

Indicateurs synthétiques de la qualité du sol

N. Ruiz Camacho⁽¹⁾, E. Velasquez⁽²⁾, A. Pando⁽¹⁾, T. Decaëns⁽³⁾, F. Dubs⁽¹⁾
et P. Lavelle⁽⁴⁾

- 1) UMR 211 Bioemco, Equipe IBIOS-IRD/Universités Paris VI et XII, 32, Av. Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France
- 2) UMR Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Edificio 500, Colombie
- 3) UMR Laboratoire d'Ecologie, UPRES-EA 1293, UFR Sciences et Techniques, Université de Rouen, F-76821 Mont Saint Aignan Cedex, France
- 4) UMR Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT) Unidad Suelos ap aéreo 6713, Cali, Colombie

RÉSUMÉ

Deux indicateurs synthétiques de la qualité des sols ont été testés dans les sites de recherche du programme Bioindicateurs de l'ADEME. Six fenêtres paysagères de 1 km² chacune ont été choisies dans le Morvan et la Normandie, de façon à représenter un gradient de l'intensification de l'usage du sol, de la forêt naturelle vers les paysages mixtes agro sylvo pastoraux et les cultures intensives.

Les indicateurs s'adaptent parfaitement, permettant d'évaluer finement les divers éléments de la qualité des sols. Le GISQ analyse avec précision l'impact des usages du sol, donnant régulièrement des notes élevées à certains sols de pâturage, voire de culture, pour certains des indicateurs (chimique et physique en particulier). Une coïncidence significative entre les métriques paysagères et les valeurs des divers indicateurs (coefficients de co-variation (RV) de respectivement 0,29 et 0,32 dans le Morvan et en Normandie; $p < 0,01$) montre qu'une part importante de la qualité du sol est déterminée par la structure même du paysage, et non pas uniquement par le mode d'usage du sol dans la parcelle.

L'IBQS se fonde sur la co-variation remarquable observée entre les paramètres chimiques du sol et la composition spécifique (en 195 espèces) de la communauté d'invertébrés édaphiques (RV exceptionnels de respectivement 0,83 pour les sites de Normandie et 0,84 pour le Morvan; significatives au seuil $p < 0,001$). Il sépare bien les milieux en fonction de la qualité de leur sol, les valeurs les plus logiques étant obtenues en utilisant une formule globale de l'indicateur (qui intègre les sites étudiés antérieurement en France) plutôt qu'avec des indicateurs régionaux dont le référentiel est insuffisant.

Les indicateurs IBQS et GISQ sont liés et nous proposons de les utiliser dans une démarche en deux étapes : 1. évaluer les valeurs des divers indicateurs GISQ et 2. rechercher les groupes d'espèces indicatrices de différentes classes de valeur de chacun de ces indices pour constituer des IBQS pour chacun des 5 aspects de la qualité du sol distingués.

Mots clés

Indicateur synthétique, qualité du sol, macro-invertébré, paysage, espèce indicatrice, utilisation du sol.

SUMMARY

SYNTHETIC INDICATORS OF SOIL QUALITY

Two synthetic indicators of soil quality were tested in the study sites selected for the development of the Bioindicators research program of ADEME. Six landscape windows of 1 km² each were selected in Morvan and Normandy in order to describe an intensification gradient of land uses, from natural forest to mixed landscapes of agro silvo pastoral managements and intensive cultures.

Indicators were well adapted to different situations allowing the fine assessment of different elements of soil quality. GISQ analyzes the impact of land uses and regularly gives high values to some pastures or even cropped soils regarding certain indicators (chemical and physical particularly). A significant co-inertia between the landscape metrics and the values of different indicators (RV coefficients of 0.29 and 0.32 respectively to Morvan and Normandy; $p < 0,01$) showed that an important part of soil quality is determined by landscape structure and not only by soil management practices applied at the plot level.

IBQS is based on the remarkable co variation observed between soil chemical parameters and the specific composition (195 species) of soil macro-invertebrate communities (RV coefficients of 0.83 for Normandy and 0.84 for Morvan; $p < 0,001$). The index was able to make a reliable separation of environments depending on their soil qualities, the best adapted values were obtained when using a global formula of the indicator (which take into account 22 previously studied sites in France) rather than when using the insufficient regional dataset.

A relationship between the IBQS and GISQ exists and we suggest using them to follow a two steps procedure: 1. to assess the values obtained for the different GISQ indicators and 2. to identify the assemblages of indicator species associated to the groups of sites showing similar values for different GISQ indicators to compute a IBQS to each of the five different aspects of soil quality taken into account by GISQ.

Key-words

Synthetic indicator, soil quality, macro-invertebrate, landscape, indicator species, landuse.

RESUMEN

INDICADORES SINTÉTICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO

Dos indicadores sintéticos de la calidad del suelo han sido sometidos a un test en los sitios de estudio del programa de investigación Bioindicadores de la ADEME. Seis ventanas de 1 km² situadas en el paisaje fueron seleccionadas en el Morvan y en Normandía, de manera a representar un gradiente de intensificación en la utilización del suelo, desde el bosque natural hasta los paisajes mixtos agro silvo pastorales y los cultivos intensivos.

Los indicadores se adaptan perfectamente, permitiendo la evaluación fina de los diferentes elementos que definen la calidad del suelo. El GISQ analiza con precisión el impacto de la utilización del suelo, dando notas altas a ciertos suelos de pastoreo o incluso a suelos cultivados para ciertos indicadores (químico y físico en particular). Una coinerencia significativa entre las métricas del paisaje y los valores de los diferentes indicadores (coeficientes RV de 0.29 y 0.32 respectivamente para el Morvan y Normandía; $p < 0,01$) muestra que una parte importante de la calidad del suelo está determinada por la propia estructura del paisaje y no únicamente por el tipo de utilización del suelo en la parcela.

El IBQS se basa en la covariación extraordinaria observada entre los parámetros químicos del suelo y la composición específica (en 195 especies) de la comunidad de invertebrados edáficos (RV excepcionales de 0.83 en los sitios de Normandía y de 0.84 en el Morvan; $p < 0,001$). Separa bien los diferentes medios en función de la calidad de sus suelos, los valores más apropiados han sido obtenidos utilizando una fórmula global del indicador (que integra los 22 sitios estudiados con anterioridad en Francia) mientras que el cálculo de indicadores regionales ha puesto de manifiesto la existencia de un referente insuficiente.

Los indicadores IBQS y GISQ están relacionados y proponemos que sean utilizados según un procedimiento formado por dos etapas: 1. evaluar los valores de los diferentes indicadores del GISQ y 2. identificar los grupos de especies indicadoras asociadas a los grupos de sitios con diferentes clases de valor de cada índice para constituir un IBQS para cada uno de los cinco aspectos de la calidad del suelo considerados.

Palabras clave

Indicador sintético, calidad del suelo, macro-invertebrado, paisaje, especie indicadora, utilización del suelo.

La prise en compte croissante des biens et services produits par les écosystèmes, dans toute leur diversité, amène les chercheurs et les pouvoirs publics à changer leur appréhension du sol. Le MEA (Millenium Ecosystem Assessment) montre que le formidable développement de la production agricole dans la deuxième moitié du XX^e siècle s'est fait largement aux dépens de l'ensemble des éléments qui font la qualité du sol, principalement leurs propriétés hydriques, leur capacité à stocker du C, et leur biodiversité (MEA, 2005). Tandis que les pratiques évoluent, la réglementation s'adapte en cherchant à promouvoir un usage du sol qui permette une production optimale tout en maintenant la qualité du sol.

La qualité du sol répond à de très nombreuses définitions. Nous la qualifions dans ce travail comme l'état objectif des divers éléments physiques et biologiques qui composent le sol et la nature et l'intensité des processus qui s'y déroulent. La qualité du sol se définit ainsi par un très grand nombre de paramètres physiques, chimiques et biologiques dont les valeurs relatives permettent d'aborder la notion subjective de « bonne » ou « mauvaise » qualité. L'analyse objective montrera qu'il n'existe pas une qualité, mais des qualités, chimique, physique, biologique, qui peuvent ne pas co-varier dans le même sens.

Dans ce travail, nous abordons la qualité du sol dans l'acception la plus stricte, c'est-à-dire neutre, de ce terme. Nous ne choisisons pas un sol de référence qui aurait toutes les qualités souhaitables. Nous nous bornerons à comparer des sols entre eux par des méthodes d'analyse multivariée qui les classent les uns par rapport aux autres en fonction des différences mesurées. Si nous intégrons dans notre échantillonnage des systèmes forestiers « de référence », c'est seulement pour avoir dans l'échantillonnage la référence au système naturel. Le travail réalisé confirmera d'ailleurs que certains aspects de la qualité du sol peuvent être fortement améliorés par les pratiques humaines.

Nous avons appliqué deux indicateurs synthétiques, le GISQ (General Indicator of Soil Quality, Velasquez, 2004; Velasquez *et al.*, 2006) et l'IBQS (indicateur Biologique de la Qualité du sol) (Ruiz Camacho, 2004) dans 12 fenêtres paysagères qui représentent des gradients d'intensification de l'usage du sol, en Normandie et dans le Morvan.

GISQ : L'INDICATEUR GÉNÉRAL DE QUALITÉ DES SOLS

Le GISQ synthétise l'ensemble des variables qui décrivent les divers aspects, physique, chimique, morphologique, la matière organique et la biodiversité des sols en 5 sous-indicateurs correspondants dont les valeurs varient de 0.1 à 1.0. Un indicateur général combine ces 5 sous-indicateurs, donnant *in fine* une note unique à la fin de l'analyse, si c'est le souhait de l'utilisateur (Velasquez *et al.*, 2007). Il fut initialement

conçu à partir d'un référentiel de 63 points disposés sur une grille régulière à maille de 200 m dans un bassin versant du Nicaragua (Velasquez, 2006). Un ensemble de 54 variables décrivait respectivement l'état chimique (8 variables), physique (6), morphologique (13), la matière organique (11) et la biodiversité (16 ordres de la macrofaune du sol). Les analyses multivariées permettent dans un premier temps de classer les sites suivant des axes qui reflètent les variations dans le type de qualité (physique, chimique...) sélectionné et d'éliminer les variables dont le pouvoir discriminant est faible. On combine ensuite les variables les plus discriminantes dans des formules qui tiennent compte de la valeur de la variable (intensité) et de son poids sur les axes factoriels 1 et 2 retenus pour la construction de l'indicateur et de la proportion de variance expliquée par ces facteurs.

La formule d'un sous-indicateur est typiquement de la forme:

$$I(a) = F_1(a_1v_1 + b_1v_1 + c_1v_1) + F_2(a_2v_1 + b_2v_2 + c_2v_3 \dots)$$

où F1 et F2 sont les pourcentages de variance expliquée par les facteurs 1 et 2 respectivement, a₁, b₁... sont les contributions relatives respectives des variables a, b, aux facteurs 1 et 2, et v₁, v₂... les valeurs des variables V1, V2 réduites par transformation homothétique pour varier dans un intervalle compris entre 0,1 et 1,0.

L'analyse multivariée classe les variables et les sites depuis des valeurs négatives jusqu'à des valeurs positives sur les axes. De par la nature même de l'ACP, la position du côté plus ou moins est définie aléatoirement dans la procédure de calcul. Il est donc important à cette étape de prendre en compte le sens alloué aux axes et d'intervenir pour que les variables caractérisant la bonne qualité du sol (suivant l'appréciation de l'expert) soient toujours considérées comme positives (Lavelle *et al.*, 2009).

Le seuil de contribution décidant de l'inclusion ou du rejet d'une variable est aussi une décision de l'opérateur. Dans le travail initial, les variables retenues avaient une contribution au moins égale à 50 % de celle de la variable la plus « lourde ». Cette sélection est uniquement destinée à produire un indicateur mesurable avec le plus petit nombre de variables possible. Quand le jeu de données comporte peu de variables, ou quand l'acquisition des données n'est pas un problème, on peut aussi bien inclure toutes les variables dans la formule.

La formule prend ainsi en compte de façon objective:

1. les principaux facteurs de variations des variables indicatrices extraits par l'analyse multivariée sous forme de facteurs 1 et 2; ceci nous assure que les sites seront comparés en fonction des principaux effets observés;
2. la contribution relative des différentes variables à la définition de ces facteurs, permettant de réduire considérablement le nombre de paramètres utilisés et ainsi de réduire les coûts d'analyse;
3. l'appréciation de l'expert sur la qualité du sol, un attribut en partie subjectif, qui dépend en particulier des usages envisagés.

La même procédure est utilisée pour réunir les 5-sous indicateurs en un seul indicateur général qui résume toute l'information.

Une fois conçues ces formules, elles peuvent être utilisées dans l'espace délimité par les sites du référentiel et dans le temps. Le nombre de variables à mesurer est alors considérablement réduit. L'expérimentateur peut de plus choisir parmi les variables celles qui sont les plus faciles et les moins coûteuses à mesurer (Velasquez, 2007).

La méthode GISQ appliquée dans diverses régions du monde (LiuLi, 2007; Velasquez *et al.*, NP; Cecillion, 2009; Xhu, 2009) a montré son aptitude à détecter des variations dans la qualité des sols en fonction des types d'utilisation du sol.

L'IBQS

L'Indicateur Biologique de la Qualité des Sols basé sur le concept d'espèces indicatrices est construit à partir des relevés de macro invertébrés du sol identifiés au niveau de l'espèce. Le peuplement de macro invertébrés du sol, en France, compte une richesse potentielle de plusieurs centaines d'espèces. La grande diversité de leurs habitats, de leurs régimes alimentaires et de leur tolérance envers les conditions climatiques, physiques et chimiques du milieu font de ce peuplement un indicateur très précis des conditions du milieu (Lavelle *et al.*, 2006; Decaëns, sous presse).

L'IBQS se construit à partir d'un référentiel, c'est-à-dire un ensemble de sites qui représenteront l'essentiel de la diversité d'une région. Un échantillonnage en grille régulière assurera l'expérimentateur que son échantillonnage tient compte de la proportion et la richesse des types d'utilisation dans le paysage; d'autres stratégies d'échantillonnage (stratifié) peuvent aussi fonctionner.

Les sols échantillonnés sont caractérisés grâce à un ensemble de mesures physiques, chimiques et autres utilisées couramment pour évaluer la qualité du sol. Ils sont ensuite groupés en fonction de leur similarité d'un point de vue physico-chimique. La méthode développée dans le GISQ, qui transforme l'information contenue dans la cinquantaine de variables pertinentes en 5 sous-indicateurs qui varient de 0.1 à 1.0, peut permettre de synthétiser l'information qu'ils contiennent. Une autre approche consiste à appliquer à ces données une analyse hiérarchique (cluster analysis) qui répartira les sites d'échantillonnage en groupes de qualité homogène.

Les sites sont ainsi classés en fonction de leur appartenance à un groupe, cluster isolé par analyse hiérarchique ou ensemble de sites ayant des valeurs comparables des indicateurs GISQ.

La méthode IndVal (Dufrene et Legendre, 1997) permet ensuite d'identifier, dans le grand nombre d'espèces de macro-invertébrés récoltées, celles qui ont une valeur indicatrice significative pour tel ou tel groupe de sites. Une formule simple réunit ces données et évalue la qualité du sol dans un intervalle de 0 à 20:

$$IBQS = \sum_{i=1}^n \ln(Di+1) \times Si$$

où Di est la densité moyenne de l'espèce i dans un site et Si la valeur indicatrice du taxon.

Cette expression utilise la transformation logarithmique des abondances des macro-invertébrés afin de mieux souligner les différences entre les sites d'étude. Les deux critères utilisés pour le calcul de l'IBQS (Di et Si) permettront ainsi de réaliser une évaluation plus pertinente de l'état du sol que le seul critère de la diversité des taxons indicateurs, par exemple. La densité des peuplements du sol peut être fortement modifiée par l'intensité des pratiques de gestion. Tenir compte de ce paramètre a un intérêt écologique important qui peut s'avérer essentiel quand on compare par exemple des milieux avec des niveaux de productivité différents.

Cette formule intègre que le nombre d'espèces indicatrices et leurs densités diminuent avec la dégradation du milieu. C'est ce qu'on observe effectivement dans un ensemble de 22 sites français dont l'échantillonnage a servi de base à la mise au point initiale de la méthode.

L'évaluation faite par l'IBQS peut être utilisée pour octroyer une note globale de qualité au sol et le classer par rapport à un référentiel de départ ou bien pour faire une interprétation de l'état écologique du sol grâce à l'analyse des espèces indicatrices présentes et leur mode de vie. Une augmentation de la note octroyée par l'indice indiquant une amélioration de la qualité du milieu.

SITES D'ÉTUDE

Les sites d'étude sont localisés en Haute-Normandie et en Bourgogne (dans le Morvan). Dans chaque région, 6 fenêtres paysagères de 1 km² représentant un gradient dans l'intensification de l'usage de la terre ont été délimitées.

Morvan

Localisé dans le nord du parc naturel régional du Morvan (*figure 1*), ce site présente un gradient d'intensification depuis des paysages dominés par les forêts de feuillus, vers les forêts de conifères, une mosaïque agricole dominée par les boisements, une mosaïque agricole mixte, une mosaïque agricole prairiale et une mosaïque agricole céréalière qui représente le niveau d'intensification maximal.

Normandie

Les différents niveaux d'intensification agricole sont également représentés dans cette région avec des fenêtres paysagères forestières (feuillus ou résineux), le bocage et des paysages dominés par les cultures intensives.

L'ensemble du dispositif permet d'étudier les modifications de la structure du paysage consécutives à l'intensification de

Figure 1 - Localisation des 6 fenêtres paysagères du site du Morvan. LUU1 : forêt de feuillus, LUU2 : forêt de conifère, LUU3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, LUU4 : une mosaïque agricole mixte, LUU5 : mosaïque agricole prairiale et LUU6 : mosaïque agricole céréalière.

Figure 1 - Location of the 6 landscape windows in Morvan. LUU1: deciduous forests, LUU2: conifer forests, LUU3: agricultural mosaic dominated by woodlands, LUU4: mixed agricultural mosaic, LUU5: grassland mosaic and LUU6: cereal culture mosaic.

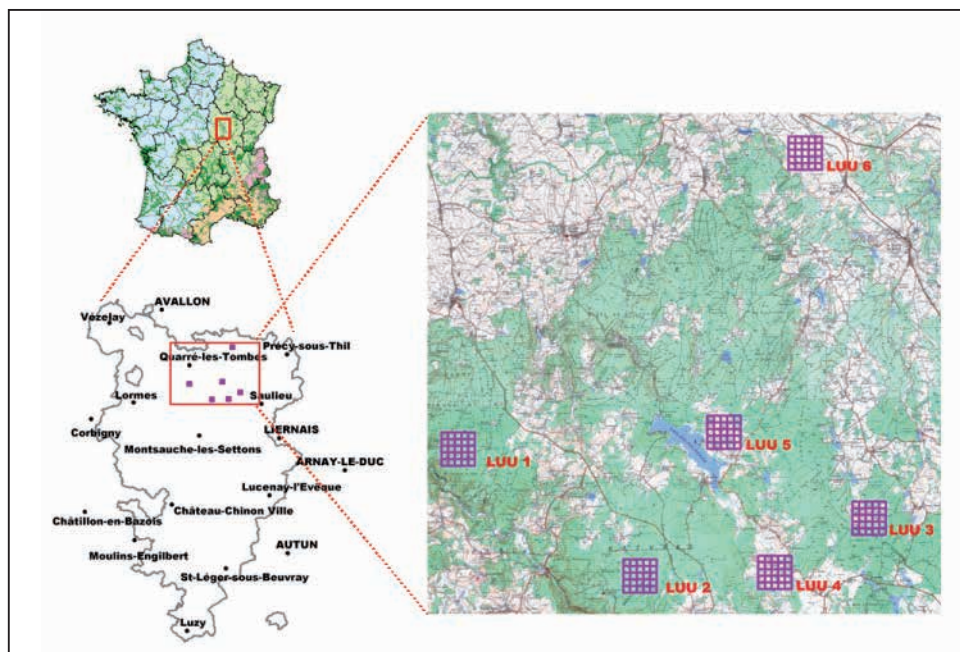


Tableau 1 : Récapitulatif de l'échantillonnage et des mesures de terrain.

Table 1 : Summary for sampling and field measurements.

	Morvan		Normandie	
	Paysage	Parcelle	Paysage	Parcelle
Echantillons macro-faune du sol	288	120	288	120
Echantillons sol	96	36	96	0
Echantillons micromorphologie	96	36	96	36
Mesure de résistance du sol	288	36	288	0

l'agriculture ou à la déprise agricole sur les trois grandes unités paysagères caractéristiques de la Seine Maritime: la pleine alluviale et les coteaux calcaires de la Basse Vallée de la Seine ainsi que les plateaux limoneux de la région rouennaise.

Echantillonnage des sols et de la macrofaune du sol

Le prélèvement des échantillons a eu lieu pendant les mois d'avril et de mai 2005. L'échantillonnage des macro-invertébrés du sol (25 x 25 x 20 cm) ainsi que le prélèvement de sol pour la réalisation d'analyses physico-chimiques (sur les 20 premiers centimètres du sol), le prélèvement pour l'analyse de la micromorphologie (bloc de 5 cm d'arête) et des mesures de résistance du sol, ont été réalisés à l'échelle du paysage et à l'échelle parcellaire (tableau 1).

Au **niveau du paysage**, une grille de 200 m de pas a été positionnée sur chaque fenêtre. A chacun des 16 points

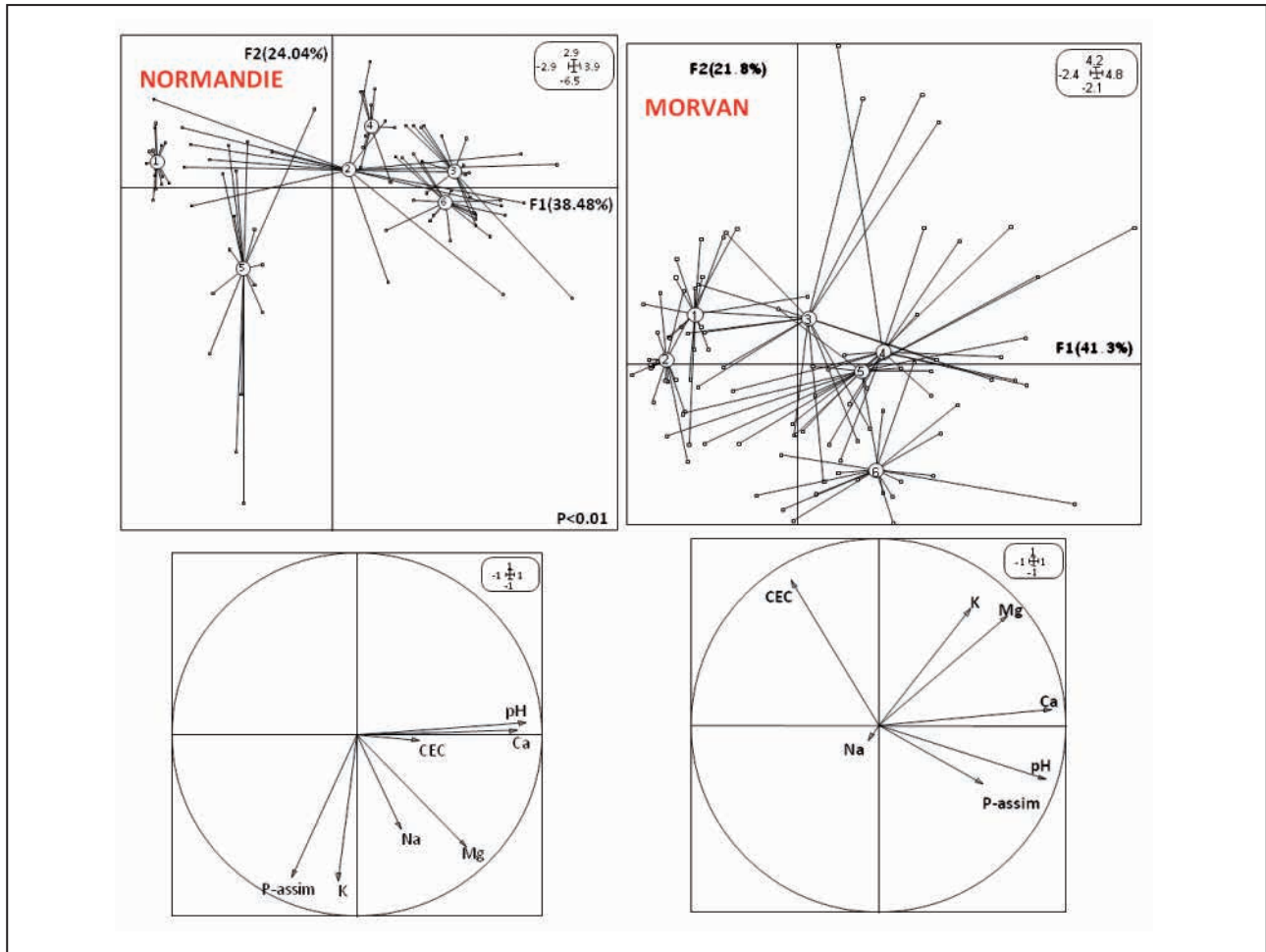
d'intersection de la grille, trois prélèvements de macro-invertébrés disposés en triangle et espacés de 10 m ont été réalisés en utilisant la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility; Lavelle, 1988; Anderson & Ingram, 1993). Un cube de sol de 5 cm d'arête a été prélevé au centre du triangle pour l'analyse morphologique du sol suivant la méthode de Velasquez *et al.* (2007) dérivée de la technique de Topoliantz et Ponge (2000). Un échantillon composite de 500 g de sol a par ailleurs été préparé en mélangeant du sol prélevé à côté de chaque point TSBF pour l'analyse des propriétés physico-chimiques.

A côté de chaque point de prélèvement de macro-invertébrés, la résistance tangentielle à la coupe et la pénétrométrie a été mesurée *in situ* avec des appareils de terrain.

A l'**échelle de la parcelle**, un échantillonnage un peu plus conséquent a été réalisé pour assurer une bonne représentation des espèces de macro-invertébrés présentes dans chaque site nécessaire au développement de la méthode IBQS. Quatre milieux représentatifs des gradients d'intensification repérés ont été sélectionnés dans le Parc Naturel Régional du Morvan

Figure 2 - Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) et dans le Morvan (à droite) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ($p < 0,001$) à partir des paramètres chimiques. 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ($p < 0,001$). Le cercle de corrélations avec l'ordination des variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques.

Figure 2 - Landscape windows ordination in Normandy (on the left side) and in Morvan (on the right side) along of the two first PCA factors ($p < 0.001$) using chemical measurements. 1: deciduous forests, 2: conifer forests, 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, 4: mixed agricultural mosaic, 5: grassland mosaic and 6: cereal culture mosaic. Significant test on the groups ($p < 0.001$). The correlation circles showing the variables ordination can be observed under each graph.



et en Normandie. Une évaluation des peuplements de macro-invertébrés du sol a ainsi été réalisée dans des forêts de feuillus représentatives des milieux les plus préservés, dans des forêts de résineux gérées de manière plus intensive, dans des milieux prairiaux et dans des champs cultivés correspondant aux milieux les plus intensivement exploités.

Chaque milieu est choisi dans la fenêtre paysagère où il est dominant. Trois parcelles sont choisies et, dans chacune d'entre elles, 10 relevés TSBF disposés tous les 20 m sur deux

transects parallèles sont effectués. A côté de trois des dix points, un échantillon de sol est prélevé pour caractérisation physico-chimique et un bloc de sol de 5 cm d'arête est extrait pour l'analyse morphologique et des mesures de résistance tangentielle à la coupe et de pénétrométrie sont réalisées. En Normandie, cependant, une seule valeur par parcelle a été obtenue.

Figure 3 - Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) et dans le Morvan (à droite) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ($p < 0,001$) à partir des paramètres physiques. 1: forêt de feuillus, 2: forêt de conifères, 3: mosaïque agricole dominée par les boisements, 4: une mosaïque agricole mixte, 5: mosaïque agricole prairiale et 6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ($p < 0,001$). Le cercle de corrélations avec l'ordination des variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques. D.a.: densité apparente; RTC: Résistance tangentielle à la coupe; Pen: Pénétrométrie

Figure 3 - Landscape windows ordination in Normandy (on the left side) and in Morvan (on the right side) along the two firsts PCA factors ($p < 0.001$) using physical measurements. 1: deciduous forests, 2: conifer forests, 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, 4: mixed agricultural mosaic, 5: grassland mosaic and 6: cereal culture mosaic. Significant test on the groups ($p < 0.001$). The correlation circles showing the variables ordination for each site can be observed under each graph. D.a.: bulk density; TCR: tangential cut resistency, Pen: penetration resistency.

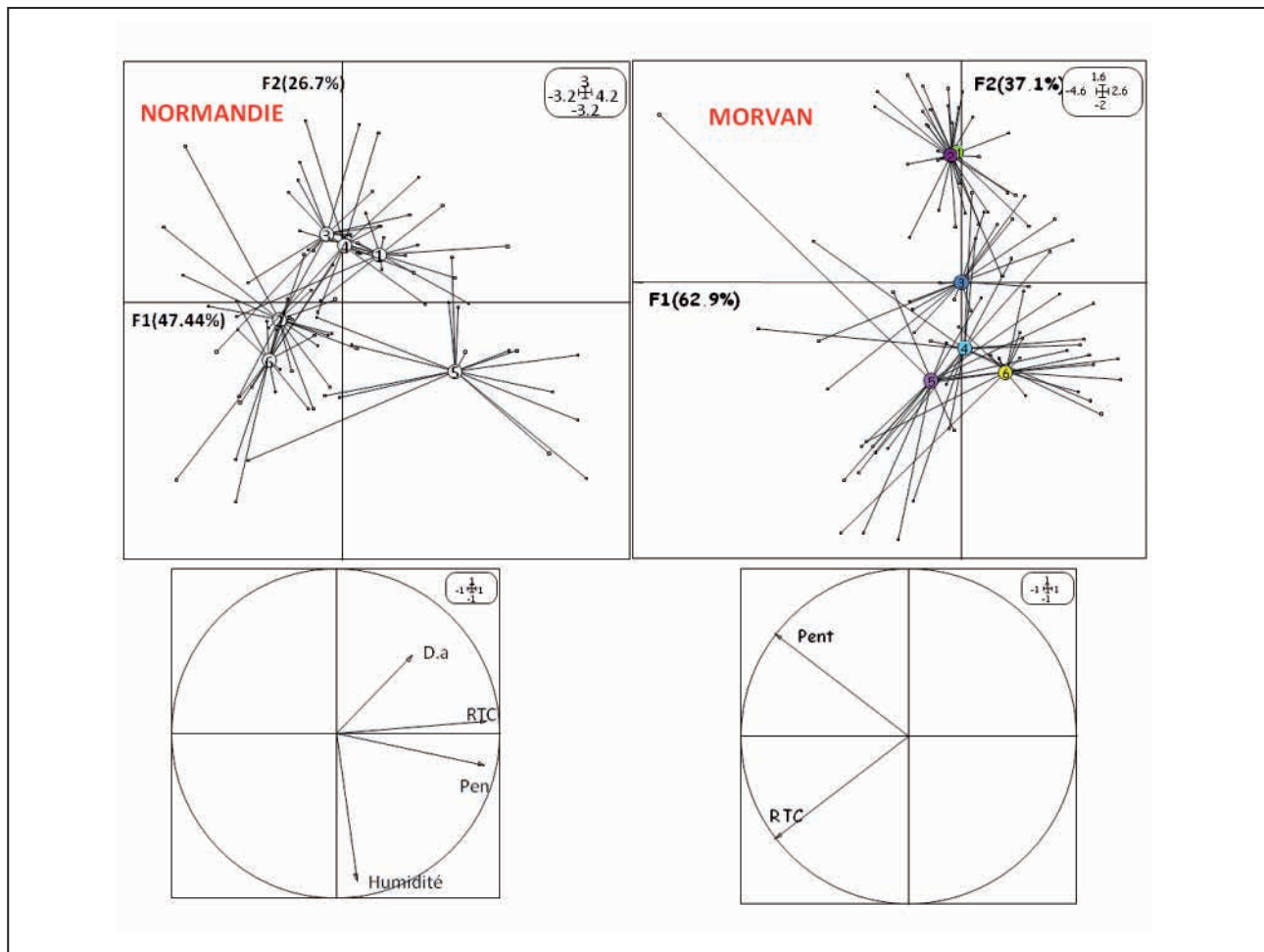
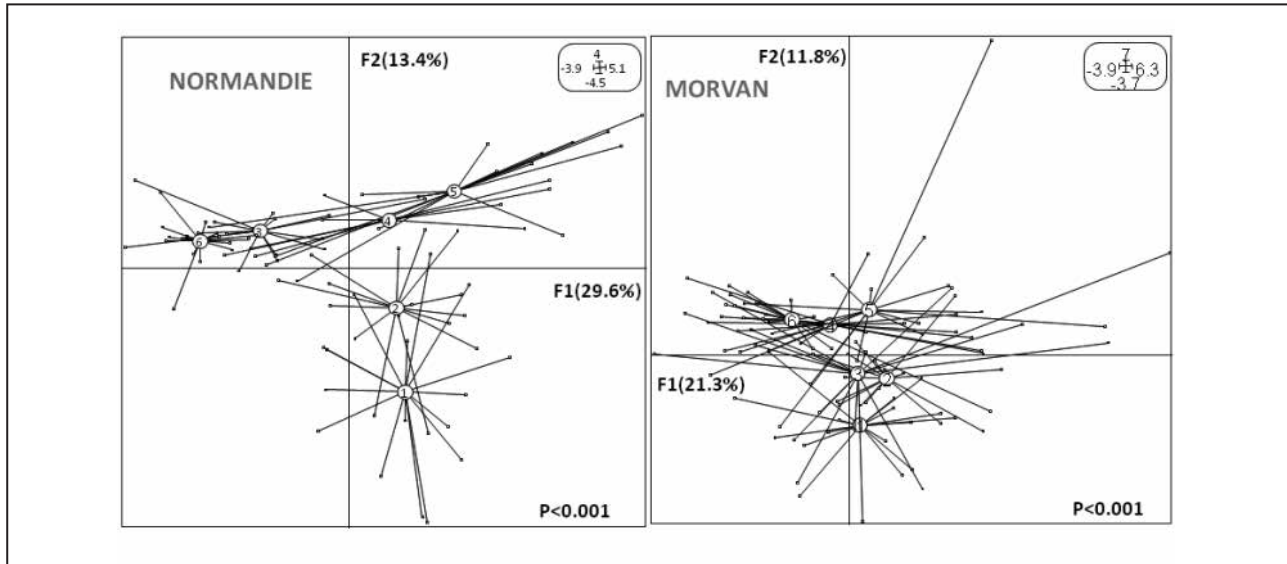


Figure 4 - Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ($p < 0,001$) à partir des données de micromorphologie et dans le Morvan (à droite). 1: forêt de feuillus, 2: forêt de conifères, 3: mosaïque agricole dominée par les boisements, 4: une mosaïque agricole mixte, 5: mosaïque agricole prairiale et 6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ($p < 0,001$).

Figure 4 - Landscape windows ordination in Normandy (on the left side) along the two first PCA factors ($p < 0.001$) using micromorphology data and in Morvan (on the right side). 1: deciduous forests, 2: conifer forests, 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, 4: mixed agricultural mosaic, 5: grassland mosaic and 6: cereal culture mosaic. Significant test on the groups ($p < 0.001$).



RÉSULTATS

Caractérisation physique, chimique et biologique des sols étudiés

Les données d'analyse et les diverses mesures ont été publiées par ailleurs (Ruiz Camacho *et al.*, 2008). Ces données ont été traitées par des analyses en composantes principales dont nous rappelons les principaux résultats.

Paramètres chimiques

Les paramètres analysés ici sont le pH, les cations (K, Ca, Mg), la CEC, le P assimilable et le Na.

Dans les deux régions étudiées, les sols des fenêtres les plus intensivement exploitées sont caractérisés par des pH plus élevés et des teneurs plus élevées en bases, Ca et Mg principalement (*figure 2*). Dans le Morvan, ces sols présentent aussi des teneurs plus importantes en phosphore assimilable. Dans les deux régions, la séparation des points en fonction du degré d'intensification de la fenêtre à laquelle ils appartiennent est significative (test de permutation des coordonnées sur les axes; $p < 0,01$ dans les deux cas).

Paramètres physiques

L'état physique du sol est apprécié dans cette étude par la mesure de la densité apparente, de la résistance tangentielle à la coupe, la résistance à la pénétration, la pente et la teneur en eau du sol au moment des prélèvements. Dans le Morvan, un gradient très net peut être observé le long de l'axe 2 de l'ACP. Il correspond au gradient d'intensification décrit par les fenêtres et oppose les fenêtres 1 et 2 à la fenêtre 6 qui se situe de l'autre côté de l'axe (*figure 3*).

En Normandie, les fenêtres se répartissent selon trois groupes. Le premier groupe est constitué par les fenêtres 1, 3 et 4 situées sur la moitié supérieure du graphique. Sur la moitié inférieure, les fenêtres 2 et 6 sont proches et se situent sur l'extrémité gauche de l'axe 1 face à la fenêtre 5 qui se trouve du côté droit de ce même axe. Il faut cependant noter que seules la pente et la résistance tangentielle ont été mesurées sur les sites de Normandie.

Morphologie

La méthode d'analyse morphologique sépare le sol en 11 éléments différents: des agrégats physiques petits (<1 cm), moyens (1 à 3 cm) et grands (> 3 cm), agrégats racinaires de petite taille, moyenne et grande, agrégats « biogéniques » (le plus souvent, des turricules de vers de terre) petits, moyens

Figure 5 - Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ($p < 0,001$) à partir des données de matière organique et dans le Morvan (à droite). 1: forêt de feuillus, 2: forêt de conifères, 3: mosaïque agricole dominée par les boisements, 4: une mosaïque agricole mixte, 5: mosaïque agricole prairiale et 6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ($p < 0,001$). Le cercle de corrélations avec l'ordination des variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques.

Figure 5 - Landscape windows ordination in Normandy (on the left side) along the two first PCA factors ($p < 0.001$) using organic matter measurements and in Morvan (on the right side) 1: deciduous forests, 2: conifer forests, 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, 4: mixed agricultural mosaic, 5: grassland mosaic and 6: cereal culture mosaic. Significant test on the groups ($p < 0.001$). The correlation circles showing the variables ordination for each site can be observed under each graph.

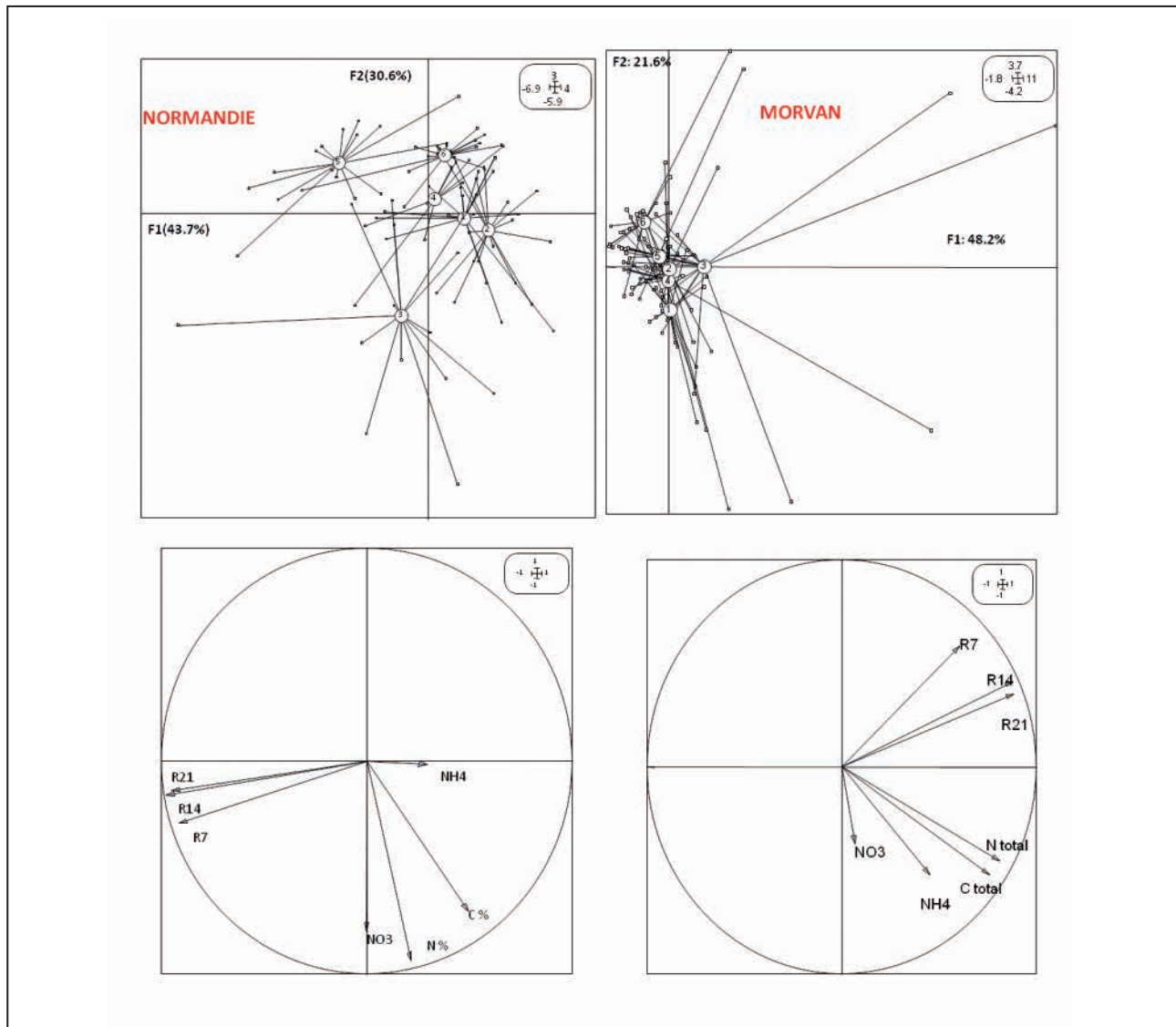
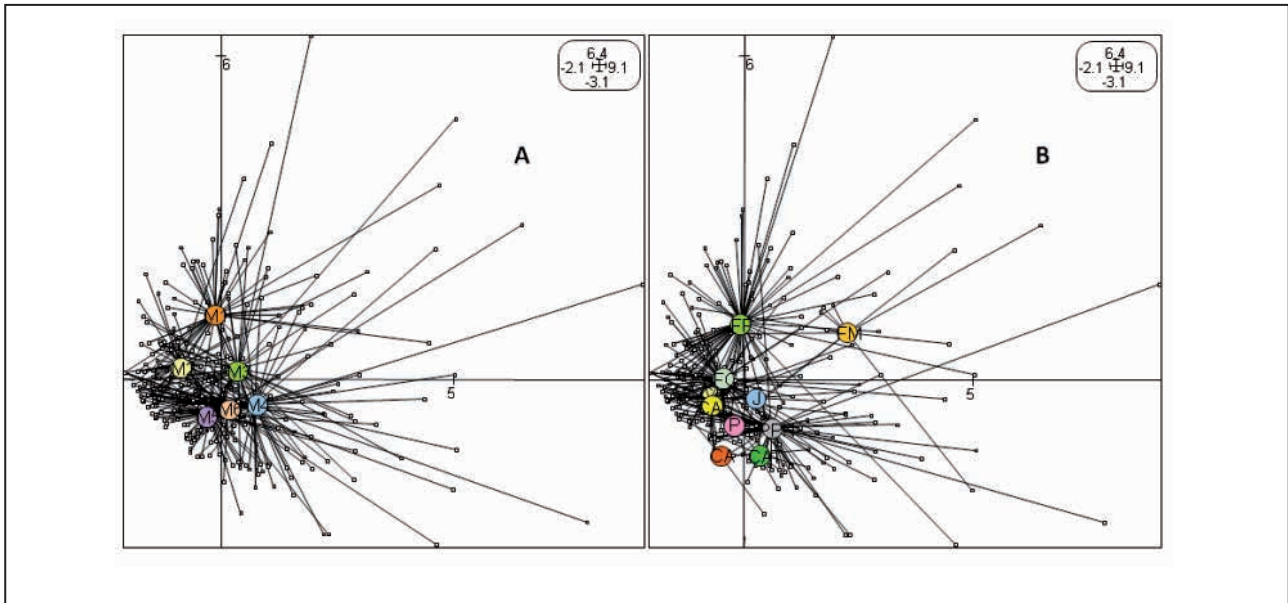


Figure 6 - Analyse en Composantes principales réalisée sur les données faunistiques. Ordination des six fenêtres paysagères. F1: 16.5 %; F2: 9.1 %; ● M1: forêt de feuillus, ● M2: forêt de conifères, ● M3: mosaïque agricole dominée par les boisements, ● M4: une mosaïque agricole mixte, ● M5: mosaïque agricole prairiale et ● M6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ($p < 0,001$)

Figure 6 - Principal Component Analysis performed on macro-invertebrate data. Landscape windows ordination. F1: 16.5 %; F2: 9.1 %; ● M1: deciduous forests, ● M2: conifer forests, ● M3: agricultural mosaic dominated by woodlands, ● M4: mixed agricultural mosaic, ● M5: grassland mosaic and ● M6: cereal culture mosaic. Significant test on the groups ($p < 0.001$).



et grands, cailloux, racines, bois, feuilles, tiges, graines et invertébrés.

Les ACP réalisées sur le jeu de données morphologiques montrent un effet significatif des types d'usage et du niveau d'intensification indiqué par les numéros des fenêtres paysagères. En Normandie, trois groupes de types d'utilisation se distinguent, les cultures, les prairies et les forêts (*figure 4*). Les cultures sont caractérisées par la dominance des agrégats physiques et biogéniques petits et grands alors que les agrégats biogéniques de petite taille sont plus abondants dans les milieux forestiers. Les sols de prairies sont quant à eux plus riches en agrégats d'origine racinaire. Dans le Morvan, les sols cultivés sont caractérisés surtout par l'abondance des agrégats physiques, alors que les sols prairiaux et les forêts présentent une plus grande quantité d'agrégats biogéniques et racinaires.

L'ordination des fenêtres paysagères suit la même tendance observée pour les utilisations du sol. Les fenêtres où le paysage est dominé par les forêts apparaissent groupées et clairement détachées de celles dominées par les cultures et les prairies ainsi que d'un troisième groupe constitué par les fenêtres à paysage plus fragmenté où aucune utilisation du sol ne domine. En Normandie, les fenêtres 1, 2 et 3 moins fragmentées sont

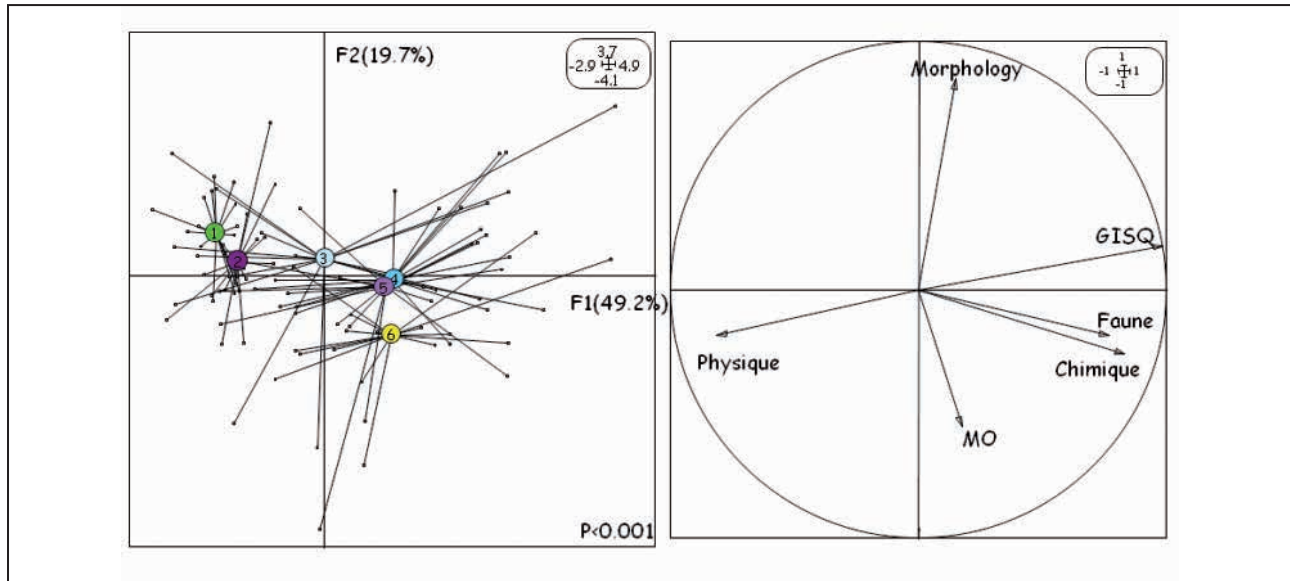
groupées sur la moitié inférieure de l'axe 2 et les fenêtres 4, 5 et 6 se situent à proximité mais sur la moitié supérieure de l'axe.

Matière organique

L'état de la matière organique des sols est mesuré par 7 variables : teneurs totales en C et N, respirations cumulées du sol après 7, 14 et 21 jours en conditions de laboratoire, teneurs en NO_3^- et NH_4^+ . La distribution des fenêtres paysagères selon la teneur en matière organique du sol montre des différences entre les deux régions étudiées. En Normandie, les sols forestiers des fenêtres 1 et 2 apparaissent groupés avec les sols cultivés de la fenêtre 6 ainsi qu'avec la fenêtre 4 et caractérisés par des teneurs en NH_4^+ élevées. Les sols de la fenêtre 3 sont les plus riches en matière organique et d'une manière générale ce sont ces sols et ceux de la fenêtre 5 qui présentent la plus forte activité respiratoire (*figure 5*). Dans le Morvan, les sols au sein des fenêtres présentent une plus forte hétérogénéité et certains points avec des valeurs particulièrement importantes tirent les axes ne permettant pas une discrimination claire des fenêtres sur le plan factoriel décrit par l'ACP. Toutefois, on peut observer le long de l'axe 2 de l'analyse le gradient d'intensification représenté par les fenêtres.

Figure 7 - Ordination des fenêtres paysagères du Morvan sur le plan factoriel décrit par les deux premiers axes d'une analyse en composantes principales réalisée sur les valeurs des sous-indicateurs et du GISQ. ● 1: forêt de feuillus, ● 2: forêt de conifères, ● 3: mosaïque agricole dominée par les boisements, ● 4: une mosaïque agricole mixte, ● 5: mosaïque agricole prairiale et ● 6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les fenêtres significatif ($p < 0,001$).

Figure 7 - Landscape windows ordination on the factorial plan described by the two first axis of a principal component analysis performed on sub-indicators and GISQ values in Morvan ● 1: deciduous forests, ● 2: conifer forests, ● 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, ● 4: mixed agricultural mosaic, ● 5: grassland mosaic and ● 6: cereal culture mosaic. Significant test on the windows ($p < 0.001$).



Macrofaune du sol

La méthode TSBF d'échantillonnage de la macrofaune du sol a permis une extraction simple et rapide des espèces appartenant aux 17 groupes d'invertébrés rencontrés dans le sol: Vers de terre; Limaces; Isopodes; Diplopedes Chilopodes; Pseudoscorpions; Opilions; Araignées; Blattes; Dermaptères; Hémiptères; Diptère (larves); Lépidoptère (larves); Orthoptères; Coléoptères (adultes et larves séparés), Fourmis.

Le travail réalisé dans les deux régions confirme l'extrême sensibilité de cette faune aux conditions créées par la gestion des sols, chaque groupe répondant de manière autonome en fonction de son écologie. Il en résulte des variations assez grandes dans l'abondance et la composition des peuplements, avec des effets significatifs à l'échelle des parcelles du type d'utilisation du sol et, à l'échelle des fenêtres, de l'intensification (*figure 6A et 6B*). L'analyse de la diversité et de l'abondance de la macrofaune du sol au niveau des fenêtres paysagères (*figure 6A*) permet de mettre en évidence le même gradient d'intensification décrit par les critères paysagers utilisés lors de leur sélection. La fenêtre 1 (paysage le moins intensifié) est séparée des autres fenêtres qui se suivent en décrivant un gradient selon lequel les fenêtres 2 et 3 se retrouvent en position centrale suivies des fenêtres 4, 5 et 6 qui représentent l'extrême opposé. Si l'on

s'intéresse à l'ordination des utilisations du sol (*figure 6B*) on observe que, parmi les dix utilisations du sol présentes sur le site du Morvan, les milieux « feuillus » représentés par les forêts secondaires des feuillus et les forêts à végétation arbustive en mutation sont séparés des autres utilisations du sol considérées. Il est intéressant aussi de noter qu'on observe une différence des peuplements de macro-invertébrés entre les cultures annuelles destinées au pâturage ou celles qui viennent juste d'être mises en culture après des années en prairie destinée à la fauche et les cultures annuelles conventionnelles. Les deux premiers types d'utilisation du sol se rapprochent plus des peuplements de macrofaune retrouvés dans les prairies qu'elles soient temporaires ou bien permanentes. Le rapport complet détaille l'ensemble des résultats (Ruiz Camacho *et al.*, 2008).

Le GISQ (General Index of Soil Quality)

La formule du GISQ a été établie séparément pour chaque région avant d'être calculée pour chaque point d'intersection de la grille dans les 6 fenêtres paysagères du Morvan et de la Normandie (*tableaux 2 et 3*). Au total, les 5 sous-indicateurs et l'indicateur général ont été calculés pour 192 points (tableau complet des valeurs dans Ruiz Camacho *et al.*, 2008).

Figure 8 - Ordination des fenêtres paysagères en Normandie sur le plan factoriel décrit par les deux premiers axes d'une analyse en composantes principales réalisée sur les valeurs des sous-indicateurs et du GISQ. ● 1: forêt de feuillus, ● 2: forêt de conifères, ● 3: mosaïque agricole dominée par les boisements, ● 4: une mosaïque agricole mixte, ● 5: mosaïque agricole prairiale et ● 6: mosaïque agricole céréalière. Test sur les fenêtres significatif ($p < 0,001$).

Figure 8 - Landscape windows ordination on the factorial plan described by the two first axis of a principal component analysis performed on sub-indicators and GISQ values in Normandy. ● 1: deciduous forests, ● 2: conifer forests, ● 3: agricultural mosaic dominated by woodlands, ● 4: mixed agricultural mosaic, ● 5: grassland mosaic and ● 6: cereal culture mosaic. Significant test on the windows ($p < 0.001$).

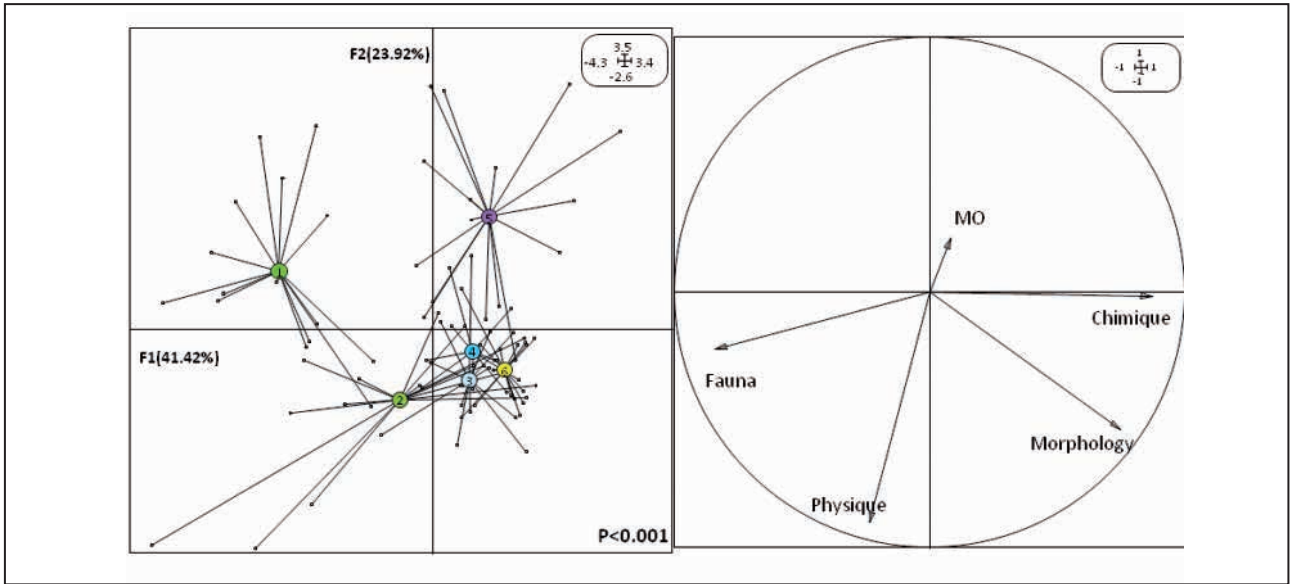


Figure 9 - Dendrogramme réalisé à partir des valeurs des 10 paramètres chimiques communs à tous les sites.

Figure 9 - Dendrogramm performed on the 10 chemical parameters commons to all sites.

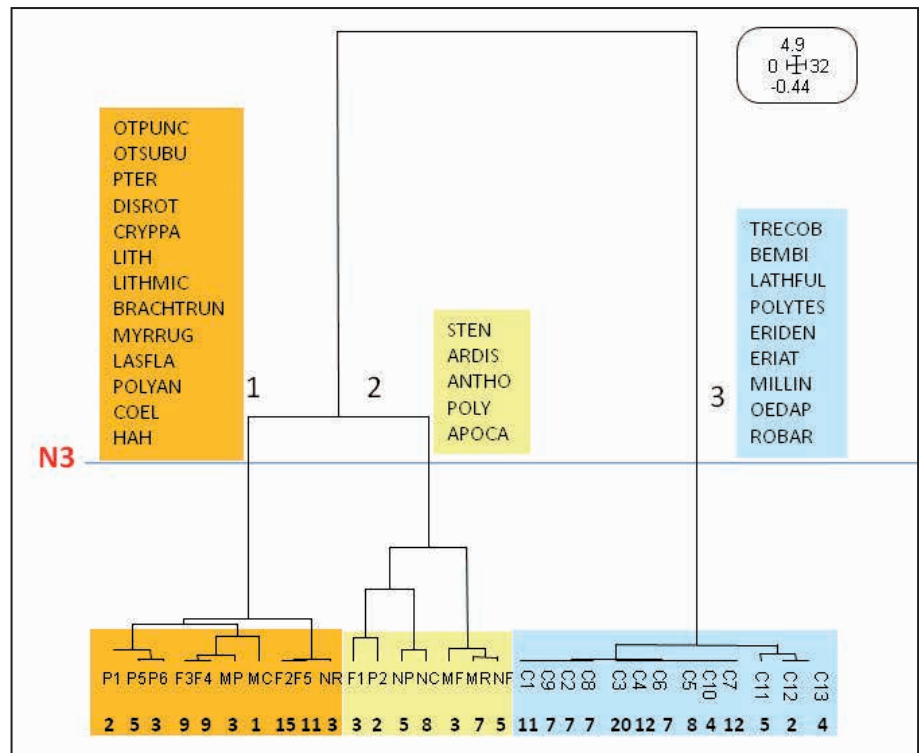


Tableau 2: Valeurs moyennes et écarts-types des sous-indicateurs et du GISQ pour chacune des pratiques de gestion présentes dans les 6 fenêtres paysagères en Normandie et dans le Morvan.

Table 2: Average values and standard deviation for GISQ sub-indicators in every landuse units present in the landscape windows in Normandy and in Morvan.

		Sous-Indicateurs					
REGION	Pratique de gestion	Faune	Chimique	MO	Morphologie	Physique	GISQ
NORMANDIE	forêt secondaire gérée	0,52 (0,18)	0,17 (0,03)	0,35 (0,12)	0,45 (0,21)	0,59 (0,19)	0,73 (0,11)
	forêt gérée (coupe claire)	0,47 (0,14)	0,20 (0,09)	0,23 (0)	0,74 (0,09)	0,65 (0,05)	0,67 (0,01)
	taillis	0,29 (0,03)	0,69 (0,1)	0,39 (0)	0,8 (0,1)	0,6 (0,03)	0,43 (0,04)
	pâturage	0,28 (0,09)	0,57 (0,16)	0,54 (0,2)	0,75 (0,14)	0,52 (0,18)	0,44 (0,12)
	labour	0,26 (0,07)	0,58 (0,1)	0,25 (0,1)	0,84 (0,07)	0,55 (0,06)	0,43 (0,04)
	fauche	0,3 (0,09)	0,51 (0,27)	0,56 (0,28)	0,76 (0,2)	0,46 (0,34)	0,44 (0,09)
MORVAN		Faune	Chimique	MO	Morpho_Physi		GISQ
	régénération semi-naturelle	0,21 (0,06)	0,25 (0,08)	0,24 (0,07)	0,5 (0,16)		0,24 (0,08)
	coupe claire	0,29 (0,08)	0,35 (0,1)	0,3 (0,11)	0,42 (0,18)		0,32 (0,09)
	pâturage	0,43 (0,14)	0,61 (0,11)	0,41 (0,2)	0,54 (0,21)		0,64 (0,21)
	labour	0,37 (0,09)	0,61 (0,14)	0,31 (0,1)	0,24 (0,07)		0,47 (0,15)
	labour et pâturage à l'automne	0,62 (0,08)	0,61 (0,06)	0,31 (0,07)	0,32 (0,2)		0,68 (0,11)
	fauche	0,47 (0,2)	0,62 (0,01)	0,3 (0,04)	0,52 (0,2)		0,67 (0,2)
	taillis	0,39 (0,2)	0,4 (0,13)	0,22 (0,1)	0,4 (0,03)		0,42 (0,16)

En Normandie la formule du GISQ est la suivante :

$$GISQ = 1,74 Ph - 1,51 Ch + 1,49 Fa - 0,54 Mi - 0,10 MO$$

où :

Ph: Sous-indicateur physique

Ch: Sous-indicateur chimique

Fa: Sous-indicateur faunistique

Mi: Sous-indicateur micromorphologique

Mo: Sous-indicateur matière organique

Dans le Morvan, le calcul du GISQ a été réalisé selon la formule :

$$GISQ = 1,96 Ph + 1,93 Ch + 1,30 Mo_Ph - 0,15 MO$$

La valeur octroyée du GISQ est variable au sein d'un même type d'utilisation du sol montrant que l'état du sol ne dépend pas uniquement de la pratique de gestion mais aussi des milieux environnants.

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les valeurs des sous-indicateurs et du GISQ pour le Morvan (figure 7) et la Normandie (figure 8). Dans le Morvan, le gradient d'intensification se retrouve très nettement le long de l'axe 1 où les fenêtres moins fragmentées et dominées par les sols sous forêt à régénération naturelle sont opposées aux fenêtres où les

sols sont exploités d'une manière plus intensive. Cela montre qu'au-delà de l'hétérogénéité des sols et des couvertures végétales présents au sein de chaque fenêtre, le GISQ est sensible à l'intensification dans l'utilisation du sol sans estomper pour autant l'information des différences présentes au niveau de chaque point de la grille. Les sols des fenêtres 1 et 2 à dominante forestière obtiennent des valeurs plus importantes du sous-indicateur physique alors qu'à l'opposé les sols sous culture intensive sont caractérisés par les valeurs les plus élevées des sous-indicateurs chimique et de matière organique.

En Normandie, les fenêtres forestières 1 et 2 se distinguent également des fenêtres 3, 4, 5 et 6 (figure 8). La fenêtre 5 (prairies) présente des valeurs plus élevées du sous-indicateur matière organique. La fenêtre 6 (grande culture) est également caractérisée par des fortes valeurs du sous-indicateur chimique et les forêts ont des valeurs du sous-indicateur physique plus importantes.

L'effet de la composition et de la structure du paysage sur la qualité du sol est vérifié par l'existence de coinerties significatives entre les métriques qui décrivent le paysage et les valeurs de l'IGQS en chaque point, avec des coefficients de covariance (RV) de respectivement 0.29 et 0.32 dans le Morvan et

Tableau 3: Liste des sites en France utilisés pour le calcul de l'IBQS.**Table 3 :** List of french sites used to the computation of the IBQS.

Code Site	Description	Région
P1	Prairie permanente avec pâturage extensif	Auvergne
P2	Prairie permanente avec pâturage extensif	Auvergne
P5	Prairie pâturée	Morvan
P6	Prairie pâturée	Centre
MP	Prairie permanente	Morvan
NP	Prairie permanente	Normandie
F1	Forêt de feuillus	Auvergne
F2	Forêt de feuillus	Ile-de-France
F3	Forêt de feuillus	Morvan
F4	Forêt de résineux	Morvan
F5	Forêt de feuillus	Centre
NR	Forêt de résineux	Normandie
MF	Forêt de feuillus	Morvan
MR	Forêt de résineux	Morvan
NF	Forêt de feuillus	Normandie
NC	Culture annuelle	Normandie
MC	Culture annuelle	Morvan
C1	Culture annuelle apport de compost de déchets verts et azote minéral	Ile-de-France
C2	Culture annuelle apport de compost de déchets verts	Ile-de-France
C3	Culture annuelle avec apport de fumier de bovins et azote minéral	Ile-de-France
C4	Culture annuelle avec apport de fumier de bovins	Ile-de-France
C5	Culture annuelle avec apport de compost de la fraction fermentiscible des ordures ménagères et azote minéral	Ile-de-France
C6	Culture annuelle avec apport de compost de la fraction fermentiscible des ordures ménagères	Ile-de-France
C7	Culture annuelle avec apport de compost d'ordures ménagères grises et azote minéral	Ile-de-France
C8	Culture annuelle avec apport de compost d'ordures ménagères grises	Ile-de-France
C9	Culture annuelle conventionnelle avec apport d'azote minéral	Ile-de-France
C10	Culture annuelle conventionnelle	Ile-de-France
C11	Culture annuelle	Morvan
C12	Culture conventionnelle	Centre
C13	Culture semis direct	Centre

en Normandie ($p < 0,01$) (F. Dubs *et al.*, données non publiées).

L'IBQS

L'Indice Biologique de la Qualité du Sol (IBQS) a été calculé séparément pour chaque région, sur un jeu de données totales qui regroupe non seulement les données récoltées dans le cadre de ce projet mais aussi les données recueillies jusqu'à ce jour en France sur les peuplements de macro-invertébrés du sol. Les données récoltées dans le cadre de ce projet ont ainsi permis d'ajouter 37 espèces et 8 sites à la base de données déjà existante. Le référentiel est aujourd'hui composé de 30 sites différents et des 189 taxons les plus abondants (abondance supérieure à 5 individus).

Une analyse complémentaire montre la conséquence de l'utilisation de niveaux taxonomiques plus grossiers que l'espèce sur la sensibilité de l'outil.

Mesure de l'IBQS dans les sites du Morvan et de la Normandie

L'analyse des covariations entre les peuplements de macro-invertébrés du sol et les paramètres physiques, chimiques, morphologiques et la matière organique du sol montre des coefficients de covariation RV exceptionnels de, respectivement, 0.83 pour les sites de Normandie et 0.84 pour le Morvan. Ces relations sont significatives au seuil $p < 0,001$.

L'IBQS Total

Les données recueillies grâce à ce projet de recherche ont été ajoutées à celles collectées jusqu'à ce jour en France afin d'enrichir la base de données existante et pouvoir recalculer l'IBQS avec un plus grand nombre d'observations.

Le jeu de données faunistiques est composé de 189 taxons identifiés pour la plupart au niveau de l'espèce et 30 situations différentes localisées dans cinq régions en France (Auvergne, Ile-de-France, Bourgogne, Centre et Normandie; *tableau 3*).

Les 30 sites ont été groupés en fonction de leur similitude vis-à-vis des valeurs de 10 paramètres chimiques (C et N total, pH, phosphore biodisponible, cations échangeables, CEC et C/N). Certaines mesures qui n'ont pas été effectuées dans tous les sites n'ont pas été prises en compte pour l'établissement de la typologie.

Ces paramètres classent les sites en trois groupes principaux: 1) un groupe qui rassemble la plupart des sols cultivés exceptés ceux du Morvan et de Normandie qui se positionnent chacun dans un groupe différent et composé d'un mélange de forêts et prairies soumises à différents pratiques de gestion (figure 9), 2) un groupe qui réunit les forêts de feuillus du Morvan et de Normandie et celle de la région d'Auvergne avec la forêt de résineux du Morvan et la culture annuelle et la prairie permanente de Normandie et 3) un troisième groupe qui réunit le restant des forêts et des prairies avec les sols sous culture annuelle du Morvan.

27 taxons indicateurs d'une valeur indicatrice supérieure à 40 ont été identifiés pour les différents groupements de sites. La plupart des cultures annuelles sont caractérisées par un assemblage d'espèces composé de petits coléoptères des familles Carabidae et Staphylinidae, de plusieurs espèces d'araignées des familles Linyphiidae et Theridiidae ainsi que par le diplopode *Polydesmus testaceus*.

Les deux autres groupes de sols sont bien différenciés dans la typologie malgré le fait que tous les deux possèdent des forêts, des prairies et des cultures. Le cortège d'espèces qui y sont associées est aussi très différent. Un des deux groupes réunit la quasi-totalité des sols de prairie. Il est caractérisé par des espèces de coléoptères des familles Staphylinidae et Carabidae, de chilopodes prédateurs, les espèces de fourmi *Myrmica ruginodis* et *Lasius flavus*, des araignées, de décomposeurs représentés par *Polydesmus angustus* et l'escargot *Discus rotundatus*. Les taxons indicateurs associés au dernier groupe de sites sont la limace *Arion distinctus*, les diplopodes de la famille Polydesmidae, le vers de terre endogé *Aporrectodea caliginosa*, des hétéroptères de la famille Anthocoridae et les staphylins du genre *Stenus* sp.

Les notes obtenues après le calcul de l'IBQS à partir de cette nouvelle liste de taxons indicateurs (figure 9) présentent une certaine hétérogénéité au sein des différents groupes de sites. Les paramètres chimiques ne suffisent pas à eux seuls à expliquer la présence d'un certain nombre de taxons indicateurs. Comme le montrent les résultats d'analyse du GISQ, la caractérisation complète de l'état du sol est nécessaire.

DISCUSSION

L'évaluation de la qualité des sols est une tâche nécessaire pour mesurer l'impact de son usage sur ses fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'il rend. Il existe un consensus quasi général pour récuser l'usage de très longues listes d'indicateurs non reliés, dont la mesure est coûteuse et l'interprétation difficile. La tendance actuelle est donc à l'identification de jeux de données minimaux qui rendent compte de l'essentiel des variations.

Ces ensemble de données sont ensuite convertis en indices qui condensent l'énorme complexité du sol (Andrews *et al.*, 2002; Sena *et al.*, 2002; Seybold *et al.*, 2004; Schjonning *et al.*, 2004).

Au-delà de ce consensus, les avis divergent sur la manière de choisir les éléments de ce « minimum data set » et sur la façon éventuelle de les combiner dans des indices synthétiques.

L'approche du BISQ hollandais (Schouten *et al.*, 1997), par exemple, consiste à faire des représentations visuelles des variables avec des diagrammes en étoiles. Les limites du graphe sont représentées par les valeurs optimales. Dans ce cas, un sol de référence de « bonne » qualité est choisi.

La bonne ou la mauvaise qualité des sols est en grande partie subjective et nécessite de ce fait d'être définie à chaque fois. On voit ainsi dans notre travail que les valeurs de l'IBQS basé sur les peuplements de macro invertébrés sont systématiquement maximales dans les forêts non perturbées où se trouve la plus grande biodiversité. Le GISQ confirme cette tendance à travers l'indicateur général qui a la plus forte valeur moyenne en milieu forestier. Cette valeur globale cache cependant des valeurs plutôt médiocres de la qualité chimique (0,17 à 0,26; cf. tableau 2), des valeurs assez variables de l'agrégation (indice morphologique) de 0,12 à 0,82 et des valeurs de MO assez moyennes (0,23 à 0,55). A l'inverse, des sols soumis à des pratiques même relativement intensives peuvent avoir de très bonnes valeurs de certains indices de qualité (par exemple indice de micromorphologie pour les sols labourés; cf. tableau 2). Il y a donc bien des sols avec divers types de qualités. Ces différences de qualité proviennent en grande partie des types d'utilisation, mais aussi de la configuration du paysage et du niveau d'intensification de l'usage des terres. Il est particulièrement remarquable d'observer une covariation significative entre les métriques qui décrivent la structure et la composition du paysage et les valeurs des indicateurs de qualité du sol.

L'indicateur IBQS représente probablement l'étape suivante de la démarche, celle qui consiste à trouver des indicateurs biologiques des états du sol. Le travail effectué montre à quel point le peuplement du sol est le reflet fidèle de cet environnement, avec une valeur de coefficient de covariation supérieure à 0,80, exceptionnelle dans les études écologiques. Il reste à le développer encore plus, peut-être en sélectionnant les invertébrés parmi les groupes les plus facilement identifiables et en vérifiant quel niveau taxonomique est le plus pertinent. Le travail d'identification est en effet bien plus facile à mesure qu'on choisit des unités plus larges.

Finalement, après avoir montré dans diverses études que ces deux indicateurs permettent de rendre compte fidèlement de l'état physique, chimique et biologique des sols, il reste à analyser leur sensibilité et à optimiser leur conception mathématique par des simulations qui analysent l'impact de diverses décisions d'expert lors de leur élaboration (GISQ et IBQS) ou de l'intensité de l'échantillonnage requis (IBQS).

CONCLUSION GÉNÉRALE

- Le travail effectué a montré que les indicateurs IBQS et GISQ sont opérationnels. Ils ont pu être mesurés dans tous les sites d'étude permettant d'obtenir des résultats globalement en accord avec ce qui était attendu d'après l'historique et la caractérisation des sites.
- Il est aussi apparu que la précision des indicateurs augmente avec l'importance du référentiel utilisé pour les calculer. L'IBQS français basé sur le plus large référentiel donne en effet des valeurs plus logiques que l'IBQS régional mis au point pour le Morvan. Les valeurs obtenues après la mise au point d'un IBQS régional pour le Morvan montrent le besoin de s'appuyer sur une base de données large permettant de minimiser les particularités locales.
- Les valeurs les plus élevées ne sont pas toujours obtenues en milieu « naturel ». On voit que l'agriculture pratiquée dans certaines conditions peut maintenir à un niveau élevé des paramètres décisifs de la qualité du sol y compris la biodiversité.
- L'utilisation des indicateurs permet de réduire considérablement le nombre de variables à mesurer (une quarantaine de taxons indicateurs sur 150 possibles pour l'IBQS et une douzaine de variables du sol pour le GISQ sur les 40 initiales).
- La composition et la structure du paysage peuvent exercer une forte influence sur la qualité du sol. Il serait intéressant de calculer un sous-indicateur « paysager » pour en tenir compte dans le calcul du GISQ.
- Ce projet a permis de montrer que l'IBQS et le GISQ sont très probablement en relation et notamment en ce qui concerne les valeurs des sous-indicateurs et de l'IBQS. Il serait très intéressant d'augmenter le nombre d'observations communes à ces deux indices afin d'étudier la nature de ce lien et de fixer le degré auquel l'IBQS peut prédire l'état des compartiments physiques, chimiques, morphologiques ou de matière organique dans le sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson J.M. et Ingram J.S.I., 1993 - Tropical Soil Biology and Fertility. A handbook of methods. 2nd edition. CAB International.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., 2004 - The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal* 68 (6): 1945-1962.
- Cecillon, L., Cassagne, N., Czarnes, S., Gros, R., Vennetier, M., Brun, J.J., 2009 - Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science of the Total Environment*, sous presse
- Decaens, T., 2009 - Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and Biogeography*. In press
- Dufrène, M., Legendre, P., 1997 - Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 3, pp. 345-366.
- Lavelle P., 1988 - Earthworm activities and the soil system. *Biol Fertil Soils*, 6: 237-251
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie F., Mora P. et Rossi J.P., 2006 - Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42: 3-15.
- Lavelle P., Velasquez E. & Andrade M., 2009 - Indicating soil quality and the GIS: Reply to the comments by Rossi et al. *Soil Biol. Biochem.*, 41: 446-447.
- Liu L., 2007 - Mise au point et calibration d'indicateurs de la qualité de sols agricoles du Sud de la Chine. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, Bondy 194 p.
- Ruiz-Camacho N., 2004 - Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, 14 septembre 2004, Bondy: 327 p.
- MEA, 2005 - MEAweb.org
- Ruiz Camacho, N., Decaëns, T., Dubs, F., Lavelle, P. et Velasquez, E., 2008 - Développement de bio-indicateurs permettant de caractériser l'état du sol et son état biologique. Rapport scientifique final du programme ADEME Bioindicateurs. 103 p.
- Schjonning P., Elmholt S., Christensen B.T., 2004 - Soil quality management. Concepts and terms. In: Schjonning P., Elmholt S. and Christensen B.T. (eds.). *Challenges in modern agriculture*. CAB International. pp. 1-15.
- Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H., Burger, J.A., 2000 - A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. 138 (1/3): 335-356.
- Schouten, A.J., Brussaard, L., De Ruyter, P.C., Siepel, H., Van Straalen, N.M., 1997 - An indicator system for life support functions of the soil related to biodiversity. Report 712910005, RIVM, Bilthoven.
- Sena, M.M., Frighetto, R.T.S Valarini, O.J. Tokeshi H. and Poppi, R.J., 2002 - Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study, *Soil Till. Res.*, 67: 171-181.
- Seybold CA, Grossman RB, Hoper H, Muckel G, Karlen DL, 2004 - Soil quality morphological index measured in the 1996 NRI Pilot Study. *Soil Survey Horizon*, 43(3): 86-95.
- Topoliantz S., Ponge J.F. et Viaux P., 2000 - Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant And Soil*, 225: 39-51.
- Velasquez E., 2004 - Bioindicadores de calidad del suelo basados en comunidades de macrofauna y su relación con variables físicas y químicas del suelo. Thèse de Doctorat de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Spécialité Agronomie, 250 p.
- Velasquez E., Lavelle P. et Andrade M., 2007 - GISQ: a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biol. Biochem.*, 39: 3066-3080.
- Velasquez E., Pelosi C., Brunet D., Grimaldi M., Martins M., Rendeiro A.C., Barrios E. et Lavelle P., 2006 - This ped is my ped: visual separation and NIRS spectra allow determination of the origins of soil macro-aggregates. *Pedobiologia*, 51 (1): 75-87.
- Zhu X., Chen Y.Y. et Li D.L., 2008 - An Integrated Indicator-based System for Soil Environmental Quality Assessment in Sustainable Rehabilitation of Mine Waste Area. *Applied and Computational Mathematics*, 2nd Edition, 303-308.