille rectangulaire. Le grand côté de la maille est orienté dans le sens Ouest-Est et mesure 1.000 m tandis que le petit côté, orienté selon l'axe Nord-Sud, est long de 500 m. Chaque intersection de la grille située en zones forestières constitue un point de l'inventaire. Sur un même site, le pas de temps entre deux investigations est de 10 ans (Rondeux, Lecomte, 1996). Tous ces sites forestiers n'ont pas été caractérisés du point de vue des sols (Laroche *et al.*, 2003). D'ici la fin 2004, 191 sites seront investigués par une approche pédologique.

Sélection des sites sur des critères de représentativité. Ces méthodes visent à réduire le nombre de sites nécessaires. Elles sont retenues par de nombreux réseaux de faibles densités : ICP-IM (Bråkenhielm *et al.*, 1998)⁸, réseau RENECOFOR (ONF, 2004)⁹, réseau OQS (Martin *et al.*, 1999)¹⁰. Les critères de représentativité sont nombreux et peuvent être regroupés à travers quatre types d'approche : statistique, géostatistique, typologique et hypothétique.

L'approche statistique sélectionne les sites grâce à des modèles d'origine statistique. Classiquement, les modèles utilisent des données "sols" provenant des laboratoires agricoles d'analyses de terres. Ces modèles permettent une représentation cartographique des propriétés du sol par unités administratives. La pertinence de cette approche est donc fonction de l'hétérogénéité pédologique au sein de l'unité administrative choisie et de la répartition des analyses sur l'ensemble du territoire. Un dernier biais résulte aussi du fait que ce sont généralement les agriculteurs qui fertilisent raisonnablement qui ont recours à l'analyse de terre (Legros, 1996).

L'approche géostatistique repose sur une application de la théorie des fonctions aléatoires à des données spatiales et temporelles. Elle permet de prédire la valeur d'un phénomène ou d'une propriété du sol en un point non échantillonné d'une région donnée. Les méthodes géostatistiques comportent généralement deux phases : l'*analyse variographique* qui est une description moyenne d'un phénomène en fonction d'une échelle spatiale ou temporelle et le *krigeage* qui désigne plusieurs méthodes de régression utilisées pour estimer les valeurs de ce phénomène en tout point de l'espace. La géostatistique permet donc de prédire l'amplitude de variation des propriétés observées. Son principal problème résulte du fait que si les différentes propriétés étudiées présentent un degré de dépendance

spatiale inégal, le nombre de sites requis peut être aussi élevé qu'avec un quadrillage régulier. C'est souvent le cas avec les sols.

L'approche typologique repose sur une stratification des sols en fonction de l'exploitation du sol et/ou du type de sol, de ses horizons, des matériaux initiaux, de l'étendue du sol, de la distance de ce dernier par rapport à des sources de contamination potentielle, etc. Elle nécessite de disposer d'un inventaire des sols et/ou des occupations qui couvre l'entièreté du territoire à surveiller. Disposant d'une cartographie précise des sols, cette approche a été expérimentée en Région wallonne pour déterminer les valeurs brutes de fond des concentrations en ETM et MPO des sols (Bock *et al.*, 2003). La plupart des sites sélectionnés étaient éloignés des principales sources de contamination et étaient répartis sur 21 catégories principales de sol définies sur base de critères géologiques (critères relatifs au matériau parental) et pédologiques (critères relatifs à la classe texturale, au développement de profil et à la classe de drainage). Ces 21 catégories constituent les grandes familles pédo-géologiques du territoire wallon.

L'approche hypothétique évalue les options de surveillance sur la base de leur aptitude à détecter et quantifier les impacts résultant, par hypothèse, d'activités humaines spécifiques (ISO, 2002). La sensibilité, l'étendue dans l'espace et la fréquence de la surveillance doivent permettre de détecter de façon appropriée les impacts présumés de ces activités. L'approche hypothétique débute par la définition d'une menace pour un type d'activité. Cette approche permet de répondre à des problèmes techniques spécifiques et donne une vision partielle des surfaces agricoles tant les modes de gestion et les itinéraires techniques sont nombreux en agriculture. Cette technique est généralement orientée vers une modélisation des processus des sols. Elle est également appliquée par des réseaux de très faible densité qui désirent obtenir un contrôle total des événements affectant le site. Les sites sont équipés en moyens lourds et permettent des expérimentations *in situ* parfois "destructives" de la parcelle ou de sa récolte (creusement de fosses pour des observations de physique du sol, prélèvement de végétaux, etc.). Pour assurer la pérennité du site, ils sont alors installés dans des domaines publics, d'accès plus ou moins protégé : domaines d'instituts de recherche, terrains militaires (Arrouays *et al.*, 2000). Une telle approche convient pour la compréhension des processus mais ne peut prétendre représenter la totalité du territoire.

3.5. Premiers essais de structuration d'un réseau en Région wallonne

Pour évaluer le niveau de représentativité d'un réseau de type grille, deux essais de structuration ont été

⁸ ICP – IM : International Cooperative Programme on Integrated Monitoring.

⁹ RENECOFOR : Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers en France.

¹⁰ OQS: Observatoire de la Qualité des Sols en France.

réalisés. La représentativité régionale a été évaluée sur base des principales unités de sol et du mode d'exploitation des terres. Trois couches d'informations ont ainsi été croisées : la Carte des Sols à 1/500.000^e (Maréchal, Tavernier, 1974a), la carte des occupations du sol (Walphot, 1989) et des couvertures de points répartis sur une maille régulière. Notre étude visant spécifiquement les surfaces agricoles, un masque est généré pour gommer les zones urbanisées et forestières (**Figure 1**). Seules les affectations "prairie" et "culture" ont été prises en compte. La carte des associations de sols comportant 62 unités cartographiques, il est théoriquement possible de trouver 124 combinaisons "sol-occupation". Sur le territoire régional, 94 occurrences existent réellement. Par la suite, deux évaluations ont été réalisées sur des mailles carrées de 16 km et de 10 km de côté.

La distance de 16 km correspond à la proposition européenne d'évaluation des "menaces diffuses" : contamination, baisse des teneurs en matières organiques et de la biodiversité (Montanarella *et al.*, 2004). De manière à conserver la cohérence européenne, le calage de cette grille a été réalisé sur les points du réseau français (RMQS) qui respecte cette géométrie de réseau. La maille de 16 km génère 66 points en Région wallonne. Parmi ces points, 39 sont en zone agricole (23 prairies et 16 terres de culture), 23 sont en zone forestière et 4 sont situés dans des zones "urbanisées". Les 39 points agricoles interceptent 28 occurrences sols x occupations agricoles sur les 94 existantes. Ces 28 occurrences représentent 65 % de la superficie agricole (**Figure 2**). La maille de 16 km assure seulement 65 % de couverture de la superficie du territoire agricole régional.

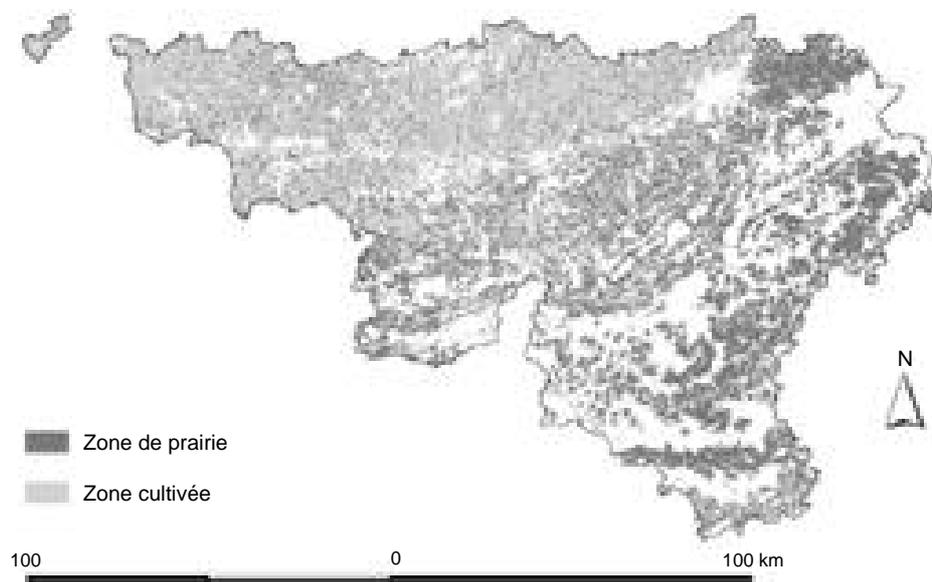


Figure 1. Les surfaces agricoles en Région wallonne —*Arable land in Walloon Region.*

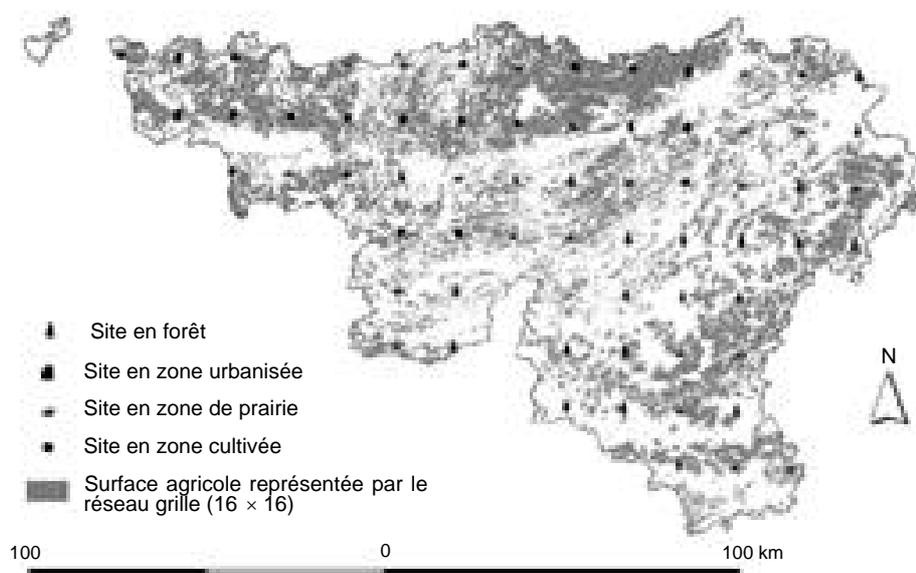


Figure 2. Représentativité agricole du réseau basé sur la maille carrée de 16 km de côté —*Simulation of representativity of arable land for a 16 km grid.*

La maille de 10 km permet de caler les sites du réseau agricole sur la grille de l'Inventaire permanent forestier réalisé en Région wallonne. Ce multiple de la maille forestière génère 174 points. Parmi ceux-ci, 112 sont en zone agricole (71 prairies et 41 terres de culture), 50 sont en zone forestière et 12 sont situés dans des zones "urbanisées". Les 112 points agricoles interceptent 43 occurrences sols x occupations agricoles sur les 94 existantes. Ces 43 occurrences représentent 83 % de la superficie agricole (**Figure 3**). La maille de 10 km offre donc différents avantages : elle assure une cohérence avec le réseau forestier wallon et augmente sensiblement la représentativité agricole en termes de surface. Néanmoins son coût est largement supérieur puisque le nombre de sites passe de 39 à 112.

Jusqu'à présent l'estimation de la représentativité a été limitée par les outils cartographiques employés. Les calculs du niveau de représentativité reposent pour le moment sur une carte des associations de sols à 1/500 000^e (Maréchal, Tavernier, 1974a). Une association de sols est un objet cartographique composé par un regroupement de plusieurs types de sols non identifiés sur la carte de manière individuelle, mais qui sont organisés d'une manière qui se répète régulièrement dans l'espace. La carte à 1/500.000^e constitue ainsi le regroupement des séries de sols de la carte à 1/20.000^e. Cette fusion est justifiée par la proximité spatiale des séries ; pourtant elle ne permet pas de présumer du fonctionnement des sols au sein de l'association. En effet, une même association peut regrouper des séries ayant des aptitudes ou des sensibilités très différentes. À partir de 28 planchettes numérisées de la carte à 1/20.000^e, Legrain (2003) calcule la proportion des différentes séries présentes

au sein des différentes associations. La zone étudiée couvre une superficie de 1.184 km² et constitue un secteur de référence de la région limoneuse. L'association présentée au **tableau 6**, définie comme le regroupement des sols limono-caillouteux à horizon Bt ou à horizon Bw, à charge de craie ou de silexite, contient des séries ayant des caractéristiques différentes en termes de potentialité et de sensibilité. Elle regroupe des sols caillouteux plus ou moins épais (9 % de la superficie), des sols à substrat (11,7 %) et des sols limoneux non caillouteux (60,7 %). Par conséquent, ce regroupement dissimule les variations de fonctionnement de la couverture pédologique. Dès lors, la numérisation de la carte à 1/20.000^e ouvre des perspectives en matière de représentativité et de précision. Le document numérisé fournira des statistiques relatives à l'importance des différentes séries au sein du territoire et permettra d'améliorer l'évaluation des différentes structures de réseaux.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthodologie de surveillance des sols choisie s'intègre dans la logique européenne et vise une analyse "causes – effets" sur les sols. Différents indicateurs caractérisant les principales pressions et facteurs d'évolution des sols ont été sélectionnés (**Tableaux 1 à 4**). Ces indicateurs devront démontrer leur capacité à rendre compte de l'évolution des propriétés et du fonctionnement des sols. Notre méthode de suivi de l'évolution des sols rend compte des changements dans le temps. Le protocole permet de réduire l'écart standard de la mesure en s'affranchissant au maximum de la variabilité spatiale

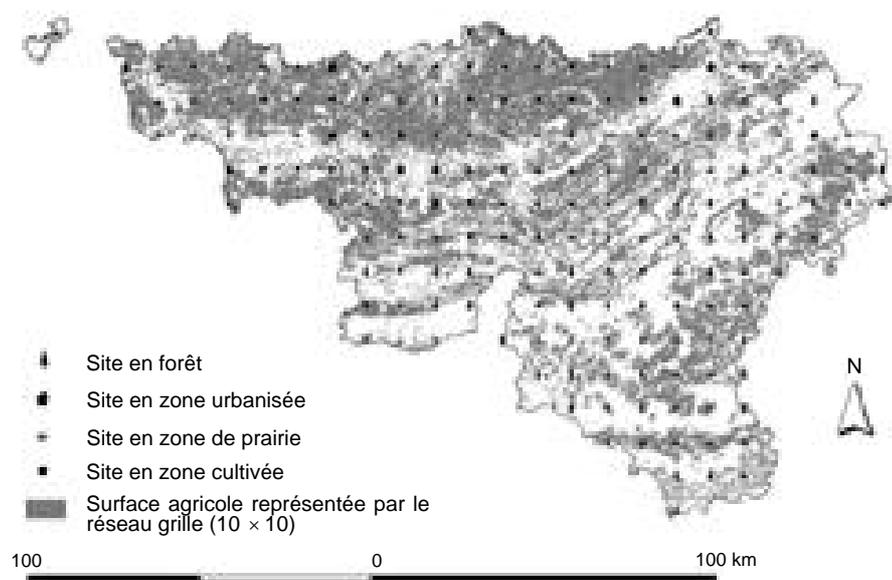


Figure 3. Représentativité agricole du réseau basé sur la maille carrée de 10 km de côté — *Simulation of representativity of arable land for a 10 km grid.*

Tableau 6. Fréquence des séries de sols au sein d'une association de sols de la carte de Maréchal et Tavernier (1974a ; b) située dans un secteur de référence de la région limoneuse (Legrain, 2003) — *Soil series frequency among an association of soil delimited by Maréchal and Tavernier (1974) situated in a reference sector in loamy region (Legrain, 2003).*

Association 41 : Sols limono-caillouteux à horizon Bt ou horizon Bw à charge de craie ou de silexite							
Sigle¹	Nbre de plages	Superficie (ha)	Superficie (%)	Sigle¹	Nbre de plages	Superficie (ha)	Superficie (%)
Aba0	10	23,65	1,2	Afp	8	16,83	0,9
Aba1	115	541,16	28,1	Agp	3	1,48	0,1 3,0 %
Aba(b)0	14	19,49	1,0	Ébxy	11	17,11	0,9
Aba(b)1	21	60,08	3,1 33,4 %	EDx	8	3,59	0,2 1,1 %
Aca1	14	14,43	0,7	GAX	36	132,08	6,8
Ada0	2	8,68	0,4	Gbax	3	15,69	0,8
Ada1	7	27,19	1,4 2,6 %	Ghax	5	1,84	0,1
AbB	66	59,98	3,1 3,1 %	Gbbx6	2	3,40	0,2
Abp(c)	93	81,51	4,2	Gbbx2	3	2,96	0,2 8,1 %
Acp(c)	4	2,75	0,1	Gbbxn2	4	3,40	0,2
ADp(c)	9	11,41	0,6	Gbbxn6	1	4,92	0,3
Adp(c)	13	8,76	0,5 5,4 %	N : matériaux craieux	6	8,16	0,4 0,9 %
Abp	76	120,56	6,2	Sols à substrat	166	226,08	11,7 11,7 %
Abp0	20	14,01	0,7 7,0 %	OB :			
Acp0	12	8,13	0,4	Zone bâtie	56	245,39	12,7 12,7 %
ADp	45	90,49	4,7	Sous-total	888	1836,53	95,2 %
Adp0	21	16,28	0,8	Autre ("impureté")	101	92,50	4,8 %
Adp1	7	3,60	0,2	Total	989	1929,02	100 %
ADpb(1)	1	1,56	0,1 6,2 %				
Ahp	2	1,49	0,1				
Ahp0	5	2,43	0,1				
Alp	6	8,51	0,4				
Aep	13	27,40	1,4				

¹ La légende de la Carte des Sols de la Belgique repose sur des critères morphologiques objectifs. L'unité cartographique de base est la série, unité homogène quant à ses caractéristiques, parfois subdivisée en séries dérivées et/ou en phases. Le symbolisme est explicité dans l'exemple ci-après (Bock *et al.*, 2001).

Une minuscule en préfixe pour préciser un substrat de nature lithologique différente de la couche supérieure identifié en profondeur (exemple : s – substrat sableux) ;

Une majuscule pour désigner la texture de la roche-mère pédologique dominante dans le profil (exemples : G – sol limono-caillouteux, c'est-à-dire sol composé de sédiments meubles sablo-limoneux, limoneux ou argileux à teneur en éléments grossiers supérieure à 5 % ; A – sol composé de matériaux limoneux ; E – sol de matériaux argileux) ;

Une première minuscule pour caractériser le drainage nature (exemple : b – drainage favorable) ;

Une deuxième minuscule correspondant au développement de profil, c'est-à-dire à la reconnaissance d'horizons particuliers engendrés par la pédogenèse (exemple : a – sol à horizon B textural) ;

Une minuscule en suffixe pour indiquer la nature de la charge en éléments grossiers, c'est-à-dire les éléments de dimensions supérieures à 2 mm tels que les gravies, les cailloux, les pierres et les blocs quand elle dépasse 15 % en volume (exemple : x – charge de silexite) ;

Un chiffre en suffixe pour indiquer une phase d'épaisseur ou de profondeur (exemple : 2 – substrat apparaissant entre 40 et 80 cm).

des teneurs dans les sols. Depuis juillet 2003, deux sites chantiers ont été implantés en Hesbaye pour valider les choix méthodologiques. Chaque indicateur devra démontrer sa pertinence, sa sensibilité et sa robustesse. Les indicateurs retenus devront également être réalisables en routine, au moindre coût et être raisonnablement reproductibles.

La mise en place d'une surveillance des sols sous-entend la structuration d'un réseau de sites. Différentes simulations de type réseaux "grille" ont

été analysées. Les travaux européens préconisent une maille de 16 km. Le niveau de représentativité agricole d'une telle grille est jugé peu satisfaisant pour la Région wallonne. Une deuxième simulation permettant un alignement sur le réseau de l'Inventaire permanent des Ressources forestières a également été testée. Ces deux essais permettent des interprétations, limitées par les outils cartographiques employés. La numérisation de la carte des sols à 1/20.000^e s'achève en Wallonie. Cette carte informatisée permettra de

préciser ces simulations et une meilleure prise en compte du fonctionnement des sols. Les travaux réalisés jusqu'à présent concernent la teneur en carbone organique du sol et les problèmes de contamination. La comparaison des évolutions et des modes de gestion du sol devraient améliorer les pratiques agricoles.

D'autres menaces pourraient être intégrées dans notre démarche. Les menaces à caractère local, parmi lesquelles l'érosion et la compaction, ne sont pas prises en compte actuellement. Ces menaces pourraient faire l'objet d'un deuxième niveau de surveillance, ce qui suppose l'élargissement de notre réflexion sur la structuration du réseau.

Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'une convention de recherche soutenue par le Ministère de la Région wallonne (Direction générale de l'Agriculture).

Bibliographie

- Andreasen Finn M. (1998). *The Danish integrated farm management system – A concept with combined whole farm management and updated decision support for nitrogen fertilization*. 7th International conference on Computers in agriculture. 26-30 October. Orlando, Florida.
- Arrouays D., Vion I., Jolivet C., Guyon D., Couturier A., Wilbert J. (1997). Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France) – Conséquence sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Étud. Gestion Sols* **4** (1), p. 5–16.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong B., Loveland P., Coulter B. (1998). Soil monitorings in Europe: a review. *Communication 16e Congrès Mondial de Science du Sol, Symposium n°25*.
- Arrouays D., Martin S., Lepretre A., Bourennane H. (2000). Short-range spatial variability of metal contents in soil on a one hectare agricultural plot. *Soil Sci. Plant Anal.* **31** (3-4), p. 387–400.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D. (2001). Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Étud. Gestion Sols* **8** (1), p. 7–17.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N., Grolleau E. (2002). Présentation du Réseau national de Mesure de la Qualité des Sols : le RMQS. *Communication aux Journées Nationales d'Études des Sols 2002 à Orléans*.
- Baize D. (2002). Examen critique des valeurs limites "sols" de la réglementation française. In Baize D., Tercé M. (Éds). *Éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales*. Paris : INRA, p. 137–154.
- Bock L., Laroche J., Gervasoni L., Lacroix D. (2001). Contexte pédologique. In *Bassin hydrographique de la Molinee. Rapport du Comité scientifique de la conservation de la nature et de la protection des eaux*. Namur, Belgique : Ministère de la Région wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, p. 63–75.
- Bock L., Bogaert P., Colinet G., Delcarte E., Delvaux B., Ducarme F., Laroche J., Maesen Ph., Marcoen JM., Sonnet Ph., Wibrin MA. (2003). *Convention d'étude Pollusol : établissement et cartographie des teneurs bruits de fond en éléments traces métalliques et micro-polluants organiques dans les sols de la Région wallonne. Rapport final du groupe d'étude APPP, "Application de la pédologie aux problèmes de pollution" (SPAQuE – UCL – FUSAGx – BEAGx – CAFX)*, 125 p.
- Boulonne L. (2002). *Soil monitoring in France – State of the art. Communications 16e Congrès Mondial de Science du Sol, Symposium n°25*.
- Bråkenhielm S., Innes J., Starr M. (1998). *Manual for integrated monitoring. UN ECE LRTAP Convention*. 20–22 April 1998. Tallinn.
- Brohée JC., Marcoen JM., Naud J., Agneessens R., Delcarte E. (2002). *Validations de méthodes performantes d'analyses globales des éléments chimiques, dont la spectrométrie de fluorescence X (XRF), appliquées aux terres cultivées et aux intrants valorisables en agriculture*. Convention Ministère de la Région wallonne – Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux – rapport final, 111 p.
- BUWAL (1993). NABO – Réseau d'observation des sols : période d'observation 1985–1991. *Cah. Environ. Off. Féd. Environ. For. Paysage (Suisse)* **200**, p. 135.
- CE (2003). L'enquête Lucas. Les statisticiens européens assurent le suivi du territoire. *Working papers et Études de l'Office des Publications Officielles des Communautés Européennes*.
- COM (2002). *Vers une stratégie thématique pour la protection des sols*. Communication finale de la Commission européenne au Parlement, au Comité économique et social et au Comité des Régions **179**, 39 p.
- CE – DG Env (2003). *Soil Thematic Strategy – Framework mandate. Advisory Forum on the Soil Thematic Strategy – Commission européenne – Direction générale Environnement. Brussels, 28 May 2003*.
- Chaussod R. (1996). La qualité biologique des sols : évaluation et implications. Numéro spécial *Étud. Gestion Sols* **3** (4), p. 261–278.
- Chevry C., Gascuel-Oudoux C. (2002). Les Français et leurs sols : essai de prospective à l'horizon 2030. *Courr. Environ.* INRA **47**, p. 5–14.

- Colinet G. (2003). *Eléments traces métalliques dans les sols – Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge*. Thèse de doctorat. Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 408 p.
- CMH (2001). Charte P.E.R.F.E.C.T ou audit commun industrie-production. Centre Maraîcher de Hesbaye. Version actualisée du 09 avril 2001. p. 74. [online] [01/04/04] <<http://www.charteperfect.be>>
- Cranfield University. (2004). National Soil Inventory (NSI) Data. Brochure. [online] [04/04/04]. Available <<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/nsri/services/nsi.htm>>
- Culot M. (2002). *Étude stratégique sur les potentialités de valorisation des composts et digestats produits ou susceptibles d'être produits en Région wallonne, Convention DGRNE - Ministère de la Région wallonne-Rapports FUSAGx – IRCO*.
- Doran JW., Parkin TB. (1994). Defining soil quality for a sustainable environment. In Doran et al. (Eds). *Soil Sci. Soc. Am. Special Publication* **35**, p. 3–21.
- EEP (2002). Soil Policy. *Newsletter of the European Environmental Press*, 5 June 2002, **26**.
- Federal Environment Agency – Austria (2002). Boris: soil information system of Austria. *6th report on the state of the environment in Austria*, p. 58–65.
- Feenstra JP. (1978). Control of water pollution due to cadmium discharged in the process of producing and using phosphate fertilizers. *Rapport CEE - June 1978*.
- Germaneau C. (2002). *Exploitation des données de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Conséquences pour le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*. Rapport de stage de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg.
- Geypens M., Honnay JP. (1995). *Matières organiques dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*. Convention IRSIA - Rapport du Comité de Recherche sur la Matière Organique du Sol, 167 p.
- Halen H., Kreit JF., Vanderheyden V. (1998). *Normes de qualité pour les produits/déchets valorisables sur les terres agricoles dans le cadre d'un plan d'environnement durable – Développement de la méthode de calcul*. Convention Ministères de la Région wallonne - Rapports finaux Siterem.
- Haußmann T., Lorenz L. (2001). *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests [online]. Part 1: mandate of ICP Forests and Programme Implementation* [05/04/04], p.9-15. Available <<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>>
- IRC (1980). *Mobility of cadmium in the surface layers of the soils*. EEC Report contract nrW/80/576, 84 p.
- ISO (2002). *Qualité des sols – Lignes directrices pour l'établissement des sites pour la surveillance du sol. Projet de norme internationale ISO/DIS 16133*.
- Jolivet C. (2000). *Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne – Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles*. Thèse de doctorat INRA. Dijon, France : Université de Bourgogne.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot JC., Hardy R., Le Bas C., Stengel P. (1999). Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. *Étud. Gestion Sols* **6** (4), p. 215–228.
- King D., Montanarella L. (2002). Inventaire et surveillance des sols en Europe. *Étud. Gestion Sols* **9** (2), p. 137–148.
- Laroche J., Oger R. (1999). *Base de données sols – Première synthèse*, Rapport de l'asbl REQUASUD. Gembloux, Belgique : REQUASUD, 36 p.
- Laroche J., Weissen F., Bock L. (2003). *Suivi pédologique dans le cadre de l'inventaire permanent des ressources ligneuses*. Rapport final de la Convention n° 97-46298 passée entre la Région Wallonne et la FUSAG. Gembloux, Belgique, 38 p.
- Legrain X. (2003). *Restructuration géomorphopédologique de la légende de la carte des sols de la Belgique application en région limoneuse*. Travail de fin d'études du Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx, 76 p.
- Legros JP. (1996). *Cartographie des sols - De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Lausanne : Presses polytechniques et Universitaires romandes, 321 p.
- Léonard C., Sacré JP., Toussaint B., Peeters A. (2001). *Étude de la qualité des sols agricoles de la Province de Luxembourg en vue de la mise en place d'un Observatoire de la Qualité*. Convention Ministère de la Région wallonne – DGA, rapport final, 79 p.
- Leprêtre A., Martin S. (1994). Sampling strategy of soil quality. *Anal. Mag.* **33** (3), p. 40–43.
- Loveland P. et al. (2003). *Soil thematic strategy – technical working group on monitoring – task group on parameters, indicators and harmonisation*. Report of European Environment Agency (1 Nov 2003).
- Loveland P. et al. (2004). *Soil thematic strategy – technical working group on monitoring – task group on parameters, indicators and harmonisation*. Draft Final Report of European Environment Agency (30 March 2004).
- Maas G. (1980). Estimation de la masse de métaux lourds déposée sur les sols agricoles belges par l'application d'engrais chimiques. *Rev. Agric.* **33**, p. 329–336.
- Maréchal R., Tavernier R. (1974a). Carte des associations de sols à 1/500 000^e. In *Atlas de Belgique du Comité National de Géographie . Planches 11A et 11B*.
- Maréchal R., Tavernier R. (1974b). Pédologie : commentaires des planches de la carte des associations de sols. In *Livret explicatif des planches 11A et 11B de l'Atlas de Belgique du Comité National de Géographie*, p. 4–64.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier JP., Lavelle P., Legros JP., Leprêtre A., Sterckeman T. (1999). Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. *Étud. Gestion Sols* **6** (3), p. 215–230.

- Meyer K. (1991). *La pollution des sols en Suisse – État actuel des recherches et sélection de résultats sur la charge en substances polluantes des sols*. Programme national de recherche sol - Rapport thématique, 241 p.
- Montanarella L. *et al.* (2004). *Soil Thematic Strategy – Technical Working Group on monitoring - Task Group on existing soil monitoring systems*. Draft final report of European Environment Agency (30 March 2004).
- MRW (1995). *Plan d'Environnement pour le Développement durable adopté par le Gouvernement wallon le 9 mars 1995*. [online] . Chap 5-6. [01/03/04], p.4-5. <http://mrw.wallonie.be/dgrne/pedd/C0e_tm.htm>
- MRW (2002). *Actualisation du Contrat d'Avenir pour la Wallonie du 01/02/02*. Communication du Ministère de la Région wallonne [online] . Chap 5. [01/03/04] <http://www.awt.be/tel/caw_actualise_20mesures.pdf>
- MRW – DGRNE (1994). *État de l'Environnement wallon 1994, partie "sol"*. Rapport périodique du Ministère de la Région wallonne - Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement.
- MRW – DGRNE (2003). *Tableau de Bord de l'Environnement Wallon 2003*. Rapport annuel du Ministère de la Région wallonne - Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement.
- ONF (2004). *RENECOFOR : REseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers de l'Office Nationale des Forêts – France*. [online]. *Présentation du réseau* [05/05/04]. <<http://www.onf.fr/pro/Renecofor/index.HTM>>
- Papritz A., Webster R. (1995). Estimating temporal change in soil monitoring: I Statistical theory. *Eur. J. Soil Sci.* **46**, p. 1–13.
- Papritz A., Webster R. (1995). Estimating temporal change in soil monitoring: II Sampling from simulated fields. *Eur. J. Soil Sci.* **46**, p. 13–27.
- Petit P., Defoux J. (2001). *Inventaire de la qualité des sols en Région wallonne*. 1^e édition. Rapport de l'Office wallon des déchets - Direction de la Protection des Sols – DGRNE – Ministère de la RW, 17 p.
- Power JF., Myers RE. (1989). The maintenance or improvement of farming systems in North America and Australia. Soil Quality in semi-arid agriculture. In Steward JWB. (Ed). *Int. Conf Sponsored by the Canadian Int. Development Agency; Saskatoon, Canada, 11-16 juin 1989*, p. 273–292.
- Rondeux J., Lecomte H., Florkin P., Thirion M. (1996). Inventaire permanent des ressources ligneuses de la Région wallonne : principaux aspects méthodologiques. *Cah. For. Gembloux* **19**, p. 25.
- Tessier D., Bruand A., Le Bissonnais Y., Dambrine E. (1996). Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. Numéro Spécial *Etud. Gestion Sols* **3** (4), p.229–244.
- Vandenberghe C., Marcoen JM. (2004). *Survey surfaces agricoles – Établissement des APL de référence 2003. Rapport d'activités annuel, Dossier GRENeRA 04-03*.
- Van Orshoven J., Vandenbroucke D. (1993). *Handleiding bij Aardewerk, Databestand van profielgegevens*. IWONL, 43 p.
- WALPHOT (1989). *Plan d'occupation du sol (Raster) à partir des images SPOT et LANDSAT. Constitution du projet de Plan Régional wallon d'Aménagement du Territoire - Ministère de la Région wallonne- DGATLP-DOH*.
- Walter C. (2002). *Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance*. Mémoire scientifique d'habilitation à diriger des recherches. Université Poincaré de Nancy, 94 p.
- Walter C., Chaussod R., Cluzeau D., Hallaire V., Lamandé M., Perez G., Vertès F., Curmi P. (2002). *Variabilité spatiale de critères de la qualité des sols en milieu limoneux acide*. Subvention N°99 126 Ministère de l'Écologie et du Développement durable (France), rapport final, 177 p.
- Woiwode J., Montanarella L., Loveland P. (2003). *Soil Thematic Strategy – Technical Working Group on Monitoring. Summary of the interim Report (1 Nov 2003)*. European Environment Agency.
- Woiwode J., Montanarella L., Loveland P. (2004). *Soil Thematic Strategy – Technical Working Group on Monitoring. Executive Summary - Draft final Report (30 March 2004)*. European Environment Agency.

(67 réf.)