

MANIFESTE POUR UNE CLE DE SOL

Christian Pacteau,
Référént pesticides biodiversité LPO
Relecture Martine Prodhomme
Novembre – décembre 2014

Remarques liminaires

Bien que les abysses soient infiniment mal connus, ils nous sont plus familiers que le monde que nous foulons de nos pieds tous les jours. « *Seuls ceux qui regardent ce qui ne se voit pas (...) sont réalistes* » constatait Jean Ziegler. Ce verdict s'applique parfaitement au monde vivant des sols. Sous nos yeux il se dérobe à notre vue, notre connaissance, notre conscience. J'ai puisé sans vergogne dans les travaux de Claude et Lydia Bourguignon et de Marcel B. Bouché pour comprendre, prendre conscience et constituer la partie descriptive de ces lignes. Il se trouve par ailleurs que chacune des deux Guerres mondiales nous a légué ses inventions. La Grande Guerre, un explosif, le nitrate, et les gaz de combat, deux novations de Fritz Haber ; la Seconde, la mécanisation. Les industriels, sitôt la suspension des hostilités en 1918, ont recyclé leurs inventions guerrières dans l'agriculture. Le présent texte ambitionne, d'une part, de décrire ce que ma conscience a retenu d'essentiel parmi les connaissances de ces auteurs, d'autre part, de confronter ces connaissances aux pratiques agricoles grandement modifiées par les inventions de ces deux guerres.

1. LES SOLS. GRANDES LIGNES

1.1. Spécificité des sols

La terre peut être décrite suivant trois grands compartiments : l'air, l'eau, les sols. L'air et l'eau tirent leur origine du monde minéral, bien que l'actuel pourcentage de l'oxygène de l'air (20%) soit la résultante de l'activité biologique (séquestration du carbone rejet de l'oxygène). Le sol, par contre, dans ses caractéristiques actuelles, est, lui, en totalité le résultat de l'activité biologique.

1.2. Biodiversité et biomasses dans les sols

Grands taxons. Si l'on s'en tient aux acteurs fondamentaux, les microbiologistes retiennent : les **invertébrés**, en particulier des arachnides, des insectes, des crustacés, des collemboles, des protozoaires, des thysanoures, des mollusques, des vers de terre et des nématodes ; des **champignons** ; des **bactéries et autres unicellulaires** : des actinomycètes, des amibes, des algues (...) ces derniers étant réunis sous le terme de micro-organismes. Bien entendu, s'y adjoignent les racines des plantes (C&L Bourguignon, 2008).

Biomasses. Les bactéries ne représentent que quelques q/ha (mais elles sont fort nombreuses et se divisent toutes les 20mn), les amibes sont aussi présentes dans l'ordre de 100 à 300kg/ha, les actinomycètes à hauteur de 1 t/ha, les champignons de 1 à 2 t/ha (soit les 2/3 des micro-organismes), les vers de terre de 1 à 4 t/ha. Un sol vivant contient ainsi, sans les racines, entre 4 et 8 t/ha d'invertébrés et micro-organismes, **soit 80% de la biomasse animale des terres émergées.** (Ressources : C&L Bourguignon, 2008 et M. B. Bouché, 2014).

Dans les sols dégradés, la biomasse des vers de terre, composante majeure de la biologie des sols, peut être réduite à 50 kg/ha. (M. B. Bouché, 2014)

1.3. Organisation spatiale des sols

La nécromasse. Tous les êtres animaux ou végétaux, ou les parties de plantes, épigés, lorsqu'ils meurent, sous l'effet de la pesanteur se déposent sur le sol. En dehors de l'intervention de charognards, les décompositions successives de la matière organique morte (nécromasse) ou l'enfouissement dans leur terrier de matière organique morte, mais fraîche, prélevée en surface par les vers de terre anéciques, conduisent à un enfouissement **vertical descendant**. En profondeur, les racines des plantes et les microbes dégradent la roche-mère à la recherche de minéraux, dont toutefois ils abandonnent sur place les silicates, lesquels formeront spontanément ensuite les argiles. A l'opposé du mouvement d'enfouissement, les racines, grâce à la sève brute (xylème), ainsi que les vers de terre anéciques, assurent une circulation **verticale ascendante** anti-pesanteur, en remontant ce qu'ils ingèrent ; les vers de terre endogés, et les micro-organismes au travers des mycorhizes associés aux racines, assurent quant à eux une **circulation horizontale** des éléments objets d'échanges nutritifs intenses au sein des symbioses entre micro-organismes et racines des plantes : la plante fournit des sucres issus de la photosynthèse, les micro-organismes fournissent aux plantes des éléments minéraux bruts ou chélatés et de l'eau.

Organisation structurale du sol. Dans leur état naturel, les sols sont structurés en **horizons**, ici décrits dans le sens descendant : l'horizon A organique, l'horizon B organo-minéral, l'horizon C minéral, l'horizon D de la roche-mère. Au total, la résultante de la **circulation verticale** des éléments est nettement **ascendante**, car, ultimement, les éléments partiellement décomposés, y compris l'humus et des éléments en partie digérés, sont remontés par les lombriciens anéciques (lombricien = genre, lombric = espèce) en surface du sol sous forme de turricules. Le sol se couvre en effet à l'automne de ces turricules, défécations des vers de terre anéciques. Ainsi sont progressivement enfouis au sein du sol lui-même des objets abandonnés en surface.

Pour gérer les plantes indigènes, concurrentes des plantes cultivées, l'araire, il y a 25 siècles, a été inventé en Mésopotamie. Le labour est né. De deux points de vue l'invention de cet outil s'oppose au fonctionnement naturel de la vie des sols. D'une part, le sol est mis à nu durant de longues périodes. Aucun sol naturel n'est nu. Cette nudité expose le sol et la faune épigée à la violence des conditions climatiques : température très élevée en surface en été propre à détruire cette faune, chocs répétées des gouttes de pluie qui tassent et altèrent le sol. D'autre part, si le travail superficiel ne met pas en cause la succession ci-dessus décrite des horizons, il n'en va pas de même des charrues contemporaines qui retournent, voire inversent les couches par rapport à la succession naturelle sur une grande profondeur. L'une des plus graves conséquences est ainsi d'enfouir en profondeur les horizons superficiels aérobies et de ramener en surface les couches profondes inertes. C'est ainsi que les champignons aérobies disparaissent, en conséquence « les pailles ne peuvent plus s'humifier » (C&L Bourguignon, 2008) pendant que les bactéries minéralisent de manière très exagérée les humus (Voir infra 2.3.). A l'échelle de la faune et des micro-organismes ceci représente à chaque saison un véritable séisme destructeur mettant en cause le fonctionnement écosystémique naturel et gratuit des sols.

2. LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES SUPPORTS des SOLS

2.1. Service écosystémique de la décomposition de la matière organique

Les acteurs. Les microbiologistes des sols distinguent : la **faune épigée** (1%) de la surface, aérobique, constituée de nombreux invertébrés, des champignons et de certaines espèces de vers de terre, assure une première dégradation de la matière organique, en particulier par broyage ou déchiquetage, les champignons, sont les seuls à pouvoir consommer la lignine ; la **faune endogée** (20%) des horizons inférieurs consomme plus particulièrement la matière organique constituée des racines mortes, notamment des plantes annuelles cultivées ; les **vers de terre anéciques** (80%) enfouissent en profondeur dans leur terrier les parties mortes des plantes prélevées en surface et remontent des horizons inférieurs des éléments trouvés en chemin qu'ils rejettent, in fine, en surface sous forme de turricules.

Digestion, excrétion, déjection. Chez tous les animaux pluricellulaires, qu'ils soient de la surface ou du sol, les grands mécanismes de la digestion sont identiques. Le tube digestif est une lumière par laquelle les aliments sont introduits dans cet espace extérieur à l'organisme, lui-même étant situé dans l'organisme. La digestion consiste, pour tous les êtres vivants, à prélever une partie assimilable des aliments, laquelle, via la porosité des entérocytes de l'intestin, passe de cet extérieur de l'organisme (le tube digestif) à l'intérieur de l'organisme lui-même. Par exemple les protéines présentes dans le tube digestif y sont réduites, grâce aux sucs digestifs et au microbiote, en leurs acides aminés. Ces nutriments pénètrent alors en traversant la paroi intestinale, dans l'organisme. Au travers du métabolisme, ils sont alors assimilés. Les déchets résultant de cette assimilation sont excrétés par la voie urinaire (et par le mucus chez les vers de terre par exemple). Reste dans les intestins une partie non assimilable par cet organisme mais qui peut l'être par d'autres. Cette part est rejetée sous forme de déjection. Or, dans les sols, bien que les êtres vivants y soient très petits, ils y sont très nombreux. Ceci compensant cela, s'ils représentent 80% de la biomasse vivante des terres émergées, on imagine que si les matières fécales s'étaient accumulées sur place, le sol, depuis tant de siècles, se serait transformé en une immense fosse septique particulièrement nauséuse dans laquelle les êtres vivants auraient fini par disparaître. Il n'en est rien. Pourquoi ? Parce qu'en dehors de la digestion de la nécromasse, la matière fécale est en elle-même, puisqu'elle est constituée de matière organique non digérée par ce premier consommateur, une ressource alimentaire considérable pour d'autres êtres vivants. D'autant plus qu'il faut y ajouter les matières fécales des animaux de la surface consommées par la faune épigée comme l'est la litière. Nous en connaissons tous un exemple : les bousiers coprophages pour lesquels les bouses de vaches sont un régal. Notons au passage que les ruminants, comme les lagomorphes en ré-ingérant leurs crottes fraîches, digèrent deux fois ce qu'ils ont

consommé, accroissant ainsi la quantité de nutriments récupérés. Au sein du sol il existe, non pas une, mais de fait, deux grandes sources de matières organiques, la nécromasse et la matière fécale. Ainsi, les matières fécales, de plus en plus réduites, retournent-elles par les digestions successives subies, au sol, et les sols ne contiennent-ils, dans le meilleur des cas, qu'une faible proportion de matière organique de 4%... quand tout va bien.

Décomposition et séquestration. Dans certains cas, des composés organiques ne peuvent être décomposés que par un ou deux taxons seulement. Par exemple, les « corps bruns », résultant des transformations biochimiques des feuilles des caducifoliés à l'automne, en particulier des feuilles de hêtre, ne peuvent être décomposés que par les champignons et les vers de terre. De même, les lignines, composés assurant la rigidité des plantes, surtout des arbres, ne sont consommées et décomposées que par les seuls champignons, produisant ainsi l'humus. L'humus des sols provient de la recombinaison spontanée, en grosses macromolécules, des résidus résultant de la consommation des champignons. C&L Bourguignon (2008) affirment que « *les champignons sont la grande voie d'entrée du carbone dans le sol* ». Dans d'autres cas, la décomposition de la matière organique, qui ultimement conduit au recyclage des nutriments, suppose plusieurs cycles d'ingestion / digestion / déjection. Les boulettes fécales des invertébrés épigés qui consomment la litière sont ainsi une ressource alimentaire pour les champignons. Les vers de terre anéciques déféquant aussi dans leurs galeries, ces matières fécales sont ensuite une ressource pour les bactéries et les champignons sous l'action desquels elles fermentent. Les galeries deviennent ainsi, observe malicieusement M. B. Bouché (2014), une « fromagerie », mais pas seulement. Les micro-organismes y secrètent également, un mucus, une sorte de « glu » stabilisatrice qui durcit et transforme les déjections initiales en grumeaux stables, écrit M.B. Bouché (2014). A l'automne, après les sécheresses estivales, les lombriciens, en lieu et place des matières fécales rejetées antérieurement, découvrent alors ces « fromages » fort à leur goût. Ils réingèrent ainsi leurs propres défécations méconnaissables et stables ainsi que les micro-organismes présents. Cependant, les lombriciens font encore plus et mieux. Ils n'ont rien à envier aux tunneliers modernes qui leur ont emprunté leurs méthodes. Ils ingèrent, broient (avec les cailloux de leur gésier) et mixent dans leur tube digestif à la fois des matières organiques fraîches (mortes) de la surface, des argiles des profondeurs, des éléments du sol allant des minéraux aux éléments grossiers tels des grains de sable, des matières organiques déjà en partie digérées, leurs propres matières fécales transformées en « fromages », les bactéries et champignons qui les occupent par la même occasion, les humus sur leur passage, les algues qui tapissent les sols. Cette digestion constitue ce que M.B. Bouché (2014) appelle de manière imagée le « **lombrimix** ». Leurs déjections peuvent être alors définitivement rejetées à la surface sous forme de **turricules**. Elles peuvent au contraire, à nouveau, tapisser leurs galeries où elles subiront un autre cycle de fermentation puis un autre cycle d'ingestion / digestion / déjection. Ainsi, la matière organique morte subit-elle, via la consommation des matières fécales, des digestions successives. Ainsi, progressivement la nécromasse se réduit-elle. La partie digestible par les consommateurs progressivement, en grande partie, disparaît sous forme de chaleur résultant du métabolisme de l'organisme des consommateurs : il reste alors sur les sols les turricules et, dans les sols, en dehors de la matière minérale, des résidus de matières organiques, des matières fécales et des humus. On peut cependant dire à ce stade que ces matières organiques sont, au moins pour un temps, séquestrées. C'est dire que les éléments biogènes, C, H, O, N, Ca, K, P, S, Mg (...) ne sont pas encore biodisponibles (Carbone, Hydrogène, Oxygène, Azote, Calcium, Potassium, Phosphore, Soufre, Magnésium).

En cas de disparition de tous ces acteurs, la nécromasse, comme lors du carbonifère, recommencerait à s'entasser. Or, ce service écosystémique, essentiel à la décomposition de la nécromasse, est soumis depuis l'avènement de la chimie de synthèse organominérale, notamment celle des produits qualifiés de phytosanitaires, à des agressions constantes. Par exemple, un fongicide, le bénomyl, dosé à 1,2 kg/ha, inhibe totalement l'activité des champignons (Ramade, 2007). Ce même auteur précise que l'usage de fongicides, tels le thiabendazole, le méthylthiophanate et le bénomyl, multiplie respectivement, par comparaison avec un sol sain, la quantité de litière non dégradée restant en surface, par 7, par 26, par 36 et par 39. Dans le cas du carbaryl, utilisé contre les insectes ravageurs de prairies, dosé à raison de 2,5 kg/ha/an, « il a provoqué la mort de 95% des invertébrés détritiphages ». Mais les fongicides ne se contentent pas d'exterminer les champignons. Répandus à raison de 0,78 g/m², divers fongicides (captane, thiabendazole, méthylthiophanate, bénomyl) provoquent 100% de mortalité dans une population d'oligochètes (vers de terre) après 18 jours. Les lombrics sont particulièrement sensibles aux fongicides et « sont nettement moins abondants dans les sols exposés aux traitements pesticides » (Ramade, 2007). « La sensibilité de la géodrilofaune (annélides) aux pesticides constitue une des conséquences les plus préoccupantes de la pollution des sols par ces substances » affirme François Ramade, (2007) (In Pacteau, 2009). Depuis les années 90,

deux nouvelles familles, les néonicotinoïdes et le phénylpyrazole (fipronil), ont été mises sur le marché. Elles sont surtout utilisées en enrobage de semences. Leur part dans le marché mondial des insecticides est de 40%. Les néonicotinoïdes, constitués d'une molécule de nicotine à laquelle a été ajouté un atome de chlore, ont une toxicité extrêmement élevée : il suffit d'une dose d'imidaclopride 7297 fois plus faible que celle du DDT pour obtenir chez l'abeille la même DL₅₀ (Dose létale pour 50% du lot). Si on utilise 100 g/ha de cette matière active et si la plante n'en absorbe seulement qu'entre 2 et 20% (Sanchez-Bayo, 2014), il reste ainsi entre 8 mg/m² et 9,8 mg/m² du produit dans le sol. Une part se dissipe soit par dégradation soit par dérive (aérienne ou ruissellement). La demi-vie mesure le temps nécessaire la dégradation de 50% du produit : elle ne prend donc pas en compte ce qui a pu dériver du site. La demi-vie de l'imidaclopride étant de 3 – 4 mois à un an, celle de la clothianidine de 148 j. à 7000 jours (Bonmatin et al. 2014), les concentrations réalistes dans l'environnement demeurent, en fonction de ces durées variables de demi-vie et de la toxicité des produits, au-delà des quantités reconnues comme toxiques de niveau soit aigu soit chronique, pour les espèces étudiées d'invertébrés des sols, notamment les vers de terre. L'effet en est une décroissance des acteurs des sols qui se traduit par une réduction de la décomposition de la nécromasse (M. Chagnon, WIA, 2014). L'altération du service écosystémique naturel et gratuit de la décomposition est une grave menace tant pour les sols que pour les eaux de surfaces, et, à terme, un probable problème écologique de taille, financièrement bien plus ruineux que celui des algues vertes.

2.2. Service écosystémique de l'élaboration de la stabilité structurale des sols

Stabilité structurale des sols. Les argiles et humus, deux colloïdes négatifs, vont être liés (et non « se lier »). Le calcium Ca⁺⁺, produit par la glande de Morren des lombriciens, proche de leur œsophage, lie les argiles aux humus. Néanmoins, plus récemment, M. B. Bouché (2014) considère (Voir 2.1.) que le liant qui assure la stabilité de l'ensemble des éléments des turricules, est essentiellement du **mucus bactérien**. De fait, chacun peut observer sur des turricules frais, leur aspect luisant, lequel suggère effectivement une sorte de « colle ». Le fait est que ces turricules sont très vite stables, y compris sous une pluie battante. Le sol est alors, en et sous la surface, constitué d'**agrégats**, ou **grumeaux**, que les hyphes fongiques et les radicelles enserrant. Le sol, souple, très aéré, est alors dit **grumeleux**. L'ensemble constitue la **stabilité structurale** des sols (M. B. Bouché, 2014). Dans les sols vivants ce sont ainsi 30 t/ha/an de turricules qui sont produits en surface du sol. Ce sont eux que Darwin appelait non « terre végétale » mais bien « terre animale ». Mais ces turricules ne représentent qu'une partie des fèces lombriciennes. Comme précisé plus haut, nombre d'entre elles tapissent les galeries des vers de terre. Au total, les agrégats représentent 1000t/ha dont **270t** sont réingérées et recyclées par hectare et par an, ce qui représenterait 6 cm d'épaisseur si ces matières fécales étaient répandues uniquement en surface. « Ces tonnes de grumeaux produites participent de la tenue des sols et sont des contributions anti-érosives majeures des lombriciens », (M. B. Bouché, 2014). (A noter que les chiffres de C&L Bourguignon, de 2008, sont équivalents).

Lombrimix et complexe argilo-humique. Le lombrimix est un concept plus récent résultant des nombreux travaux sur les vers de terre de M. B. Bouché. Lorsque l'on étudie de façon approfondie le contenu des turricules et autres matières fécales des galeries des lombriciens, on s'aperçoit que leur composition ne se réduit pas à la présence du complexe biochimique argilo-humique. Au delà des argiles, des humus et des minéraux de ce complexe figurent des macroéléments tels des grains de sable, de la matière organique ayant été ingérée, déféquée, ré-ingérée à plusieurs reprises par différents individus mais néanmoins pas toujours totalement dégradée, des résidus de bactéries, algues (...) consommées, du mucus bactérien, glu assurant la stabilité des turricules. Le lombrimix, qui inclut le complexe argilo-humique sans s'y réduire, définit de manière plus réaliste le contenu des turricules et éclaire les raisons de leur stabilité structurale.

L'opinion, tenant lieu de loi, selon laquelle les « cailloux remontent à la surface » renverse la situation réelle par méconnaissance des processus en place dans les sols. Bien sûr, les labours remontent en surface des cailloux ! Il ne s'agit bien sûr pas de cette observation. Le surgissement « spontané » des cailloux a au moins deux causes. La première est la fuite des argiles, des limons (...). Les argiles peuvent être dissociées ou non associées aux humus. Deux raisons majeures peuvent l'expliquer. Faute d'un retour au sol d'une litière de matière végétale âgée suffisamment riche en carbone, une trop faible quantité d'humus est produite, ou encore des labours trop profonds entraînent une minéralisation bactérienne excessive des humus. Dissociées des humus, les argiles retournent alors à l'état colloïdal et donc sont véhiculées par les eaux de ruissellement et conduites

vers les fossés alentour pour finir dans les sédiments marins. La deuxième cause est un très probable défaut de production de lombrimix, et donc de turricules, dont on peut affirmer que la quantité produite est intrinsèquement liée à la quantité de vers de terre présente dans le sol. Or, les pratiques contemporaines réduisent de façon considérable la biomasse des vers de terre (à 2,5% de la situation normale) comme l'a indiqué (voir supra 1.2.) M. B. Bouché. Ces « cailloux » témoignent ainsi d'une destruction de la stabilité structurale des sols et donc d'une érosion du sol en cours « découvrant » ainsi les cailloux contenus dans les sols. Actuellement, dans le monde, 1/3 des sols sont en voie de dégradation (Lester Brown, 2011). Historiquement, entre le néolithique et le XIX^e s, un milliard d'hectares ont été érodés, puis à nouveau au XX^e s, un autre milliard. Actuellement, les sols français, sur une réserve de sol de 4000 – 5000 t/ha, en perdent 40 t/ha/an (C&L Bourguignon, 2008). La perte du service écosystémique naturel et gratuit conduisant à la stabilité structurale des sols est l'une des plus graves erreurs que l'homme du XX^e s. puisse commettre. Elle conduit tout droit à l'érosion en marche des sols. L'histoire bégaie.

2.3. Service écosystémique de la séquestration du carbone dans les sols

En laissant la litière s'humifier, constatent C&L Bourguignon (2008), la teneur du sol en matière organique s'accroît entre 0,1% et 0,3%/an (rappelons qu'un bon sol contient 4% de matière organique, aujourd'hui en France le taux se situe plutôt entre 2 et 1,2%). Pour un pays comme la France, ajoutent-ils, cela représente 35 millions de tonnes/an soit 1/5 du carbone dé-séquestré par la consommation de pétrole. Un sol peut séquestrer entre 1,5 t/ha et 300 t/ha au rythme de 2,5 t/ha/an (Séguy et al. 2007-2008).

Par comparaison, un sol labouré profondément perd 1 t/ha/an de carbone (C&L Bourguignon (2008). Le différentiel est ainsi de 3,5 t/ha/an. Plusieurs raisons expliquent cette perte de carbone. Un labour trop profond, comme il a été dit, profite aux bactéries minéralisatrices des humus qui ne sont plus freinées dans leur développement par les antibiotiques produits par les champignons et les actinomycètes. L'absence de retour au sol de matière organique contenant des plantes sèches constituées d'hémicellulose, de cellulose et de lignine, donc riche en carbone, prive les décomposeurs, et donc le sol, de carbone. L'usage de fongicides, et autres pesticides agissant, d'une part, négativement sur les décomposeurs, d'autre part par imprégnation des plantes cultivées, peut conduire (voir supra 2.1.) à un grave déficit de décomposition. Si la faune des décomposeurs endogés est également impactée par les effets nocifs des pesticides, ce sont les racines des plantes cultivées qui ne sont pas décomposées. Un pied de blé produit 5000 km de poils absorbants. Dans un champ de blé cette nécromasse annuelle représente jusqu'à 6 t/ha pouvant produire de 200 kg à 600 kg d'humus/ha/an (C&L Bourguignon, 2008). Passer d'une situation de service écosystémique naturel et gratuit de la séquestration du carbone dans les sols à une situation artificialisée où les sols relarguent du CO₂, sans parler du protoxyde d'azote dont le pouvoir d'effet de serre est 300 fois celui du CO₂, fait partie, au moment où le réchauffement climatique est d'actualité, et même institutionnellement reconnu, des nombreux paradoxes mortifères du XX^e s.

2.4. Service écosystémique du recyclage des éléments nutritifs

Les besoins des plantes. Massivement, les plantes se nourrissent aux dépens des atomes légers de l'air (95%) appelés pour cela biogènes : hydrogène, oxygène, carbone, azote. Les atomes lourds (5%) sont d'origine tellurique, certains biogènes d'autres hormétiques (on passe vite de la carence à l'excès) : calcium, phosphore, soufre, magnésium, potassium, chlore, manganèse (...). Ajoutons que sur les 106 éléments du tableau de Mendeleïev 32 seraient nécessaires à la plante dont 16 indispensables. Cependant, cette description induit en erreur. Si trois des quatre atomes légers (C, O, H) participent des échanges gazeux via les stomates de la feuille, une part importante de ces derniers, à laquelle il faut ajouter l'azote, est paradoxalement puisée directement dans les sols.

Les atomes lourds du sol sont ceux qui confèrent les caractéristiques des « terroirs » aux plantes. L'alimentation des plantes réduite à NPK, associée à un faible taux ou une absence de retour de la matière organique au sol, est une traite tirée aux dépens des générations futures sur la qualité des produits, voire la santé des plantes, certains éléments pouvant venir à manquer, constituant dès lors « des facteurs limitant l'activité biologique dans les écosystèmes » (M. B. Bouché, 2014).

Recyclage des éléments nutritifs. La décomposition décrite de la nécromasse et des matières fécales a conduit à une séquestration d'éléments biogènes et hormétiques et de composés extrêmement complexes tels les acides

fulviques, humiques et les humines (humus) dans les agrégats. Pour que ces éléments ou composés soient utilisables par la plante il faut donc une décomposition supplémentaire. Au cours de l'évolution, c'est ce mécanisme en deux temps (séquestration / déséquestration) qui s'est mis en place. C'est à partir des éléments séquestrés que le recyclage des éléments nutritifs va réellement commencer au moment où les plantes en ont besoin. Or, c'est ici, autour de ces agrégats, que les racelles et les poils absorbants des plantes et les hyphes fongiques, les mycorhizes, se concentrent. Les travaux de M. B. Bouché, en utilisant des isotopes du carbone et de l'azote, le C^{14} et le N^{15} , illustrent de manière magistrale comment une part des atomes légers est recyclée directement dans le sol sans repasser par la case départ aérienne et sans perte. Les micro-organismes unicellulaires excrètent des enzymes dans les agrégats qui libèrent de ce « stock » des molécules qu'ils consomment, en particulier les acides aminés. Puis, ils rejettent l'azote sous forme d'ammoniac (NH_4 , non l'ammoniac gazeux NH_3). Celui-ci est alors directement assimilé par la plante sans passer par la voie gazeuse. Les travaux ont montré, de plus, que des vers de terre assimilaient très vite l'isotope N^{15} dans leurs tissus. Réintroduits dans les prairies, les lombriciens ont ensuite excrété le N^{15} remplacé par le N^{14} à la même vitesse. Au quatorzième jour le N^{15} semblait entièrement disparu. Ce qui a été interprété comme un échappement par voie gazeuse. Erreur. L'observation a montré que le N^{15} se retrouvait ensuite récupéré à hauteur de 96% au quarantième jour. Il se trouvait dans tous les acteurs : il avait été assimilé par les racines profondes des plantes vivantes, lesquelles ont à leur tour réalimenté les vers de terre en feuilles mortes N^{15} ! Cette fertilisation des lombriciens, précise M.B. Bouché (2014), multiplie par 4 ou par 5 le fonctionnement des écosystèmes. « Ici, constate-t-il, le cycle des éléments biogènes est bouclé ». Ce système fonctionnant en deux temps complémentaires, hautement improbable, a son analogue improbable en surface : la complémentarité entre les angiospermes (plantes à fleurs) et les pollinisateurs. La séquestration et la présence des poils absorbants et des mycorhizes autour ou dans les agrégats, en interdisant les fuites, confèrent à ce système sa haute valeur adaptative raison pour laquelle il a été sélectionné.

L'évolution a retenu une séquestration de matière organique dans les sols contenant en particulier les éléments biogènes (C, H, O, N). Premier avantage essentiel : cela évite la fuite des éléments nutritifs tant par lessivage (percolation) que le ruissellement. Second avantage, les micro-organismes utilisent cette ressource dans leur propre intérêt ; cependant, les « déchets », telle l'ammoniac qu'ils produisent, constituent ainsi l'une des ressources dont la plante a un besoin essentiel. Or, au contraire de nos apports « brutaux », car discontinus, de minéraux tels les nitrates, le système naturel produit en continu ces nutriments, avec régularité et sans excès. Ainsi, contrairement aux apports discontinus, n'y a-t-il pas de fuites dans l'environnement. Nourrie naturellement, la plante ne subit ni gavage ni famine en alternance. La boucle est bien bouclée, sans retour à l'état gazeux, ni, localement, de pertes en ressources nutritives. De la mort renaît en continu la vie. Il suffit d'observer la richesse des dernières forêts tropicales et équatoriales pour constater que lorsque le fonctionnement de la nature est respecté, elle est prodigue. « L'ensemble de l'azote ingéré, toutes formes non gazeuses confondues, représente $230 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ou $2,3 \text{ t/ha/an}$, soit près de dix fois la valeur des apports que font les agriculteurs aux champs » précise M. B. Bouché (2014). Précisons également que les bactéries libres des sols azotobacters, et, dans les nodosités des légumineuses les bactéries rhizobiums, participent de la séquestration de l'azote. C&L Bourguignon (2014) estiment cette séquestration à 400 kg/ha/an . Alors ? Nous serions-nous trompés sur toute la ligne brisée ? Assurément, bien connaître le fonctionnement écosystémique, y compris en agriculture, peut là encore être un immense avantage. Pour cela, il faut d'abord mentalement sortir d'une conception du « sol inerte ». La négation du service écosystémique naturel et gratuit du recyclage des nutriments de la plante fait partie des erreurs fondamentales du XX^e s. Elles nous rendront indéfiniment dépendants de l'artificialisation dès lors que le seuil de non retour sera atteint. Mais le service rendu sera payant et pas le même.

2.5. Service écosystémique de l'hygiénisation et de la régulation du régime des eaux

La perméabilité des sols, mesurée par la conductivité hydraulique en mm/h de percolation, est un élément capital du cycle de l'eau. Si l'on s'en tient à la qualité bactériologique, la filtration réalisée au cours de cette percolation est un élément capital de l'hygiénisation de l'eau et de sa qualité en terme de composition minérale. Encore faut-il que le sol soit apte à permettre l'infiltration, c'est-à-dire suffisamment perméable, donc non imperméable, ce qui privilégie largement le ruissellement latéral de surface aux dépens de l'infiltration. Bien évidemment, au contraire de l'hygiénisation par filtration, le ruissellement collecte les pollutions diverses. Dans un sol où les services écosystémiques sont préservés, les lombriciens produisent 4000 km/ha de galeries, soit 400 m/m^2 , précise M. B. Bouché, (2014). Rappelons-le : les lombriciens anéciques produisent des galeries

verticales pendant que les vers de terre endogés produisent des galeries horizontales. La porosité en surface du sol est de 80% du volume (C&L Bourguignon, 2008). Ils ajoutent que les vers de terre endogés assurent une porosité de 60% du volume dans les horizons profonds du sol. Outre l'usage qu'en font les lombriciens ces galeries remplissent d'autres rôles fondamentaux. Elles sont en premier lieu la voie irremplaçable qu'emprunte l'air, donc elles assurent l'oxygénation des horizons inférieurs. Elles constituent également une voie privilégiée d'infiltration des eaux météoriques. Mais elles peuvent aussi être mises à profit par les racines des plantes. Un limon labouré battant (tassé) a une conductivité hydraulique de 1 mm/h (1L/m²), alors que sous couvert végétal la conductivité est de 80 mm/h, observent C&L Bourguignon. Ils ajoutent qu'en forêt de feuillus la perméabilité atteint 150 mm/h, voire, sous les tropiques, 300 mm/h. M. B. Bouché observe qu'en l'absence de lombriciens anéciques la perméabilité est de 5 à 7 mm/h, mais en leur présence, à une biomasse standard de 1,2 t/ha, de 160 mm/h ; cette perméabilité est de plus multipliée par deux si la biomasse est multipliée par deux, soit 320 mm/h. Donc, le sol « éponge » par infiltration 320 L/m²/h, soit 32 cm/m²/h d'eau. A l'évidence, cette perméabilité est considérablement impliquée dans le rechargement des nappes. Plus la perméabilité diminue, plus l'alimentation nécessaire sera longue et le ruissellement fournira une eau de surface chargée en polluants. Plus les sols sont poreux, plus, en cas de fortes précipitations, la réponse, entre l'amont et l'aval, est retardée.

Les chiffres parlent d'eux-mêmes. Or, observe C&L Bourguignon (2008), « les 20 dernières années ont été les plus sèches depuis 3000 ans. En tuant la faune épigée par nos labours et nos pesticides, nous avons créé des inondations en période sèche, une innovation du XX^e s. ». Ce qui sous-entend que l'eau, puisqu'elle ne s'infiltré plus que parcimonieusement et très lentement dans les sols sans porosité, voit son ruissellement sur les sols imperméables croître en quantité et en vitesse de l'amont à l'aval. Sans doute faut-il y adjoindre le démantèlement des réseaux anastomosés de fossés lors des opérations connexes aux remembrements. Entre 2 et 3 millions de kilomètres de haies auraient alors disparu. Sans doute faut-il aussi s'interroger sur les constructions en zone inondable. Les catastrophes ne semblent pas faire partie du « roman de l'histoire » des hommes. Quoiqu'il en soit, il n'échappe à personne que les réponses des bassins versants deviennent quasi simultanées des fortes pluies. Il n'y a plus de délai de réponse. Ce que l'on aurait tort de considérer comme « normal ». A nouveau le service écosystémique naturel et gratuit conduisant à la régulation du régime des eaux est gravement endommagé.

2.6. Service écosystémique des réseaux trophiques (ou chaînes alimentaires)

La phoromasse. Un mot d'explication sur la biomasse végétale. Il existe entre biomasse et nécromasse un monde intermédiaire. La biomasse de la forêt n'est pas la masse des arbres. Très grossièrement, ceux-ci sont constitués de trois parties (de l'extérieur vers le centre) : l'écorce (partie morte), le liber, le cambium et l'aubier (parties vivantes), et le duramen, le bois proprement dit (partie morte, lignifiée non nécrosée). Le bois, qui assure la structure et devient progressivement la masse la plus importante, n'appartient donc plus au monde vivant, mais tant qu'il n'est pas en voie de décomposition, il n'appartient pas non plus à la nécromasse. C'est pour cela que M. B. Bouché (2014) l'appelle la « phoromasse » (du grec « phoro », « qui porte »). Cette phoromasse peut durer des siècles comme en témoignent les maisons à colombage. Inversement, dans les haies d'autrefois on trouvait fréquemment des « chênes creux », vieux têtards dont la partie bois était entièrement décomposée, mais dont les parties vivantes et l'écorce suffisaient à maintenir la verticalité et la survie.

Réseaux trophiques. Les éléments de la nature se développent au sein de réseaux plus ou moins vastes et toujours très largement interconnectés. Les réseaux trophiques y sont fondamentaux. Le terme « réseau » est infiniment plus juste et réaliste que celui de « chaîne alimentaire » induisant une représentation mentale linéaire là où justement le réseau est la règle. Eu égard aux 3 compartiments définis (voir supra 1.1.) ces réseaux ne peuvent avoir que deux origines : soit le sol soit le milieu aquatique. Malheureusement, dans le « roman écologique » véhiculé, ces réseaux trophiques, plus encore les pyramides des biomasses, n'intègrent pas la nécromasse ni les décomposeurs. Elles commencent avec les plantes et se terminent avec les prédateurs ! Retenons donc la notion de réseaux complexes globalement circulaires intégrant la nécromasse et les déchets des êtres vivants, les matières fécales. Rappelons-le, 80% de la biomasse du monde animal des terres émergées habitent le sol. Ceci signifie en toute logique que la nécromasse – très largement d'origine végétale – et les matières fécales de la surface du sol et de l'intérieur du sol constituent la ressource alimentaire qui génère l'essentiel de la biomasse du monde animal émergé, les 80% du sol, et donc, par voie de conséquence, que la biomasse végétale vivante de la surface génère seulement 20% de la biomasse du monde animal des terres émergées. Précisons que dans le sol s'ajoute à la biomasse animale la biomasse des racines. Or, M. B. Bouché

(2014) évalue globalement les biomasses aérienne et souterraine des plantes comme équivalentes. Ce qui signifie que, dans le sol, à la biomasse animale il faut ajouter 50% de la biomasse végétale vivante. Récapitulons. Sur les terres émergées, le sol héberge 80% de la biomasse animale qui recycle 100% (ou presque) de la nécromasse, 100% (ou presque) des matières fécales, et 50% de la biomasse vivante des végétaux. Voilà qui remet à sa place le « roman écologique » véhiculé. Voilà qui change notre vision du monde ! Or, les invertébrés, consommateurs de nécromasse et de matières fécales, qui constituent ce monde invisible, sont, à l'exception des phytophages de la surface, à la base même de tous les réseaux trophiques. Il en va bien sûr de même dans les milieux aquatiques. Les seuls vers de terre représentent pas moins d'une tonne de viande à l'hectare, affirme M. B. Bouché (2014). Par comparaison, l'homme ne représente que 55 kg/ha. C'est dire l'importance de la vie dans les sols, non seulement pour la décomposition de la nécromasse et des matières fécales et le recyclage des éléments nutritifs, mais aussi dans les réseaux trophiques de la surface.

Quel est l'effet des produits phytosanitaires sur les réseaux trophiques ? La réponse a été en partie formulée au fur à mesure des descriptions. Cependant, puisque la vie du sol n'est pas à part de la vie en surface, mais en est une ressource essentielle, il faut examiner les effets des pratiques à la fois sur les invertébrés et micro-organismes des sols et aussi sur ceux qui en dépendent en surface. Dans ce domaine, ne sont retenus que les effets des pesticides bien que les causes de désordre ne se réduisent pas à leur seule utilisation. L'usage des pesticides, depuis les années 1950, est jalonné de crises écologiques d'ampleur toujours grave, mais plus ou moins apparente. On se souvient du combat des années 60 de Rachel Carson contre les organochlorés, dont le DDT. Tous les pesticides successifs (organophosphorés, carbamates, pyrèthrinoides (...)) y compris de nombreux fongicides ont présenté des inconvénients pour la faune non cible. Par exemple, les organophosphorés sont moins rémanents que le DDT mais plus toxiques, notamment pour les oiseaux. Néanmoins, la seconde grande crise résulte de l'usage des herbicides. Or, en l'occurrence, concernant le monde animal, la toxicité n'est même pas la cause première évoquée. L'usage des herbicides est destiné soit, en agriculture, à éliminer la concurrence des « herbes folles », soit, dans les autres secteurs, à « faire propre » (« La mort est d'une si grande beauté » commentent sarcastiques C&L Bourguignon). Ces « mauvaises herbes » sont en réalité les plantes indigènes. A ce titre elles produisent des graines indispensables à certains passereaux. Mais chaque espèce de plante héberge aussi plusieurs dizaines d'espèces d'invertébrés. La disparition de ces plantes « hôtes » fait donc disparaître à la fois les graines et tous les invertébrés dépendants. Bien évidemment, s'en suit un effet domino. Les espèces d'invertébrés et d'oiseaux dépendantes de ces invertébrés ou de ces graines voient leur ressource trophique fondre aussi sûrement que la banquise arctique. Dès lors, la cascade des régressions se poursuit au sein des populations d'espèces dépendantes en raison même d'une famine à très grande échelle de ce monde animal. Ainsi, récemment, Inger et al. (2014), de l'université d'Exeter, ont publié dans Ecology Letters un article sous le titre « Les oiseaux communs d'Europe déclinent rapidement pendant que les espèces moins abondantes s'accroissent ». La chute, entre 1980 et 2009, des oiseaux fréquentant essentiellement les milieux agricoles, est spectaculaire. Sur environ 2 milliards d'oiseaux appartenant à 144 espèces sur 520, en 1980, environ 421 millions d'individus ont disparu 30 ans plus tard. De même, en France, les chiffres du MNHN comparant les données entre 1989 et 2011 montrent que 75% des espèces fréquentant les milieux agricoles sont en régression, dans certains cas très sévères (C. Pacteau, 2014). Parallèlement, un groupe d'une cinquantaine de chercheurs de 15 pays s'est réuni pour produire, entre 2009 et 2014, une méta-analyse de 800 articles scientifiques : The « Worldwide Integrated Assessment of the Impact of Systemic Pesticides on Biodiversity and Ecosystems » (L'évaluation mondiale intégrée de l'impact des pesticides systémiques sur la biodiversité et les écosystèmes) (www.tfsp.info). Cette évaluation montre d'évidence que ces systémiques (néonicotinoïdes et fipronil) ne peuvent pas ne pas avoir d'effets soit aigus soit sublétaux, tout simplement parce que la PEC (Concentration environnementale Prévue) est le plus souvent supérieure à la PNEC (Concentration Prévue Sans Effet). Pourtant, les doses à l'hectare ont été divisées par 10. Oui, mais, en référence au DDT, la toxicité a été multipliée par près de... 10 000 (dix mille). Donc, malgré cette réduction, les systémiques sont mille fois plus toxiques que le DDT. Sans grande surprise, ce sont pour l'essentiel les invertébrés des sols puis ceux des milieux aquatiques qui sont les plus impactés. Là aussi, pour reprendre M. B. Bouché, « la boucle est (en train de se) boucler ». La biodiversité de surface (papillons, libellules, pollinisateurs, oiseaux ...) et les services écosystémiques des réseaux trophiques des sols et des milieux aquatiques s'effondrent lentement mais sûrement.

3. Conclusion

Résumé. Le fonctionnement des sols suppose une superposition d'horizons définie, la charrue ne les respecte pas ; la décomposition des masses colossales de matières organiques mortes et de matières fécales et la séquestration des éléments biogènes supposent l'existence d'une biomasse de décomposeurs non moins considérable, on les affame, on les empoisonne ; la séquestration du carbone est une urgence, les pratiques conduisent à l'émission de gaz carbonique et de protoxyde d'azote aux puissants effets de serre ; le recyclage des éléments nutritifs issus de la déséquestration des agrégats nourrit la plante en continu sans polluer, on alimente la plante par saccades et on réduit son alimentation à trois éléments (N, P, K) alors qu'elle a besoin de 32 éléments ; le labour des invertébrés fertilise et assure la stabilité des agrégats dans l'ordre des 300 t/ha/an, la charrue, bien que moderne, ameublisse mais ne reconstitue ni la stabilité structurale ni la fertilité des sols ; l'essentiel des réseaux trophiques s'enracine dans les sols, les invertébrés des sols et aquatiques disparaissent, les espèces communes qui en dépendent suivent le même chemin. La disparition des prédateurs et des oiseaux sera une perte pour l'humanité mais ne changera rien pour le genre humain. Il n'en ira pas de même avec la disparition des invertébrés. Nous sommes *stricto sensu* dépendants des services écosystémiques supports et régulateurs évalués à 33 000 milliards \$/an (2 fois le produit mondial brut). Les invertébrés en sont les maîtres absolus. La Fontaine a toujours raison : « *On a souvent (toujours) besoin d'un plus petit que soi* ».

Regarder l'invisible. Il n'est pas tout-à-fait étonnant que le monde des ingénieurs, lui-même, se soit laissé prendre au piège du « *si tu n'es pas visible tu n'existes pas* », (vérité effectivement largement vérifiée dans le monde médiatique, mais le monde médiatique n'est qu'un avatar, pas la réalité). L'homme ne perd pas aussi facilement ses caractéristiques initiales. La permanence de l'objet s'installe chez lui, selon ce qu'a montré Jean Piaget, au cours de la petite enfance entre 18 et 24 mois. Mais encore faut-il pour qu'il y ait « *permanence de l'objet* » qu'il y ait un « *objet* ». Comment un objet invisible (ou presque) peut-il s'installer dans notre conscience ? Il faut avoir la curiosité chevillée au corps des auteurs qui nous accompagnent dans ces lignes pour vivre concrètement la réflexion déjà citée de Jean Ziegler : « *Seuls ceux qui regardent ce qui ne se voit pas [...] sont réalistes* ».

Les pratiques agricoles ne regardent pas l'invisible. En quoi les pratiques agricoles s'inscrivent-elles dans la cécité à l'égard du sol ? Globalement on peut retenir quatre pratiques conventionnelles inadaptées au vivant : (1) les labours profonds associés aux surfaces nues exposent les sols aux agressions climatiques : l'antithèse en est la culture sans labour ou les techniques simplifiées de travail du sol ; (2) la matière organique âgée (riche en carbone) est insuffisamment ou pas du tout retournée au sol : l'antithèse en est l'usage du fumier, du compost et du bois raméal fragmenté ; (3) la spécialisation régionale des productions a éloigné la production végétale de la production animale sur la base *stricto sensu* économique théorisée par Adam Smith (XVIII^e s.) des « avantages comparatifs » : l'antithèse en est la polyculture élevage, ou tout du moins une complémentarité locale des deux systèmes ; (4) une réduction importante des rotations, qui suppose un retour trop fréquent d'une même culture sur une même parcelle, voire la même culture tous les ans, favorise grandement la présence des ravageurs spécialisés car leur cycle de vie n'est plus rompu suffisamment longtemps par la présence de cultures intermédiaires différentes, la présence en grand nombre des ravageurs ou de maladies conduit alors à l'usage « obligé » des insecticides, fongicides, molluscides (...) : l'antithèse en est la mise en œuvre des rotations longues sur la base d'assolements étudiés rigoureusement pour prévenir ces inconvénients, et, en ce qui concerne le non usage des pesticides et engrais de synthèse, toutes les formes d'agriculture dites, en France, « biologiques » ou, dans les pays anglo-saxons, « organiques » et agrologiques ou agroécologiques (sans pesticides).

Les lignes directrices de l'OCDE ne regardent pas l'invisible. Les pesticides, pour être commercialisés, doivent obtenir une AMM (Autorisation de Mise sur le Marché). Pour être bref, deux aspects sont particulièrement contestables. D'une part, les risques sont évalués par les industriels eux-mêmes et leurs recherches, par souci de transparence sans doute, sont couvertes par le secret industriel. En bon français on peut y voir l'application de deux principes, celui du « *Juge et partie* » et celui de la « *dissimulation* ». D'autre part, les bases toxicologiques, dites BPL (Bonnes Pratiques de Laboratoire), dont les lignes directrices ont été fixées par l'OCDE (Organisation pour la Coopération et le Développement Economique), sont d'inspiration nettement spéculative puisque fondées, pour l'essentiel, sur des données de toxicologie aiguë à très court terme (48h ou 96h) ce qui a pour effet de masquer les effets sublétaux à faibles doses d'une exposition récurrente à long terme, dite chronique, dans l'environnement. Il me faut cependant justifier le choix du qualificatif « spéculatif ». Deux concentrations

proches ont été définies : la LOEC (La plus basse concentration pour laquelle un effet nocif est observé) et la NOEC (La plus haute concentration pour laquelle aucun effet n'est observé). Ces concepts conduisent à une CSE (concentration sans effet), puis est appliqué un « facteur de sécurité », la concentration étant divisée par 100, 150, ou 1000. Sur cette base, un seuil (une concentration) d'innocuité des faibles doses est défini. **Oui, mais encore faudrait-il s'en assurer !** C'est en cela que la toxicologie réglementariste est **de nature spéculative** et non scientifique : elle **ne vérifie pas les postulats qu'elle pose**. Non seulement elle ne vérifie pas ses postulats, mais en plus, en tolérant le secret industriel sur les études préalables elle interdit toute répliquabilité des procédures et, en cela, elle n'est pas scientifique. La **répliquabilité** des résultats, par n'importe quel chercheur, est le critère fondamental qui fonde les sciences. La critique ci-dessus du postulat d'innocuité des faibles doses, spéculé mais non vérifié, a été parfaitement confirmée par l'EFSA (European Food Security Agency) elle-même, en 2012, lors de la révision de l'évaluation des risques effectuée dans le cadre de la révision du règlement européen CE 1107-2009 à la demande de la Commission européenne : les tests de toxicité aiguë (48h à 96h), qui fondent la régulation conventionnelle, sont « *inaptes pour évaluer les effets à long terme des pesticides* », conclut le rapport. Reste à mettre en œuvre des pratiques, bien connues de la science académique, ayant pour but, en dehors de toute spéculation, de mesurer concrètement, sur le terrain, sur des périodes longues et une variété d'espèces bien plus large, les effets sublétaux du pesticide envisagé. Au demeurant, ces recherches qui s'affranchissent du postulat de l'innocuité des faibles doses sont aujourd'hui largement documentées. Les problèmes environnementaux et de santé publique (cancers, maladies neuro-dégénératives, perturbations endocriniennes...) résultant de l'usage des pesticides n'ont pas d'autres origines que **l'échec de l'évaluation des risques** conduisant à la délivrance des AMM. Le fondement s'enracine dans une attitude profondément antiscientifique : l'absence, institutionnalisée, de vérification du postulat spéculé de l'innocuité des faibles doses. Reste que, pour protéger la santé publique et l'environnement, le politique a le pouvoir et donc le devoir, aujourd'hui en connaissances de cause, de légiférer.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHÉ B. Marcel. (2014). Des vers de terre et des hommes. Actes Sud.
- BOURGUIGNON Claude et Lydia. (2008). Le sol, la terre et les champs. Le Sang de la Terre.
- BROWN Lester. La crise alimentaire ne fait que commencer. Courrier International. N°1059 – 2011
- INGER R. et al. (2014). « Changes in European Avian Abundant ». Environment and Sustainability Institute, University of Exeter.
- PACTEAU Christian. (2009). Un Pacte Toxique. Amalthée.
- RAMADE François. (2007). Introduction à l'écotoxicologie. Lavoisier.
- PACTEAU Christian (2014). Pourquoi les oiseaux des champs disparaissent-ils ? ALAUDA, le courrier de la nature N°281 - mars-avril 2014
- SEGUY et al. (2007 modifié 2008). Dossier séquestration carbone. CIRAD, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- SANCHEZ-BAYO Francisco. (2014). The trouble with neonicotinoids ». SCIENCES, 14/11/14. Vol 346, Issue 6211.

Méta-analyse du Worldwide Integrated Assessment

- SIMON-DELSON N. et al. (2014). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. Environment Sciences Pollution Research
- BONMATIN J-M. et al. (2014). Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. Environment Sciences Pollution Research
- PISA L.W. et al. (2014). Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. Environment Sciences Pollution Research
- GIBBONS D. et al. (2014). A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. Environment Sciences Pollution Research
- CHAGNON M. et al. (2014). Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. Environment Sciences Pollution Research
- FURLAN L. & David Kreuzweiser. (2014). Alternatives to neonicotinoid insecticides for pest control: case studies in agriculture and forestry. Environment Sciences Pollution Research