

## PROGRAMME GESSOL

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

# BIOINDICATEURS SYNTHETIQUES DE LA QUALITE DES SOLS BASES SUR LA MACROFAUNE

Rapport de la première phase du projet : Etude de faisabilité

Octobre 2002

Patrick LAVELLE, Nuria RUIZ-CAMACHO, Johanne NAHMANI,  
Jocelyne ROMAN et Jean-Pierre ROSSI

UMR 137 BIOSOL IRD-Universités de Paris VI, VII et XII  
Centre IRD, Bondy, France

## RESUME

Des bioindicateurs synthétiques de la qualité des sols basés sur l'étude des peuplements de macroinvertébrés ont été mis au point suivant une procédure en quatre étapes :

1. L'échantillonnage de la macrofaune suivant une méthode de terrain standardisée sur un gradient de pollution métallique et d'intensification agricole dans la région de Mortagne du Nord (Nord de la France) (14 sites), et un ensemble de sites cultivés de la Beauce ayant reçu divers traitements organiques (site INRA de Grignon)(11 traitements répliqués trois fois);
2. L'identification des invertébrés à l'échelle des grands groupes (33 familles, ordres ou groupes fonctionnels) et des espèces (ou morphoespèces) et la mise au point de clés d'identification simples.
3. La comparaison des peuplements et leur distribution en groupes significativement différents par analyse multivariée et/ou analyse hiérarchique ; la validation des partitions ainsi réalisées avec celle des paramètres du sol par des analyses de co-inertie ;
4. la recherche de taxons indicateurs (familles ou espèces) par l'indice Indval de Dufrene et Legendre (1996).

Deux études de cas ont permis de tester et d'affiner les diverses étapes de cette méthodologie dans des situations très différentes

Dans les sols de grande culture du dispositif INRA de Grignon groupant des sols soumis à divers types d'apports organiques et inorganiques, les analyses multivariées montrent une bonne réponse de la macrofaune aux conditions du sol. Les analyses de coïnertie montrent, en particulier une bonne relation avec les paramètres chimiques et physiques du sol. Dans ces sols, l'absence d'une coïnertie significative entre les variables issues des spectres NIRS (Near Infra Red Reflectance Spectrometry) et la macrofaune du sol indique probablement que la faune est plus sensible aux effets physiques de la matière organique (effets sur le régime hydrique, création d'abris en surface...) qu'à leurs effets trophiques. Parmi les 33 taxons (ordres et familles) testés par l'indice IndVal, une dizaine montrent une réaction significative à l'état du milieu et permettent de caractériser certains groupes comme les larves de Diptères sensibles à la fertilisation azotée ou les Coléoptères témoins de l'existence d'un effet litière. Parmi les divers amendements organiques testés, les ordures ménagères grises, riches en débris inorganiques (verre, plastique) et en métaux lourds, se sont avérées les plus favorables au développement d'une faune abondante et diversifiée en raison des abris (effet litière) et de la qualité de la matière organique fournis.

Dans les sols du Nord de la France, la faune s'est également montrée très sensible aux diverses perturbations, travail physique du sol, pollution métallique et type de végétation, ce que traduit une analyse de coïnertie significative. Le long d'un gradient de pollution, où les teneurs totales en zinc, plomb et cadmium varient de 77 à 35000, de 40 à 8270 et de 1 à 190 ppm, la richesse spécifique des macroorganismes du sol semble être plus fortement influencée par le travail mécanique des sols que par la pollution, avec une richesse spécifique minimale rencontrée dans les champs cultivés (21 espèces) et maximale dans les sites boisés (126 espèces). L'indice IndVal a permis d'isoler 21 morphoespèces parmi les 339 récoltées, considérées comme des indicateurs fiables de divers aspects de la qualité des sols. La plupart de ces espèces sont indicatrices des sites non pollués et leur absence indique donc une pollution; seules deux espèces de diplopodes et une espèce de gastéropode sont caractéristiques des peupleraies sur sols pollués. Aucune espèce n'est apparue comme indicatrice du site le plus pollué.

Nous proposons maintenant d'étendre cette méthodologie à un ensemble large de sols représentant les principales situations rencontrées sur le territoire français, pour proposer une liste précise de taxons indicateurs que l'on validera sur un échantillon indépendant. Une fois établie cette liste, on pourra envisager deux alternatives :

- la mise au point d'un système d'indication dichotomique comparable à l'indice de la Qualité Biologique des eaux ;
- le calcul d'indices synthétiques des diverses composantes de la qualité des sols (physique, trophique, toxicologique...) en combinant les densité des divers groupes d'invertébrés suivant leur contribution aux facteurs de qualité extraits par les analyses factorielles.

## INTRODUCTION

Le maintien de la qualité du sol joue est un élément essentiel de toute pratique de gestion durable des écosystèmes. Le sol rend un ensemble de services écosystémiques qui sont de plus en plus menacés par des pratiques agricoles non durables, les pollutions d'origine anthropique et les changements globaux (Daily et al., 1997). En réponse à la dégradation du milieu, des politiques environnementales sont mises en œuvre à différentes échelles, locales, nationales et européennes. L'évaluation de la qualité du sol est fondamentale pour évaluer l'effet de ces politiques, contrôler ces pollutions et progresser dans la durabilité des méthodes de gestion.

Cette évaluation nécessite des indicateurs qui reflètent, si possible à partir d'une mesure unique, les principales conditions de vie existantes dans ce milieu: son état physique (porosité, agrégation et leurs conséquences sur les propriétés hydrauliques), l'état des réserves organiques et leur disponibilité, l'acidité et la présence de composés toxiques, par exemple des métaux lourds.

Les indicateurs proposés dans la littérature sont nombreux, mais très hétérogènes et souvent peu utilisables car ils rarement fait l'objet d'une calibration et d'une validation. Ces indicateurs décrivent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol.

Parmi les indicateurs physiques de la qualité du sol, les paramètres les plus souvent proposés sont par exemple la stabilité des agrégats, l'infiltration, la densité apparente, la profondeur maximale d'enracinement, la texture du sol et sa structure ainsi que la capacité de rétention d'eau, etc... (Karlen et Scott, 1994 ; Smith et al., 1994 ).

Parmi les indicateurs chimiques et physico-chimiques figurent la capacité d'échange cationique, la teneur en matière organique, le pH, la salinité, la conductivité électrique et la toxicité des métaux lourds et autres polluants organiques, les nitrates ou la radioactivité (Doran et Parkin, 1994). Des paramètres biologiques de la qualité du sol comme l'activité enzymatique (Dick, 1994), la biomasse microbienne, la respiration du sol ainsi que l'azote potentiellement minéralisable font partie des mesures réalisées aussi habituellement pour l'évaluation de la qualité du sol.

La mesure de ces paramètres, bien que pertinente et nécessaire, pose certains problèmes dans l'évaluation rapide de la qualité du sol et sa gestion. Les mesures instantanées n'ont souvent qu'une signification limitée dans le temps et dans l'espace et peinent à indiquer

des changements à long terme ou des pollutions ponctuelles. En outre ces analyses réalisées au laboratoire sont le plus souvent très chères et le temps nécessaire pour obtenir les résultats peut être long.

Les organismes du sol qui vivent en contact permanent avec le sol, sa matière organique et la solution qui remplit sa porosité, donnent une mesure plus fiable et pertinente des risques écologiques car ils intègrent l'ensemble des conditions physiques et chimiques du sol et la bio-disponibilité des polluants (Garrigues, 1994 ; Lavelle et Spain, 2001).

### Réponse des invertébrés aux conditions du sol

Beaucoup de travaux ont été dédiés à l'étude des peuplements d'invertébrés du sol comme indicateurs de son état (Paoletti, 1999). L'abondance et la composition des peuplements renseigne sur l'état actuel du sol et les variations qui se sont produites au cours du temps. En contact permanent avec le substrat, ils reflètent fidèlement les conditions de vie dans le sol à travers des variations dans les dynamiques de populations qui répondent à ces changements.

Le sol est un réservoir considérable, bien que largement méconnu, de biodiversité. Lors de la 7<sup>ème</sup> rencontre sur la biodiversité du sol et l'agriculture durable (12-16 Novembre 2001) du Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice (SBSTTA), la FAO a produit un rapport soulignant le rôle critique joué par les organismes du sol dans le maintien de sa santé, le fonctionnement de l'écosystème et la production. Le besoin d'indicateurs de la qualité du sol basé sur ces organismes a été souligné.

On sait que des centaines d'espèces d'invertébrés recensées sur un hectare de forêt de hêtres par Schaefer & Schauerman (1990), bien peu persistent quand le sol est soumis à une monoculture conventionnelle ou à une pollution métallique (Nahmani, 1998). Parmi ces invertébrés, les organismes ingénieurs (vers de terre et fourmis principalement sous nos latitudes) qui régulent la plupart des grands processus du sol, sont généralement décimés, voire éliminés. Il est certain que leur éradication de nombre de sols agricoles explique, au moins pour partie, la dégradation de ces milieux et le caractère non-durable des pratiques agricoles (Lavelle, 2000).

De nombreux efforts ont été réalisés durant les deux dernières décennies pour identifier des organismes indicateurs de la qualité du sol (Beylich, et al., 1995; Bouché, 1996; Linden, et al., 1994; Lawton *et al.*, 1998; Morgan and Morgan, 1988; Paoletti, 1999). Une synthèse récente montre que chaque groupe de macroinvertébrés du sol considéré de façon

individuelle est très sensible aux modifications de l'environnement (Paoletti ed, 1999). Ainsi les larves de Diptères se révèlent très sensibles aux pratiques agricoles (labour, application de pesticides, activités de drainage, etc...) ou aux métaux lourds ( Frouz, 1999). Les coléoptères de la famille Carabidae présentent aussi une intéressante capacité de réaction aux différents modes de gestion du sol, mais différente de celle des Diptères (Kromp, 1999). L'utilisation de produits chimiques en agriculture et les pratiques culturales sont très bien reflétées par les communautés d'araignées (Marc, Canard and Ysnel, 1999). Les coléoptères de la famille Staphylinidae peuvent être utilisés comme indicateurs dans les paysages semi-naturels et cultivés (Bohac, 1999). Les fourmis sont aussi de bons indicateurs du fonctionnement du sol dans les environnements ruraux (Lobry de Bruyn, 1999). Les vers de terre très sensibles à la dégradation physique des sols et à l'humidité, sont de bons indicateurs de la durabilité de différents types de pratiques agricoles, de pollutions et de la structure d'un paysage et sa transformation (Paoletti, 1999). Finalement, les isopodes ont la capacité de réagir à l'application de pesticides et aux régimes de culture conventionnelle et organique (Paoletti and Hassall, 1999).

Ces travaux montrent que chaque groupe a un pouvoir indicateur original. Cependant les approches basées sur un seul groupe taxonomique abordé à l'échelle des espèces restent difficiles par la lourdeur des méthodes employées et le savoir souvent très spécialisé qu'elles requièrent. De plus, le pouvoir indicateur de ces groupes se mesure par la reconnaissance d'espèces indicatrices, dont la valeur est forcément limitée à leur aire de répartition et varie avec le type de perturbation que l'on cherche à mettre en évidence.

A l'exception de l'indice de maturité des Nématodes (Bongers, 1990), il n'existe actuellement aucun indice mesurable qui transforme l'information transmise par les analyses des divers peuplements d'invertébrés en une prédiction précise de la qualité du sol.

#### La macrofaune comme indicateur de la qualité du sol

Pour profiter de l'ensemble du pouvoir indicateur de tous les groupes d'invertébrés, nous proposons de substituer aux approches centrées sur un seul groupe une analyse de l'ensemble des populations de macroinvertébrés du sol. La macrofaune du sol considérée dans son ensemble constitue un indicateur potentiel intéressant puisque ces macroinvertébrés comprennent un important nombre d'unités taxonomiques qui présentent des réponses très variées aux conditions de vie dans le sol et aux différents types de perturbations du fait de la diversité de modes de respiration (cutanée ou aérienne), des habitats (litière, sol) et des

régimes alimentaires (carnivores, phytophages, xylophages, etc...). Ils sont relativement faciles à récolter puisqu'ils sont visibles à l'œil nu en utilisant une méthodologie de terrain standardisée. Ils sont, en outre, facilement identifiables à des niveaux intermédiaires de détermination : 10 à 20 ordres, 30 à 60 familles, ... et le nombre d'espèces que l'on peut trouver dans un site donné est limité à environ 200 espèces.

Cette approche initiée dans le programme TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) au milieu des années 80, a été ensuite développée dans les premières phases du programme de l'observatoire de la Qualité des Sols avec le soutien de l'ADEME, puis dans le programme PNETOX du Ministère de l'Environnement. Dans le projet international IBOY/Diversitas (International Biodiversity Observation Year) avec le projet « Soil Macrofauna : an endangered resource » nous avons collecté des données de macrofaune du sol dans un millier de sites distribués dans une quarantaine de pays ; le traitement de ces données permettra d'établir un état de la faune dans les sols du monde, en fonction des grandes zones géographiques et des modes d'utilisation.

#### Approche mise en œuvre

Dans ce projet nous avons développé une méthode détaillée pour identifier dans l'ensemble des peuplements échantillonnés, des taxons indicateurs de certaines perturbations dans les sols. Cette approche comprend 5 étapes :

1. La mise au point d'une méthode d'échantillonnage standardisée de la macrofaune ;
2. L'identification des invertébrés à l'échelle des grands groupes (33 familles, ordres ou groupes fonctionnels) et des espèces (ou morphoespèces) et la conception de clés d'identification simples.
3. La comparaison des peuplements des divers sites échantillonnés, leur regroupement en groupes significativement différents par analyse multivariée et/ou analyse hiérarchique ;
4. la comparaison des partitions ainsi réalisées avec celle des paramètres du sol par des analyses de co-inertie pour vérifier globalement leur pouvoir indicateur;
5. la recherche de taxons indicateurs (familles ou espèces) par l'indice Indval de Dufréne et Legendre (1996). Plus ces niveaux taxonomiques seront larges (familles, ordres, groupes fonctionnels) plus la détermination de ces groupes sera facilitée.

Le présent projet a permis de conduire cette démarche à son terme dans deux situations de terrain contrastées, et particulièrement de développer les méthodologies permettant de franchir les étapes 4 et 5.

Une clé simple pour l'identification de 17 principales unités taxonomiques a été réalisée ainsi que trois autres clés permettant de séparer jusqu'au niveau de la morphospèce quatre des 17 unités taxonomiques principales : les araignées, les larves d'insecte (coléoptères et diptères) et les coléoptères adultes de la famille Carabidae.

## LES SITES D'ETUDE

Le travail a été réalisé sur deux sites représentatifs de problématiques différentes auxquelles la faune est capable de répondre :

### \*Région Nord-Pas-de-Calais : intensification agricole et métaux lourds

L'étude a été réalisée à Mortagne du Nord où une zinguerie a été en activité de 1901 jusqu'à 1962. La pollution provient de la déposition des résidus de l'usine. Dans cette zone située au confluent de deux rivières (Scarpe et Escaut), un échantillonnage a été réalisé dans cinq sites : deux prairies à pelouse métalphyte et trois peupleraies. Aux alentours du site industriel dans la directions des vents dominants, neuf sites supplémentaires, présentant des degrés de pollution décroissants avec la distance, ont été sélectionnés : trois prairies, deux champs cultivés, deux plantations de peuplier et deux forêts.

L'ensemble des ces sites est caractérisé par l'existence d'un gradient de pollution ainsi que d'intensification dans l'utilisation du sol.

### \*Beauce : impact des apports organiques dans les sols soumis à une agriculture intensive

Dans un contexte de grandes cultures, l'effet de la gestion des intrants organiques : fumier, compost d'ordures ménagères grises, compost de la fraction fermentescible des ordures ménagères, compost de déchets verts co-compostés avec des boues d'épuration et des parcelles ne recevant aucun apport organique est étudié. L'effet de l'apport croisé avec de

l'azote minéral par des traitements avec ou sans apport d'azote est étudié. Une forêt voisine sert de référence au système naturel.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Méthode d'échantillonnage

#### a) **L'extraction de la faune du sol**

Les macroinvertébrés du sol ont été échantillonnés en utilisant une méthode manuelle mise au point par le programme international Tropical Soil Biology and Fertility/UNESCO (Lavelle, 1988 ; Anderson et Ingram, 1993) modifiée pour le prélèvement de la faune des sols des régions tempérées.

Les prélèvements sont réalisés sur une surface de 25×25 cm de côté et 15 cm de profondeur.

Un cadre métallique de 25×25 cm de côté délimite la surface sur laquelle la faune est extraite du sol en trois étapes :

- 1- Collecte de la litière dans des sacs hermétiques et tri manuel de la faune sur place.
- 2- Extraction de la faune « active » du sol après deux applications d'une solution formolée déversée à 10 minutes d'intervalle l'une de l'autre (dilution 0,2%). Cette opération a pour but d'extraire, pendant 10 min après chaque application, les invertébrés qui remontent à la surface du sol. Ils sont alors prélevés et conservés dans des piluliers remplis d'une solution de formol au 4%.

Récolte de la faune « passive » du sol grâce au tri manuel. Des blocs de sol de 25×25×15 cm sont prélevés à l'aide d'une bêche. Ils sont mis dans des sacs desquels l'on prend des petites poignées du sol qui sont émiettées et étalées dans un bac en plastique afin de repérer tous les animaux présents.

## **b) Le protocole d'échantillonnage**

Dans chaque parcelle d'étude de 5 à 10 prélèvements sont réalisés. Ces points de prélèvement sont disposés le long de deux transects et espacés d'un minimum de 7 m et d'un maximum de 20 m.

Chaque traitement considéré a été échantillonné dans trois parcelles disjointes pour permettre un traitement statistique correct des résultats.

### **2- Identification des invertébrés**

Les invertébrés sont identifiés au laboratoire à divers niveaux de précision taxonomique : 17 grands groupes taxonomiques établis par IBOY (International Biodiversity Observation Year), 33 unités taxonomiques intermédiaires (familles et grands groupes) et morphoespèces.

Le classement des macroinvertébrés dans ces trois niveaux taxonomiques a pour but d'étudier la réponse de la faune en fonction du niveau considéré afin de pouvoir identifier le niveau taxonomique le plus pertinente pour la création d'indices synthétiques.

Lors de ce classement, les individus appartenant à chacun des groupes sont comptés pour établir l'abondance et la diversité trouvés dans chaque site d'étude.

Dans le cadre de la rédaction d'un document technique visant à aider l'utilisateur lors de l'application et interprétation de l'indice, des clés simplifiées aidant à l'identification de différents niveaux taxonomiques sont en cours de réalisation.

Nous présentons en annexes une clé simple pour l'identification des 17 grands groupes « TSBF » et deux clés destinées à séparer les morphoespèces d'araignées, de larves de coléoptères, de larves de diptères. Ces clés sont en cours d'amélioration ; elles sont complétées par des clés existantes pour les vers de terre (Bouché, 1972) et divers groupes de Coléoptères adultes. Ce travail sera progressivement complété par la rédaction de clés sur les derniers groupes.

### 3- Caractérisation des sites

Dans tous les sites, le climat, la végétation, la topographie, l'usage de la terre et son histoire éventuelle ont été décrits par un ensemble de variables qualitatives et quantitatives standardisées.

Des fiches de terrain comprenant des variables qualitatives (pourcentage de couverture végétale et type, vitesse de pénétration du formol, texture du sol, présence de grosses racines, pourcentage de cailloux et le pourcentage de la pente) ont été remplies sur le terrain pour chaque point de prélèvement.

Des échantillons de sol ont été prélevés au même nombre que les points d'échantillonnage de la faune. Une fois au laboratoire, les sols ont été séchés à l'air, à l'abri de la pluie et de la poussière. Après leur séchage, ils ont été broyés et tamisés à 2 mm pour la plupart d'analyses réalisées : mesures de respirométrie, capacité de rétention en eau, pH, granulométrie, qualité de la MO (méthode NIRS), teneur en  $P_2O_5$ , CEC, humidité équivalente et teneur en métaux lourds et à 200  $\mu m$  pour la caractérisation de la matière organique (dosage du C et N).

Toutes ces données à caractère quantitatif et qualitatif décrivant chacun des sites d'étude ont été recueillies dans des tableaux indépendants reliés entre eux par la base de données MACROFAUNA.

### 4- Traitement des données

Le traitement des données constitue une étape critique dans cette étude. Pour le traitement des résultats obtenus, deux approches sont envisagées :

#### **1- Groupement des sites échantillonnés par l'analyse multivariée**

Dans un premier temps les données sont traitées en employant les analyses multivariées (ACP, AFC, analyses de Co-inertie, etc...) qui nous permettent d'extraire les principaux facteurs responsables de la distribution des taxons, les principaux groupes de réponse aux perturbations étudiées et de mettre en évidence la relation existant entre les

variables de faune et les paramètres physico-chimiques du sol. Les tests de permutation associés à ces analyses permettent de connaître de degré de signification statistique des groupements de sites obtenus avec ces analyses.

L'utilisation des coordonnées des points répartis sur l'ensemble de l'espace factoriel décrit par les axes permettra l'élaboration d'indices synthétiques des facteurs décrits par ces axes.

## **2- Recherche de taxons indicateurs des groupes**

La deuxième étape consiste à identifier des espèces indicatrices au sein des groupes de sites extraits à l'étape précédente. La méthode IndVal (Dufrêne & Legendre, 1997) qui combine l'abondance relative des espèces et la fréquence relative de leur apparition dans les groupes d'échantillons permet d'identifier les taxons caractéristiques de chaque groupe et de leur donner une valeur indicatrice. La signification statistique des valeurs indicatrices données aux espèces est évaluée en utilisant une procédure de randomisation.

La méthode développée représente la synthèse de ces deux méthodes de traitement de données.

## **RESULTATS**

### **1)- REPONSE DE LA MACROFAUNE DE SOLS CULTIVES DE LA BEAUCE A DIVERS APPORTS ORGANIQUES ET INORGANIQUES (Annexe 1)**

Dans la région de Grignon, un dispositif permet de tester la réponse des sols et de leur faune à divers types d'apports organiques en combinaison avec des apports azotés minéraux. Le dispositif expérimental comprend 4 types d'apports organiques : fumier de bovins (F), fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), déchets verts compostés avec des boues d'épuration (DVB), ordures ménagères grises (OMG) comportant une fraction importante de composés inertes (plastique et verre) et un témoin. Ces traitements reçoivent ou non des apports d'azote inorganique (N). Deux forêts voisines servent de milieu de référence pour les peuplements d'invertébrés.

La macrofaune a été échantillonnée dans trois parcelles représentant des répétitions de chaque traitement. La faune récoltée a été séparée en 33 unités représentant des familles à l'exception des Myriapodes (séparés en ordres) et des vers de terre (groupes fonctionnels). Sur les mêmes parcelles, on a mesuré 18 paramètres chimiques et physico-chimiques : le pH, les teneurs en matière organique, en cations et en P, la CEC, l'humidité équivalente et les concentrations en 7 métaux lourds (annexe 1, Tableau 1). La qualité de la matière organique des échantillons du sol entre 0 et 10 cm de profondeur a été analysée par réflectance spectrométrique dans le proche infrarouge (NIRS) dans tous les échantillons.

La faune est nettement moins abondante en moyenne dans les sites cultivés (288 ind.m<sup>-2</sup>) que dans les forêts voisines (1363 m<sup>-2</sup>) montrant un impact négatif global de la mise en culture (fig. 1 annexe 1). Dans les sites cultivés cependant, les apports organiques ont un effet positif sur la macrofaune. La plus grande abondance est observée dans le traitement avec les ordures ménagères grises (500 m<sup>-2</sup>), suivi de très près par le traitement fumier (480) et les traitement DVB (440), FFOM (250) et le témoin (180).

L'analyse factorielle des correspondances sépare clairement les divers traitements en fonction de la présence et de la nature des apports le long de l'axe 1 (37,46% de la variance expliquée)(fig. 2 annexe 1). Il classe les sites dans l'ordre forêt, ordures ménagères grises, déchets verts, fraction fermentescible des OM, fumier, témoin. Cet axe caractérise la présence d'un effet litière, maximal en forêt, sensible dans le traitement OMG où les inertes créent des habitats comparables à ceux de la litière forestière, et minimal dans les traitements à résidus organiques facilement décomposables, et dans les témoins. Le facteur 2 (13,5%) matérialise l'effet de l'apport d'azote inorganique.

Les analyses de coinertie réalisées montrent une forte corrélation entre les données du sol et la macrofaune ( $p=0,036$ ) montrant que la faune globalement répond aux variations observées dans le sol entre les traitements et constitue donc, a priori, un bon indicateur de son état( fig. 6, annexe 1). Il existe aussi une forte relation entre les paramètres du sol et ceux de la matière organique résumés par les spectres de la NIRS ( $p=0,006$ ). En revanche, la co-inertie entre macrofaune et NIRS est moins nette ( $p=0,14$ ).

Un test de permutation (« between test » du logiciel ADE-4) montre que le groupement des points en fonction des traitements proposés (groupement dit « a priori ») est significatif ( $p=0$ ). Toutefois, une analyse hiérarchique réalisée avec la méthode WARD (ADE-4) propose un arrangement globalement similaire, mais dans lequel certaines répétitions d'un traitement peuvent être rangées différemment.

La mesure des indices IndVal pour les taxons utilisés montre que les vers de terre anéciques sont dans ce cas indicateurs des milieux cultivés, les larves de Diptères indicatrices des apports azotés inorganiques en milieu cultivé, et qu'un cortège d'espèces de litière (Coléoptères, Myriapodes, Isopodes) caractérise le traitement ayant reçu des apports d'ordures ménagères grises. Cette observation et la position de ce traitement proche de la forêt sur l'axe 1 de l'AFC, montre que l'apport des ordures ménagères « grises » crée un effet litière en procurant des habitats aux invertébrés et des résidus organiques à décomposition lente.

La hiérarchie proposée par la méthode WARD est plus complexe car elle prend en compte les variations locales. Elle permet aussi d'identifier un plus grand nombre de taxons indicateurs aux différents niveaux. Les vers de terre endogés sont ici indicateurs des milieux sans litière, tandis que la présence d'un effet litière est signalée par la présence des Enchytreides, des Coleoptères et des larves de Diptères. De nombreux taxons se montrent sensibles au labour et à l'absence d'une couverture végétale. Ils seront donc de bons indicateurs de l'effet de pratiques alternatives qui cherchent à limiter le travail du sol et/ou à améliorer la couverture du sol.

## 2)- REPONSE DE LA MACROFAUNE DU SOL A UN GRADIENT DE POLLUTION METALLIQUE ET D'INTENSITE DE L'USAGE DANS LE NORD DE LA FRANCE (annexe 2)

Un ensemble de 14 sites représentant un gradient de pollution métallique a été échantillonné dans la région de Mortagne du Nord. Un gradient d'intensification de l'utilisation agricole (de la forêt naturelle, vers les plantations de peupliers, les prairies et les grandes cultures) se superpose à cette pollution (tableau 1, Annexe 2). La faune collectée dans le cadre d'un projet antérieur PNETOX 1 a été identifiée au niveau des espèces ou morphoespèces, permettant de

tester la méthodologie ébauchée à l'étape précédente au niveau des espèces. La démarche suivie a consisté à établir des groupes en se basant sur des unités taxonomiques larges, comme dans l'exemple précédent, puis à rechercher dans ces groupes des espèces indicatrices.

Parmi les 3465 individus collectés dans les 112 échantillons collectés dans les 14 sites, on a recensé 339 espèces (ou morphoespèces). Les vers de terre, les Coleoptères, les larves de Diptères, les Arachnides, les Isopodes et les fourmis constituent l'essentiel des individus récoltés (tableau 2, Annexe 2). La densité observée varie en fonction du type d'utilisation, décroissant depuis les milieux boisés (428 individus par m<sup>2</sup> dans les plantations de peupliers) et minimale dans les cultures (57). Dans les sols pollués, la densité reste élevée dans les plantations de peupliers (342 par m<sup>2</sup>), mais s'effondre dans la pelouse métallicole où le niveau de pollution est maximal (4 par m<sup>2</sup>).

Les résultats montrent une variation importante de la richesse spécifique qui apparait plus affectée par la mise en culture que par la pollution, la richesse variant de 21 dans les cultures, à 76-80 dans les prairies et 105-126 dans les sites boisés. Les sites modérément pollués tendent à avoir une richesse spécifique plus élevée. Ceci est du en partie à la diminution d'activité des vers de terre qui laissent en surface une accumulation de litière non décomposée qui fournit de riches habitats à la faune de litière.

Une procédure d'analyse hiérarchique combinant une analyse multivariée adaptée au traitement des données de faune exprimées en espèces (la PCOA, ADE-4) et la procédure K-Means a permis de regrouper les sites en six niveaux hiérarchiques et six groupes (fig. 1, annexe 2).

Le calcul de l'indice IndVal sur ces groupes met en évidence un certain nombre d'espèces indicatrices des divers groupes (fig. 3, annexe 2) :

- Les Myriapodes Geophilidae *Haplophilus subterraneus*, l'isopode *Oniscidae Philoscia muscorum* et les Enchytreidae sont indicateurs des milieux ayant un système litière alors que le ver endogé *Aporrectodea caliginosa* est indicateur des milieux ouverts. Parmi ceux-ci, les larves de Coléoptères Elateridae et Hoplinae indiquent les milieux non pollués
- Parmi les systèmes ayant une litière en surface, les Myriapodes Polydesmidae *Polydesmus denticulatus* et *Polydesmus complanatus* indiquent les sols pollués sous

peupliers, alors qu'un cortège d'espèces assez varié est indicateur de sol non pollué. et que parmi celles-ci, se trouvent des espèces indicatrices du milieu naturel et d'autres plus liées aux plantations arborées.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Les résultats des deux études de cas confirment l'observation faite à maintes reprises que la macrofaune du sol, prise dans son ensemble, répond de façon très fine à l'état de l'environnement. Les analyses de co-inertie entre les données de macrofaune et celles du sol, significatives dans les deux études, appuient cette affirmation.
- Les analyses multivariées permettent de séparer de façon significative des ensembles de sites sur la base de leurs peuplements. Suivant les hypothèses de départ de ce travail, les axes de ces analyses sont assimilables à de grands facteurs tels l'effet du type d'apport organique sur la manifestation d'un effet litière dans les sols du dispositif de Grignon ou l'effet du travail physique ou la pollution métallique du sol dans la région de Mortagne du Nord.
- Il est possible de séparer des groupes de sites dans lesquels la faune répond de manière homogène. Cette classification peut se faire de façon empirique en testant des groupes définis a priori (ex. les traitements organiques du dispositif de Grignon, ou les catégories croisant couvert végétal et pollution à Mortagne) par le test de permutation, ou en utilisant les méthodes de classification hiérarchique telles que K-means ou WARD. Ces dernières classifications plus rigoureuses d'un point de vue strictement mathématique, sont aussi plus sensibles à la variabilité observée.
- L'indice IndVal permet d'identifier dans chaque groupe isolé, les divers niveaux d'une classification hiérarchique ou les groupes séparés empiriquement, les taxons spécifiques.
- Si l'identification de la macrofaune au niveau des espèces semble fournir un plus grand nombre de taxons indicateurs, il existe probablement un niveau optimal de résolution taxonomique, entre espèces et grands groupes, qui allie la précision de l'indication à la facilité d'identification.

## PERSPECTIVES

- La méthodologie dont la mise au point s'est achevée avec la première étape du projet doit être appliquée à un vaste ensemble de données pour identifier des indicateurs qui aient une valeur générale, à l'échelle de la France métropolitaine. On pourra dans le même effort, tester la robustesse de la méthodologie et affiner les divers outils taxonomiques et statistiques utilisés ;
- A partir d'un ensemble de points représentant les principales conditions pédologiques, climatiques et les modes d'utilisation dominants dans ces conditions, on recherchera des indicateurs des principaux paramètres de la qualité des sols : l'état physique et les propriétés et conditions hydrauliques associées, l'état des apports et des réserves organiques et leur disponibilité, la toxicité liée aux polluants industriels ou agricoles.

Dans ce but, une collaboration a été établie avec Dominique Arrouays Directeur de l'unité INFOSOL de l'INRA d'Orléans chargé de coordonner le réseaux de surveillance de la qualité des sols.

Un total de 50 sites choisis parmi ceux faisant partie de ce réseau seront échantillonnés avec la méthode TSBF pour réaliser l'estimation des peuplements de macroinvertébrés du sol. Ces sites sont déjà caractérisés par l'ensemble de paramètres physico-chimiques et biologiques listés ci-dessous :

- Granulométrie (NF X 31-107)
- Carbone et azote total (NF ISO 10694 et 13878)
- CEC (cobaltihexamine)
- Cations échangeables (cobaltihexamine)
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Olsen)
- pH (NF ISO 10390)
- Bore (NF X 31-122)
- Eléments majeurs totaux
- Eléments Traces Métalliques totaux (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Tl, Zn, NF X 31-151)
- Eléments Traces Métalliques EDTA en milieu non tamponné
- Calcaire total (si pH>6,5; NF ISO 10693)
- Aluminium échangeable (si pH<6,5)

On y ajoutera les paramètres physiques et biologiques suivants qui traduisent d'autres aspects importants de la qualité du sol

- Capacité de rétention en eau
- Porosité
- Biomasse et activité microbienne (dégagement de CO<sub>2</sub>)
- Caractérisation de la qualité de la matière organique par la NIRS

*Références bibliographiques (caractères en gras : contribution des chercheurs du LEST)*

- Anderson, J. M. (1993). Soil organisms as engineers: microsite modulation of macroscale processes. Linking Species and Ecosystems. C. G. Jones and J. H. Lawton. New York, Chapman & Hall: 94-106.
- Beylich, H. C. Fründ and U. Graefe (1995). Environmental monitoring of ecosystems and bioindication by means of decomposer communities. *Newsletter on Enchytraeidae* 4: 25-34.
- Blandin, P. (1986). "Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques." Bulletin d'Ecologie T.17(Fasc. 4): 215-307.
- Bogomolov, S. K. Chen, R. W. Parmelee, S. Subler and C. A. Edwards (1996). An ecosystem approach to soil toxicity testing : a study of copper contamination in laboratory soil microcosms. *Applied Soil Ecology* 4: 95 - 105.
- Bongers, T. (1990). "The maturity index : an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition." Oecologia 83: 14-19.
- Bouché (1996). L'évaluation écotoxicologique : logique, concepts méthode et dysfonctionnements. *Commande ADEME n° 9693016. Gestion CNRS. CDP 951106.: 1 - 58.*
- Brown, G. G.** (1995). "How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity ?" Plant and Soil 170: 209 - 231.
- Cairns, M. A. and R. A. Meganck (1994). "Carbon sequestration, biological diversity, and sustainable development - integrated forest management." Environ Manage Environmental Management 18(1): 13-22.
- Chauvel, A., M. Grimaldi,** et al. (1999). "Pasture degradation by an Amazonian earthworm." Nature 389: 32-33.
- Cook, R. J. (1996). "Sustainable agriculture: Introduction and summary." Can J Plant Pathol 18(2): 115-118.
- Daily, G. C., S. Alexander, et al. (1997). "Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems." Issues en Ecology 2: 18.

**Decaëns, T., T. Dutoit, et al.** (1998). "Factors influencing soil macrofaunal communities in post-pastoral successions of western France." Applied Soil Ecology **28**: 1-7.

**Decaëns, T., P. Lavelle, et al.** (1994). "Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia." Eur. J. Soil Biol. **30**(4): 157-168.  
microsite modulation of macroscale processes. Linking Species and Ecosystems. C. G. Jones and J. H. Lawton. New York, Chapman & Hall: 94-106.

Beylich, H. C. Fründ and U. Graefe (1995). Environmental monitoring of ecosystems and bioindication by means of decomposer communities. Newsletter on Enchytraeidae **4**: 25-34.

Blandin, P. (1986). "Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques." Bulletin d'Ecologie **T.17**(Fasc. 4): 215-307.

Bohac, J. (1999). Staphylinid beetles as bioindicators. Agriculture, Ecosystems and Environment, **74**: 357-372.

Bogomolov, S. K. Chen, R. W. Parmelee, S. Subler and C. A. Edwards (1996). An ecosystem approach to soil toxicity testing : a study of copper contamination in laboratory soil microcosms. Applied Soil Ecology **4**: 95 - 105.

Bongers, T. (1990). "The maturity index : an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition." Oecologia **83**: 14-19.

Bouché (1996). L'évaluation écotoxicologique : logique, concepts méthode et dysfonctionnements. Commande ADEME n° 9693016. Gestion CNRS. CDP 951106.: 1 - 58.

**Brown, G. G.** (1995). "How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity ?" Plant and Soil **170**: 209 - 231.

Cairns, M. A. and R. A. Meganck (1994). "Carbon sequestration, biological diversity, and sustainable development - integrated forest management." Environ Manage Environmental Management **18**(1): 13-22.

**Chauvel, A., M. Grimaldi, et al.** (1999). "Pasture degradation by an Amazonian earthworm." Nature **389**: 32-33.

Cook, R. J. (1996). "Sustainable agriculture: Introduction and summary." Can J Plant Pathol **18**(2): 115-118.

Daily, G. C., S. Alexander, et al. (1997). "Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems." Issues in Ecology **2**: 18.

Decaëns, T., T. Dutoit, et al. (1998). "Factors influencing soil macrofaunal communities in post-pastoral successions of western France." Applied Soil Ecology **28**: 1-7.

Decaëns, T., P. Lavelle, et al. (1994). "Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia." Eur. J. Soil Biol. **30**(4): 157-168.

Dufrêne, M. and Légendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species : the need for a flexible asymmetrical approach. Ecological Monographs, **67**(3): 345-366.

Frouz, J. (1999). Use of soil dwelling Diptera (Insecta, Diptera) as bioindicators: a review of ecological requirements and response to disturbance. Agriculture, Ecosystems and Environment **74**: 167-186.

Giller K E, Beare M H, Lavelle, P. et al. (1997). "Agricultural intensification, agroecosystem function." Applied Soil Ecology **6**(1): 3-17.

Houghton, J. T., G. J. Jenkins, et al. (1990). Climate change  
The IPCC Scientific Assessment. Cambridge, Cambridge University Press.

Hunsaker (1993). New concepts in environmental monitoring : the question of indicators. The Science of the Total Environment. Supplement: 77 - 95.

King, D., M. Jamagne, et al. (1999). "Inventaire cartographique et surveillance des sols en France." Etude et Gestion des Sols **6**(4): 215-229

Koehler (1996). Soil animals and bioindication. Bioindicator systems for soil pollution. D. A. K. Nico M. van STRAALLEN: 179 - 188.

Kremen (1992). Assembling the indicator properties of species assemblages for natural areas monitoring. Ecological Applications **2** (2): 203 - 217.

Kromp, B. (1999). Carabid beetles in sustainable agriculture : a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. Agriculture, Ecosystems and Environment, **74**: 187-228.

**Lavelle, P.** (1988). Paramètres biologiques à mesurer dans le cadre de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Etude prospective. Paris, Secrétariat d'Etat à l'Environnement: 33p.

**Lavelle, P.** (1988). "Assessing the abundance and role of invertebrate communities in tropical soils: aims and methods." J. Afr. Zool. **102**: 275-283.

**Lavelle, P., M. Dangerfield, et al.** (1994a). The relationship between soil Macrofauna and tropical soil fertility. Tropical Soil Biology and Fertility. M. J. Swift and P. Woomer. New York, John Wiley-Sayce: 137-169.

**Lavelle, P., D. Bignell, et al.** (1997). "Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers." European Journal of Soil Biology **33**(4): 159-193.

**Lavelle, P., J. P. Rossi, et al.** (1998). Propriétés biologiques des sols. Vers la mise au point de bioindicateurs de la qualité des sols basés sur la macrofaune., Ministère de l'Environnement/ADEME: 21p.

**Lavelle, P.** (2000). "Ecological challenges for Soil Science." Soil Science **165**(1): 73-86.

Lee K E and Foster R C (1991). "Soil fauna and soil structure." Aust. J. Soil Res. **29**: 745-775.

Lebrun and M. Pype (1991). Ecotoxicological study of pesticides on earthworms. Advances management and conservation of soil fauna. R. Ed Veeresh, Viraktamath., Oxford & IBH Publishing CO. PVT. LTD.

Lawton *et al.* (1998). Biodiversity inventories, indicator taxa and effects of habitat modification in tropical forest. *Nature*. 391.

Lobry de Bruyn, L. A. (1999). Ants as bioindicators of soil function in rural environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74 : 425-441.

Lucas, Y., F. J. Luizao, et al. (1993). The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. Science **260**: 521-523.

Marc, P., Canard, A. and Ysnel, F. (1999). Spiders (Araneae) useful for pest limitation and bioindication. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 229-273.

Martin, S., D. Baize, Lavelle, P. et al. (1999). Le suivi de la qualité des sols en France: la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Etude et Gestion des Sols 6(3): 215-230.

Morgan and A. J. Morgan (1988). Earthworms as biological monitors of cadmium, copper, lead, zinc, in metalliferous soils. *Environmental pollution* 54: 123 - 138.

Murtaugh (1996). The statistical evaluation of ecological indicators. *Ecological Applications* 6 (1): 132-139.

Nahmani, J. (1998). Impact d'une pollution métallicole aigue sur les peuplements de la macrofaune du sol, Paris VI.

Nahmani, J., C. Lattaud, et al. (1999). Effets des polluants présents dans les friches industrielles sur la qualité biologique du sol, Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement: 24p.

Paoletti, M. G. e. (1999). Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable . Practical use of invertebrates to assess sustainable land use. Amsterdam, Elsevier.

Paoletti, M.G. and Hassall, M. (1999). Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 157-165.

Paoletti, M.G. (1999). The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 137-155.

Parent (1991). Dictionnaire des sciences de l'environnement. *Hatier-Rageot. Rageot édition.* C. A. M.

Robert, M. and C. Cheverry (1996). "Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir." Cahiers Agricultures 5: 243-248.

Schaefer M and Schauer mann J (1990). "The soil fauna of beech forests: comparison between a mull and a moder soil." Pedobiol. 34(5): 299-314.

Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A., et al. (1993). "Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales." Fertilizer research 35: 227-235.

Texier, C., J. Cortet, et al. (1997). Etat de l'art critique sur l'utilisation de la faune du sol comme indicateur de l'impact des polluants sur la qualité des sols., ADEME, Angers.: 64p.

Tiedje, J. M. (1995). Approaches to the comprehensive evaluation of Prokaryote diversity of a habitat. Microbial diversity and ecosystem function. D. Allsop, R.R. Colwell and D.L. Hawksworth. Wallingford, U K, UNEP/CAB International: 73-82.

Van gestel, R. Baerselman, H. J. B. Emans, R. Posthuma and P. J. M. van Vliet (1992). Comparison of sublethal and lethal criteria of nine different chemicals in standardized toxicity tests using earthworm *Eisenia andrei*. *Ecotoxicology and environmental safety* 23: 206 – 22