

Les substances naturelles : une alternative aux pesticides de synthèse

Résumé Les produits de biocontrôle, et notamment ceux qui comprennent des substances naturelles d'origine minérale, végétale, bactérienne ou animale, sont des alternatives potentielles aux pesticides de synthèse conventionnels car ils sont supposés avoir des impacts plus faibles sur la santé et sur l'environnement. À ce jour, 39 substances naturelles sont autorisées en France pour protéger les cultures (contre 250 pesticides de synthèse). Elles couvrent des usages variés (herbicide, insecticide, fongicide...), mais le nombre de substances par usage reste limité. En général, les substances naturelles présentent des profils toxicologiques et environnementaux plus favorables que ceux des pesticides de synthèse. Toutefois, des recherches sont nécessaires pour approfondir la caractérisation de leurs propriétés toxicologiques et écotoxicologiques et de leur devenir dans l'environnement, et pour vérifier que les méthodes réglementaires d'évaluation des risques sont adaptées.

Mots-clés Substances naturelles, pesticides, biocontrôle, santé, environnement.

Abstract Natural substances: an alternative to synthetic pesticides

Biocontrol plant protection products, in particular those based on natural substances originating from minerals, plants, bacteria or animals, are possible alternative to conventional synthetic pesticides because they are supposed to have lower impacts on human health and on the environment. To date, 39 natural substances are authorized in France for crop protection (compared to 250 synthetic pesticides). These substances cover various uses (herbicide, insecticide, fungicide...), but the number of substances per use is limited. In general, the toxicological and environmental profiles of natural substances are better than those of synthetic pesticides. However, research are needed to investigate further the toxicological and ecotoxicological properties of natural substances and their fate in the environment, and to verify that the regulatory risk assessment methods currently used are appropriate.

Keywords Natural substances, pesticides, biocontrol, human health, environment.

Un des défis actuels de l'agriculture est de produire des aliments de qualité en quantité, tout en limitant les impacts sur la santé et l'environnement pour protéger la population humaine, les ressources en eau, le sol et la biodiversité. Afin d'assurer la durabilité des agrosystèmes, des changements dans les systèmes de culture sont nécessaires pour réduire les intrants, pesticides en particulier. Si les pratiques agricoles devaient rester les mêmes (en termes d'usage de pesticides et d'engrais, d'irrigation, d'espèces cultivées), l'agriculture pourrait causer des dommages irréversibles sur l'environnement [1-4].

Protection des cultures, santé et environnement

La Directive européenne 2009/128/CE instaure un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable et promeut notamment l'utilisation de méthodes « non chimiques » de protection des plantes [5]. En France, la Loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt stipule que « L'État encourage le recours par les agriculteurs à des pratiques et à des systèmes de cultures innovants dans une démarche agroécologique. À ce titre, il soutient les acteurs professionnels dans le développement des solutions de biocontrôle et veille à ce que les processus d'évaluation et d'autorisation de mise sur le marché de ces produits soient accélérés » [6]. Le Plan Écophyto II+ préconise de « Promouvoir et développer le biocontrôle et faciliter le recours aux préparations naturelles peu préoccupantes » [7]. Le biocontrôle rassemble des approches basées sur des mécanismes naturels pour protéger les cultures ou renforcer leurs défenses contre les organismes nuisibles, grâce à des macro-organismes (coccinelles par exemple)

ou à des produits phytopharmaceutiques⁽¹⁾ comprenant des micro-organismes, des médiateurs chimiques (phéromones, kairomones), des substances naturelles d'origine minérale, végétale, bactérienne ou animale, ou identiques à celles-ci, et des substances de base⁽²⁾, tout en présentant un niveau élevé de sécurité pour la santé et l'environnement [8]. Les produits phytopharmaceutiques de biocontrôle, et notamment ceux qui comprennent des substances naturelles, sont présentés comme des alternatives potentielles aux produits phytopharmaceutiques de synthèse car ils sont supposés avoir des impacts plus faibles sur la santé et les écosystèmes [9].

Dans ce contexte, un état des lieux des substances naturelles ayant des usages pesticides et des pesticides de synthèse actuellement autorisés est nécessaire afin de déterminer si les substances naturelles peuvent effectivement constituer une alternative durable aux pesticides de synthèse. La comparaison de leurs propriétés sera basée sur les données disponibles au niveau réglementaire dans les dossiers de demande d'approbation des pesticides [10-14].

Substances naturelles et pesticides de synthèse disponibles sur le marché et leurs usages

En France, environ 250 pesticides de synthèse sont autorisés à ce jour, contre seulement 39 substances naturelles [13, 15] (tableaux I et II).

Les pesticides de synthèse présentent une grande diversité dans leur composition élémentaire et dans leur structure chimique. Il se divisent en trois catégories principales :

- les pesticides inorganiques (cuivre, soufre), qui sont les plus anciens et dont l'emploi est apparu bien avant la chimie organique de synthèse ;

Tableau I - Substances naturelles autorisées pour des usages pesticides et leurs origines [15, 17].

Végétale	Minérale	Bactérienne	Animale
6-benzyladénine ^a Acide acétique Acide caprylique Acide gibbérellique Acide indolbutyrique Acide pélagronique Acides gras ^b Eugénol Extrait d'ail Géraniol Gibbérellines ^c Heptamaloxyloglucan ^d Huile de clous de girofle Huile de colza Huile de menthe verte Huile essentielle d'orange Laminarine ^e Maltodextrine ^f Mélange de terpénoïdes ^g Pyréthrinés Thymol	Huile de paraffine Hydrogénocarbonate de potassium Phosphate ferrique Phosphonate de disodium Phosphonate de potassium Sable quartzeux Silicate d'aluminium Soufre Sulfate de fer	Abamectine ^h ABE-IT 56 ⁱ Cerevisane ^j Spinosad ^k Terre de diatomées	COS-OGA ^l Farine de sang Graisse de mouton Huile de poisson

^a Hormone végétale appartenant aux groupes des cytokinines. ^b Les produits phytopharmaceutiques à base d'acides gras à usage herbicide contiennent majoritairement de l'acide pélagronique, mais aussi de l'acide caprylique ou de l'acide caprique. Pour les usages insecticide, fongicide ou acaricide, ils contiennent des acides gras C₇ à C₁₈ et C₁₈ insaturé ou des acides gras C₇-C₂₀. ^c Hormones végétales. ^d Xyloglucan composé de 7 hexoses : 2 glucopyranosyl, 1 fucopyranosyl, 2 xylopyranosyl, 1 galactopyranosyl et 1 glucitol, principalement extrait des pommes. ^e (1→3)-β-D-glucane, extraite de l'algue brune *Laminaria digitata*. ^f Résultat de l'hydrolyse d'un amidon (blé, maïs, pois) ou d'une féculé (pomme de terre). ^g α-terpinène, p-cymène, d-limonène. ^h Mélange de plusieurs substances chimiques de la famille des avermectines, produites par la bactérie du sol *Streptomyces avermitilis*. ⁱ Composants de lysat de *Saccharomyces cerevisiae* (levure). ^j Extrait de *Saccharomyces cerevisiae* (levure). ^k Mélange de deux toxines (spinosyns A et D) sécrétées par une bactérie vivant dans le sol, *Saccharopolyspora spinosa*. ^l Le COS-OGA associe des fragments de chitosan (chitooolygosaccharides : COS) (animale) et des fragments de pectine (oligogalacturonides : OGA) (végétale).

Tableau II - Nombre de substances naturelles et de pesticides de synthèse autorisés par usage avec le détail des substances naturelles [15, 17].

Usage	Substances naturelles / Pesticides de synthèse
Herbicide + anti-mousse	5 (acide acétique, acide caprylique, acides gras, acide pélagronique + sulfate de fer) / 89
Fongicide	10 (acides gras, eugénol, géraniol, huile de clous de girofle, huile essentielle d'orange, hydrogénocarbonate de potassium, phosphonate de disodium, phosphonate de potassium, soufre, thymol) / 83
Insecticide	11 (abamectine, acides gras, huile de colza, huile essentielle d'orange, huile de paraffine, maltodextrine, mélange de terpénoïdes, pyréthrinés, silicate d'aluminium, spinosad, terre de diatomées) / 38
Acaricide	10 (abamectine, acides gras, huile de colza, huile essentielle d'orange, huile de paraffine, maltodextrine, mélange de terpénoïdes, pyréthrinés, soufre, terre de diatomées) / 14
Nématicide	1 (extrait d'ail) / 3
Molluscicide	1 (phosphate ferrique) / 1
Stimulateur de défense des plantes	6 (ABE-IT 56, cerevisane, COS-OGA, laminarine, phosphonate de disodium, phosphonate de potassium) / 1
Régulateur de croissance	5 (6-benzyladénine, acide gibbérellique, acide indolbutyrique, gibbérellines, huile de menthe verte) / 20
Répulsif	5 (farine de sang, graisse de mouton, huile de poisson, sable quartzeux, silicate d'aluminium) / 1
Protection contre le gel	1 (heptamaloxyloglucan) / 0

- les pesticides organo-métalliques ;
- les pesticides organiques, qui sont les plus nombreux et qui appartiennent à des familles chimiques variées [16].
Ces substances couvrent tous les usages pesticides existants hormis la protection contre le gel : herbicide, fongicide, insecticide, acaricide, nématicide, molluscicide... (tableau II).
Bien que le nombre de substances naturelles autorisées pour des usages pesticides soit beaucoup plus faible que celui des pesticides de synthèse, leurs structures chimiques sont elles

aussi très diversifiées : acides carboxyliques, alcanes, lactones macrocycliques (dont les avermectines)... (figure 1). La plupart de ces substances sont issues de plantes, d'autres sont d'origine minérale, et un plus petit nombre de substances provient de bactéries et d'animaux (tableau I). Ces substances naturelles permettent de couvrir tous les usages pesticides (tableau II), mais le nombre de substances par usage reste limité : par exemple, seules quatre substances ont une action herbicide (acide acétique, acide caprique, acide caprylique,

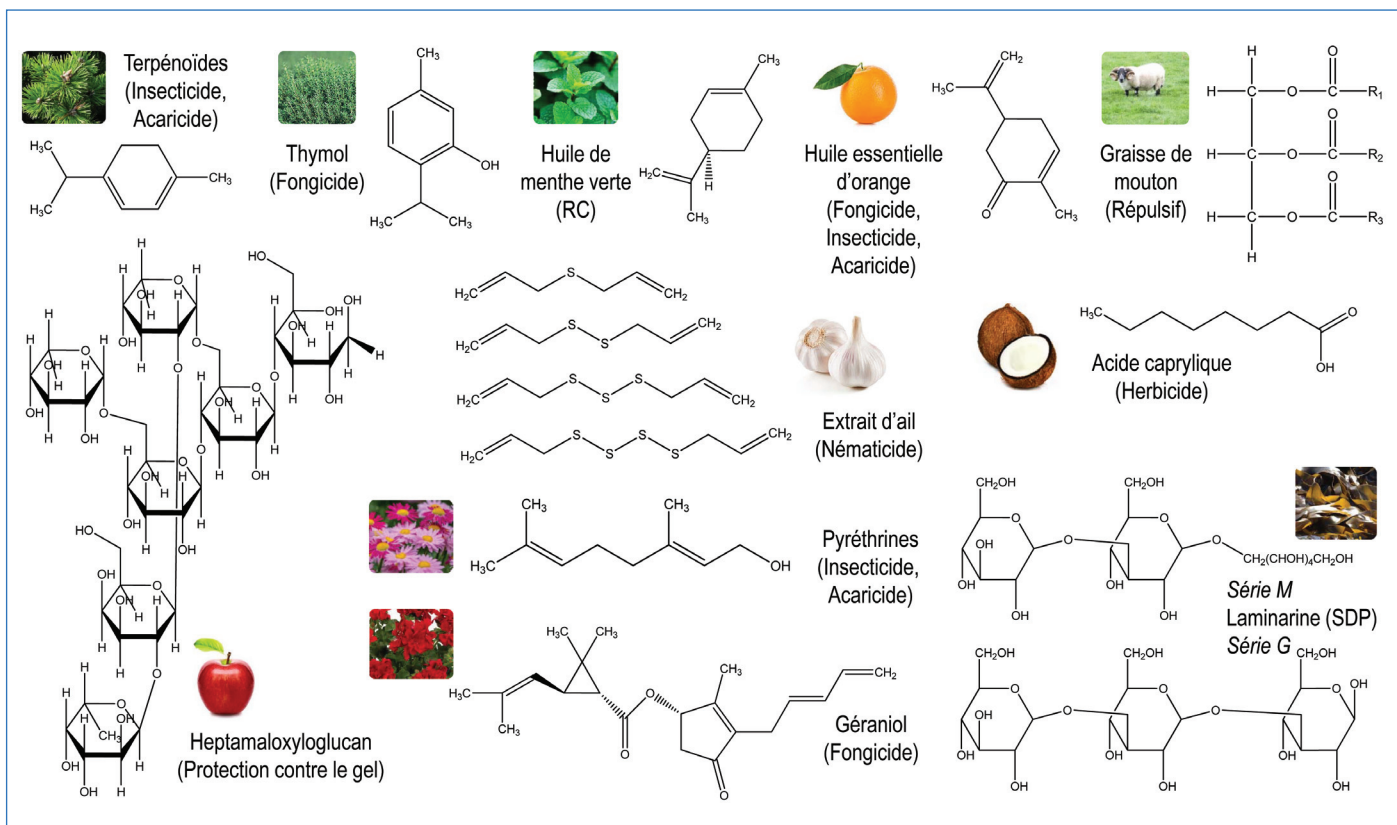


Figure 1 - Exemples de structures chimiques des substances naturelles autorisées pour des usages pesticides. RC : régulateur de croissance ; SDP : stimulateur de défense des plantes.

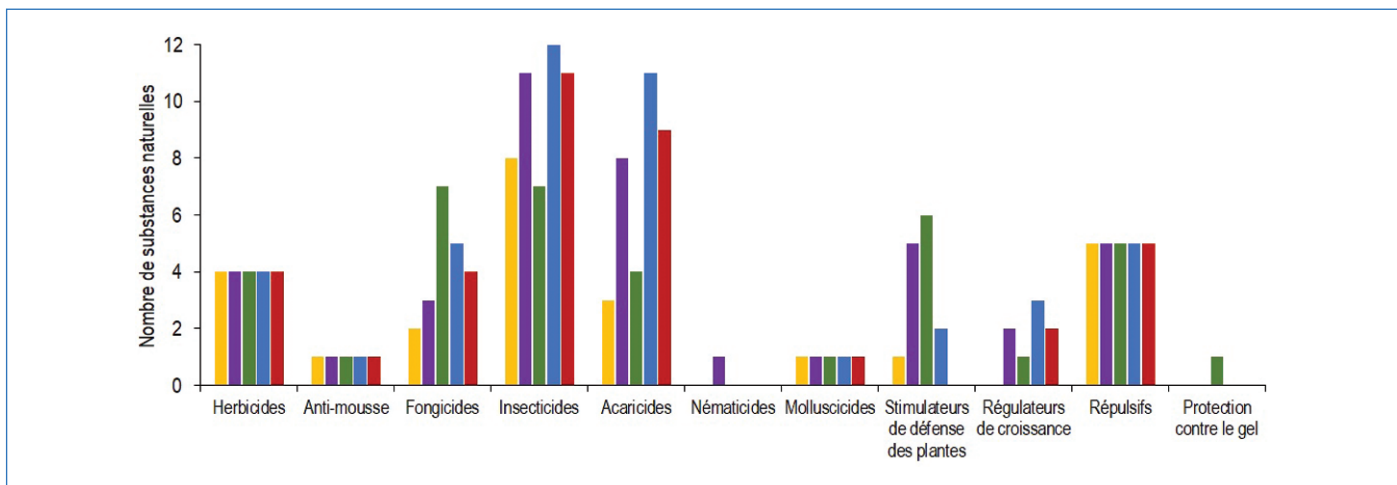


Figure 2 - Usages des substances naturelles par type de culture [17]. (■) grandes cultures ; (■) cultures légumières ; (■) viticulture ; (■) arboriculture ; (■) cultures ornementales.

acide pélagonique) (tableau II). D'autre part, pour certains types de culture et pour certains usages, aucune substance naturelle n'est autorisée : c'est le cas pour les nématicides ou pour les régulateurs de croissance (figure 2). Ainsi, comparé au nombre de pesticides de synthèse autorisés pour chaque usage, le nombre de substances naturelles disponibles est encore faible (tableau II).

Les substances naturelles classées dans les produits de biocontrôle ne sont pas toutes autorisées en agriculture biologique : aucun herbicide ne peut y être utilisé et les substances obtenues par synthèse chimique, donc pas directement extraites du milieu naturel, sont interdites (par exemple, 6-benzyladénine, abamectine, acide gibbérellique, acide indolbutyrique, gibbérellines, phosphonates ou sulfate de fer) [18].

Propriétés physico-chimiques

Les données disponibles montrent une grande variabilité des masses molaires, solubilités dans l'eau et pressions de vapeur des substances naturelles, mais ces données (solubilité dans l'eau et pression de vapeur notamment) restent manquantes pour certaines substances (maltodextrine ou huile de menthe verte, par exemple). La masse molaire varie de $60 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ pour l'acide acétique à $6\,800 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ pour la maltodextrine. La solubilité dans l'eau de substances telles que la graisse de mouton ou le sable quartzéux est nulle tandis qu'elle est très élevée pour d'autres (acide acétique : $1,05 \cdot 10^6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Enfin, certaines substances ne sont pas volatiles (COS-OGA), à l'opposé de substances comme l'acide acétique, qui a une pression de vapeur très élevée ($1,57 \cdot 10^6 \text{ mPa}$), ou de l'abamectine qui, bien qu'ayant une pression de vapeur ($3,7 \cdot 10^{-3} \text{ mPa}$)

plus faible que celle de l'acide acétique, a été identifiée comme substance hautement prioritaire à suivre dans l'air en raison de sa toxicité potentiellement élevée pour l'homme [19]. En comparaison, la variabilité de ces propriétés pour les 250 pesticides de synthèse est plus faible pour la masse molaire (de 54 à 1 089 g.mol⁻¹), mais plus élevée pour la solubilité dans l'eau (2 10⁻⁴ à 10⁶ mg.L⁻¹) et la pression de vapeur (5,1 10⁻¹² à 2,0 10⁸ mPa) [14]. Cette diversité des structures et des propriétés chimiques des substances naturelles, comme des pesticides de synthèse, va leur conférer des propriétés toxicologiques, écotoxicologiques et environnementales très différentes [16].

Propriétés toxicologiques, écotoxicologiques et environnementales

Toxicité

Au niveau réglementaire, la toxicité des pesticides (et des produits phytopharmaceutiques) pour la santé humaine est caractérisée grâce à des études d'absorption, de distribution dans les principaux organes et tissus, d'excrétion et de métabolisme chez les mammifères, de toxicité aiguë (voie orale, voie cutanée, inhalation, irritations cutanée et oculaire, sensibilisation cutanée et phototoxicité) et de toxicité à court terme (28 et 90 jours), de génotoxicité, de toxicité à long terme et de cancérogénèse, de reproduction et de neurotoxicité [10]. Sur la base de ces données, des DJA (dose journalière admissible, mg.kg⁻¹ poids corporel (pc) j⁻¹) et des NAEO (niveau acceptable d'exposition de l'opérateur, mg.kg⁻¹ pc.j⁻¹)

sont fixés pour chaque pesticide. La valeur de référence la plus utilisée actuellement pour caractériser la toxicité pour la santé humaine est le NAEO : plus elle est élevée, moins la substance est toxique.

Les NAEO ne sont pas disponibles pour toutes les substances naturelles. En effet, pour les substances « à faible risque »⁽³⁾ (laminarine, par exemple) et pour les substances alimentaires (acide acétique, huile de colza...), ils ne sont pas requis au niveau réglementaire. Pour d'autres substances, les valeurs sont actuellement manquantes et doivent être renseignées pour compléter les dossiers de demande de mise sur le marché (par exemple pour l'acide indolbutyrique).

Au final, les NAEO de 23 substances naturelles ont été comparés à ceux des 250 pesticides de synthèse (figure 3). Dans l'ensemble, les substances naturelles tendent à être moins toxiques que les pesticides de synthèse. Toutefois, certaines substances s'avèrent avoir une toxicité élevée, en particulier les insecticides abamectine, spinosad et pyréthrine. Ainsi, le caractère « naturel » d'une substance n'est pas un gage de son innocuité pour la santé humaine (figure 3).

Écotoxicité

La caractérisation de l'écotoxicité des pesticides (et des produits phytopharmaceutiques) est basée sur des études permettant de déterminer leurs effets sur les oiseaux, les organismes aquatiques (poissons, algues...), les arthropodes (abeilles notamment), les vers de terre, les micro-organismes non cibles du sol et autres organismes non cibles (flore et faune) supposés être exposés à un risque [10]. Un des aspects

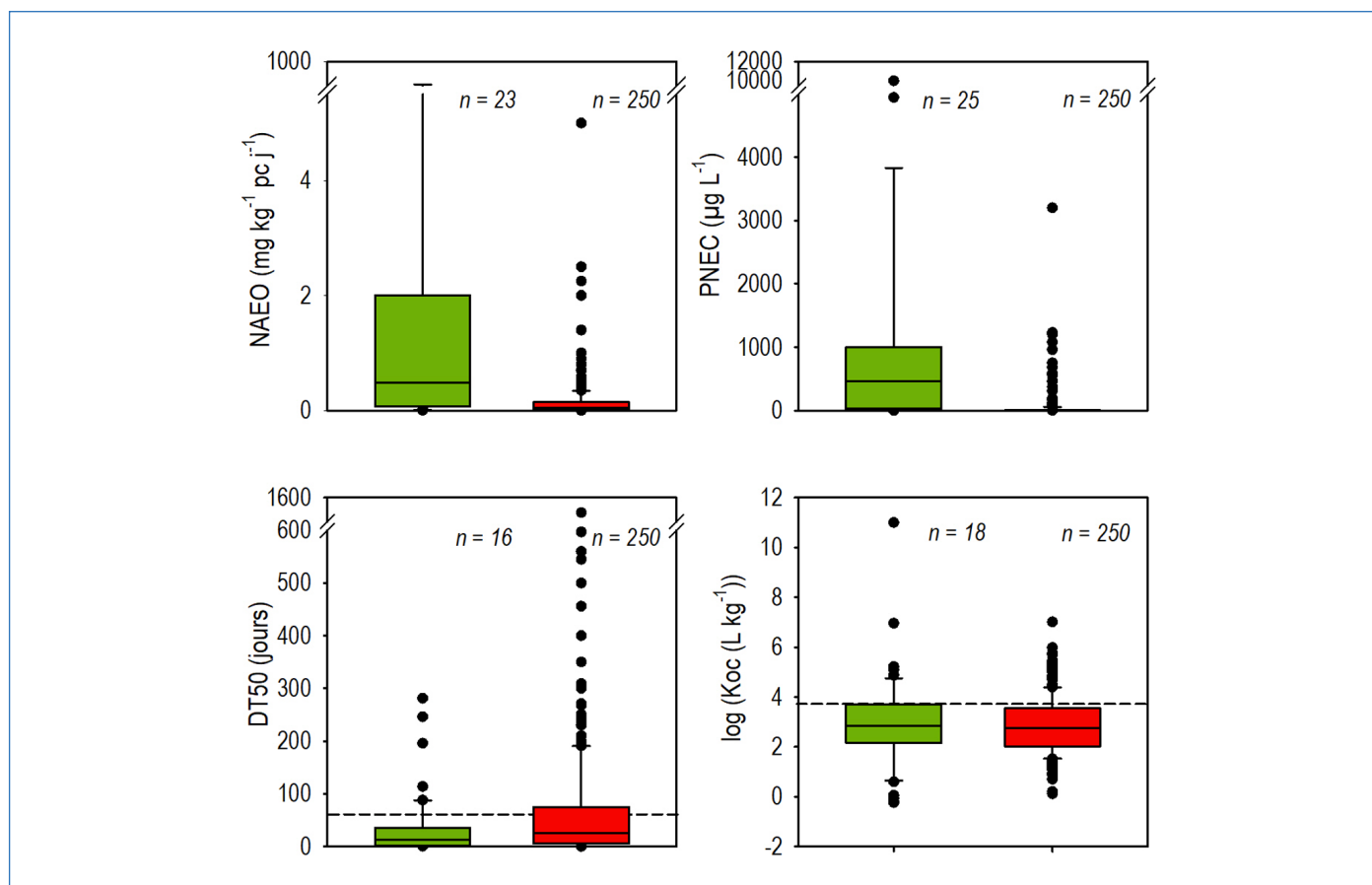


Figure 3 - Représentation en « boxplots » de la distribution des valeurs des NAEO (niveau acceptable d'exposition de l'opérateur), PNEC (concentration prévisible sans effet), DT50 (durée de demi-vie de dégradation) et Koc (coefficient de distribution d'un composé entre les phases solide et liquide du sol, rapporté à la teneur en carbone organique du sol) des substances naturelles (■) et des pesticides de synthèse (■). Les lignes pointillées représentent la limite entre substances non persistantes (DT50 < 60 jours) et potentiellement persistantes dans les sols (DT50 > 60 jours) [10] et entre substances mobiles (log Koc < 2,7) et immobiles dans les sols (log Koc > 2,7) [23].

importants de l'évaluation du risque écotoxicologique est la détermination de classes de risque aquatique (eaux de surface) qui déterminent ensuite la dimension des zones non traitées (ZNT), en bordure de cours d'eau notamment. Les données d'écotoxicité obtenues pour les différents organismes aquatiques sont utilisées pour déterminer des PNEC (« predicted no effect concentration » ou concentration prévisible sans effet, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), destinées à couvrir les impacts à court et long termes. La PNEC qui conduit au risque maximal parmi toutes les PNEC calculées (*i.e.* pour chaque type d'organisme aquatique) est retenue comme PNEC de référence, puis cette PNEC est comparée à la concentration prévisible dans l'eau (PEC_{Eau}) pour en déduire la classe de risque. Plus le rapport $\text{PEC}_{\text{Eau}}/\text{PNEC}$ est élevé, plus la classe de risque est élevée et plus la largeur de la ZNT sera importante (jusqu'à 100 mètres) [20]. Ainsi, dans ce travail, la PNEC a été retenue comme valeur de référence pour comparer l'écotoxicité des substances naturelles à celle des pesticides de synthèse. Plus la valeur de la PNEC est élevée et moins la substance est toxique pour les organismes de l'environnement. Les PNEC disponibles pour 25 substances naturelles ainsi que pour les 250 pesticides de synthèse sont présentées dans la *figure 3*. Comme pour la santé humaine, les résultats révèlent que, dans l'ensemble, les substances naturelles ont une écotoxicité plus faible que celle des pesticides de synthèse. Toutefois, de même que précédemment, les trois insecticides abamectine, spinosad et pyréthrinés présentent une écotoxicité élevée.

Persistence et mobilité dans l'environnement

L'évaluation des risques pour l'environnement nécessite de caractériser le devenir et le comportement des pesticides dans le sol, l'eau (incluant les sédiments) et l'air [10]. Le sol occupe une position centrale dans la régulation du devenir des pesticides dans l'environnement [16, 21]. En effet, lors du traitement des cultures, la majeure partie des quantités de pesticides apportées atteint le sol, soit parce que les pesticides y sont appliqués directement, soit parce que la pluie a lessivé le feuillage des plantes traitées (cultures et/ou adventices). Dans le sol, les pesticides sont affectés par différents processus qui vont conditionner leur mobilité, leur persistance, leur transfert vers les autres compartiments de l'environnement (eau, plante, atmosphère), et par conséquent leur impact potentiel sur les êtres vivants exposés. En particulier, c'est lorsque le pesticide est présent en phases liquide et gazeuse qu'il sera disponible pour être dégradé par les micro-organismes mais aussi pour être transféré vers les eaux souterraines ou vers l'air, alors qu'en phase solide, il est moins disponible et peut rester piégé dans le sol. Toutefois, dans ce dernier cas, il est susceptible d'être transféré vers les eaux de surface (cours d'eau, mares...) par érosion et ruissellement [16, 21]. Le devenir des pesticides est donc plus particulièrement contrôlé par les phénomènes de dégradation dans le sol, qui vont déterminer leur persistance dans l'environnement, et de rétention sur les constituants du sol (matières organiques, argile), qui vont déterminer leur mobilité [16, 21].

La persistance des pesticides dans le sol est généralement caractérisée par la durée de demi-vie de dégradation (DT50, j)⁽⁴⁾. Du point de vue réglementaire, lorsque la DT50 d'un pesticide mesurée en conditions contrôlées de laboratoire est supérieure à 60 jours, il est considéré comme potentiellement persistant et sa DT50 doit alors être déterminée en conditions réelles de plein champ [10]. Si, en plein champ,

la DT50 du pesticide dans le sol est supérieure à trois mois, alors il est persistant et ne peut être autorisé – à moins qu'il soit établi scientifiquement que, dans des conditions naturelles, l'accumulation dans le sol est insuffisante pour provoquer une teneur en résidus inacceptable dans les cultures ultérieures et qu'il ne se produit pas d'effets phytotoxiques inacceptables sur les cultures ultérieures ni d'impact inacceptable sur l'environnement [22].

Les DT50 mesurées au laboratoire ont été recherchées pour les 39 substances naturelles et les 250 pesticides de synthèse (le nombre de données relatives aux DT50 en plein champ est plus limité puisque leur mesure n'est pas systématiquement requise) (*figure 3*). Pour la majeure partie des substances naturelles (23), aucune valeur de DT50 n'a pu être relevée dans les dossiers réglementaires (elles doivent être fournies pour compléter les dossiers) : c'est le cas du cerevisane, de la maltodextrine, du thymol ou des substances composant le mélange de terpénoïdes. L'analyse des résultats disponibles montre que les substances naturelles tendent à être moins persistantes que les pesticides de synthèse, avec des DT50 généralement inférieures à 60 jours. Les substances les plus persistantes sont l'abamectine (DT50 maximale : 66 j), l'huile de paraffine (87 j), le spinosad (114 j) et les phosphonates (281 j) (*figure 3*). D'autre part, l'abamectine et le spinosad forment, au cours de leur dégradation, des métabolites qui peuvent être plus persistants que la substance parent [11].

La rétention des composés organiques dans les sols est classiquement caractérisée par des coefficients de distribution du composé entre les phases solide et liquide du sol. Parmi ces coefficients, l'un des plus utilisés est le Koc ($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$)⁽⁵⁾ : plus la valeur du Koc est élevée, plus la substance est retenue par les sols et moins elle est mobile, et donc moins elle sera susceptible de contaminer les eaux souterraines. La variabilité des Koc (pour 18 substances naturelles) est similaire à celle des pesticides de synthèse (*figure 3*). Certaines substances ont une mobilité élevée (en particulier l'acide acétique : Koc nul), tandis que d'autres vont être quasi immobiles dans le sol (huiles, pyréthrinés : $\text{Koc} > 30\,000\ \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$) [23]. Toutefois, si les substances peu mobiles ne présentent pas de risque élevé de contamination des eaux souterraines, elles peuvent contaminer les eaux de surface par transport particulaire suite à des phénomènes d'érosion et de ruissellement [16].

Les substances naturelles : une alternative durable aux pesticides de synthèse ?

Au niveau national, 39 substances naturelles disposent actuellement d'une autorisation de mise sur le marché pour des usages pesticides. Ces substances présentent des profils toxicologiques, écotoxicologiques et environnementaux plus favorables que ceux des pesticides de synthèse : elles tendent à avoir une toxicité plus faible pour la santé humaine et pour les organismes de l'environnement et elles sont aussi plutôt moins persistantes dans l'environnement. Cependant, le nombre de substances disponibles pour chaque type d'usage reste faible, ce qui pourrait conduire à des impasses agronomiques ou bien encore au développement de résistances (des adventices ou des insectes, par exemple) si les mêmes substances sont régulièrement appliquées [24]. Ainsi, il est nécessaire d'accroître la diversité des molécules pour limiter le recours aux pesticides de synthèse et l'apparition de résistances. D'autre part, il faut souligner que la toxicité, l'écotoxicité et la persistance dans l'environnement de certaines

substances naturelles sont élevées et que des données physico-chimiques, toxicologiques, écotoxicologiques et environnementales restent manquantes pour pouvoir complètement caractériser le comportement de ces substances. Enfin, les méthodes d'évaluation des risques qui sont actuellement utilisées au niveau réglementaire pour les substances naturelles ont été développées pour les pesticides de synthèse, notamment les méthodes basées sur l'utilisation de modèles numériques ; or il n'a pas été démontré que ces méthodes étaient adéquates, en particulier pour des produits utilisés à des doses très importantes. Des recherches sont donc nécessaires pour approfondir la caractérisation des propriétés des substances naturelles, vérifier la pertinence des méthodes d'évaluation et en développer d'autres si nécessaire. En l'état actuel des connaissances, les substances naturelles représentent une alternative prometteuse aux pesticides de synthèse, mais il est encore difficile de déterminer si elles peuvent les remplacer totalement et durablement, d'autant que l'ensemble des besoins et des usages n'est pas couvert pour le moment.

(1) D'après la définition du Règlement (CE) N° 1007/2009 [10], les produits phytopharmaceutiques sont les substances actives et les préparations contenant une ou plusieurs substances actives qui sont présentées sous la forme dans laquelle elles sont livrées à l'utilisateur. Dans le cadre de cet article, les produits phytopharmaceutiques désigneront les préparations commerciales, et les pesticides, les substances actives.

(2) Une substance de base est une substance qui n'est pas une substance préoccupante ; qui n'est pas intrinsèquement capable de provoquer des effets perturbateurs sur le système endocrinien, des effets neurotoxiques ou des effets immunotoxiques ; dont la destination principale n'est pas d'être utilisée à des fins phytosanitaires, mais qui est néanmoins utile dans la protection phytosanitaire, soit directement, soit dans un produit constitué par la substance et un simple diluant ; qui n'est pas mise sur le marché en tant que produit phytopharmaceutique (par exemple le saccharose ou l'écorce de saule) [10].

(3) Une substance est considérée comme étant à « faible risque » lorsqu'elle n'est pas cancérigène, ni mutagène, ni toxique pour la reproduction, ni persistante (DT50 dans le sol > 60 jours). D'autre part, le facteur de bioconcentration (ou bioaccumulation) doit être inférieur à 100 ; elle ne doit pas être un perturbateur endocrinien, ni avoir d'effets neurotoxiques ou immunotoxiques. Le produit phytopharmaceutique ne doit pas être sensibilisant, ni très toxique ou toxique, ni explosif, ni corrosif. Enfin, il doit être suffisamment efficace et ne pas provoquer de souffrances ou de douleurs inacceptables chez les vertébrés à combattre [10].

(4) DT50 (jours) : durée de demi-vie de dégradation qui correspond à la durée au bout de laquelle 50 % de la quantité initialement appliquée est dégradée.

(5) Koc (L.kg⁻¹) : coefficient de distribution d'un pesticide entre les phases solide et liquide du sol, rapporté à la teneur en carbone organique du sol (qui est souvent l'un des principaux facteurs conditionnant la rétention des pesticides dans les sols).

[1] D. Tilman, J. Fargione, B. Wolff, C. D'Antonio, A. Dobson *et al.*, Forecasting agriculturally driven global environmental change, *Science*, **2001**, 292, p. 281-284.

[2] D. Tilman, K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor, S. Polasky, Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature*, **2002**, 418, p. 671-677.

[3] *Agriculture at a crossroads, Global Report*, International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD), B.D. McIntyre, H.R. Herren, J. Wakhungu, R.T. Watson (eds), **2009**, www.fao.org/family-farming/detail/fr/c/286358/ (consulté le 15/12/2021).

[4] *The future of food and agriculture – Trends and challenges*, FAO, Rome, **2017**, www.fao.org/3/a-i6583e.pdf (consulté le 15/12/2021).

[5] Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 oct. 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable, *Off. J. Eur. Union*, L309, 71, **2009**.

[6] Loi 2014-1170 du 13 oct. 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000029573022&categorieLien=id (consulté le 15/12/2021).

[7] Plan Ecophyto II+, <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest> (consulté le 15/12/2021).

[8] J.P. Chomienne, S. Dutartre, M. Larguier, D. Pinçonnet, R. Tessier, *Les produits de biocontrôle pour la protection des cultures*, Rapport biocontrôle CGAER n° 16055, **2017**.

[9] D.C. Robin, P.A. Marchand, Evolution of the biocontrol active substances in the framework of the European Pesticide Regulation (EC) No. 1107/2009, *Pest. Manage. Sci.*, **2019**, 75, p. 950-958.

[10] Règlement (CE) No 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 oct. 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil, L309, **2009**.

[11] *EFSA Journal*, <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/journal/18314732> (consulté le 15/12/2021).

[12] Agritox, Base de données sur les substances actives phytopharmaceutiques, www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-agritox (consulté le 15/12/2021).

[13] EU Pesticides database, https://ec.europa.eu/food/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en (consulté le 15/12/2021).

[14] PPDB, *The FOOTPRINT pesticide properties database*, University of Hertfordshire (UK), <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/> (consulté le 15/12/2021).

[15] DGAL/SDQSPV/2021-852 du 15/11/2021 : liste des produits phytopharmaceutiques de biocontrôle, au titre des articles L.253-5 et L.253-7 du code rural et de la pêche maritime, **2021**.

[16] R. Calvet, E. Barriuso, C. Bedos, P. Benoit, M.P. Charnay *et al.*, *Les pesticides dans les sols – Conséquences agronomiques et environnementales*, Éditions France Agricole, **2005**.

[17] E-Phy, Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France, <https://ephy.anses.fr> (consulté le 15/12/2021).

[18] Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologique (ITAB), www.itab.asso.fr (consulté le 15/12/2021).

[19] M. Hulin, C. Leroux, A. Mathieu, A. Gouzy, A. Berthet *et al.*, Monitoring of pesticides in ambient air: prioritization of substances, *Sci. Tot. Environ.*, **2021**, 753, 141722.

[20] Arrêté du 4 mai 2017 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et de leurs adjuvants visés à l'article L. 253-1 du code rural et de la pêche maritime, Texte 115 sur 192, 7 mai 2017, *J. Off.*, **2017**.

[21] E. Barriuso, R. Calvet, M. Schiavon, G. Soulas, Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation, *Etude Gestion Sols*, **1996**, 3, p. 279-296.

[22] Règlement (UE) No 546/2011 de la Commission du 10 juin 2011 portant application du règlement (CE) No 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les principes uniformes d'évaluation et d'autorisation des produits phytopharmaceutiques, L155/127, **2011**.

[23] P.J. McCall, R.L. Swann, D.A. Laskowski, S.M. Unger, S.A. Vrona *et al.*, Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **1980**, 24, p. 190-195.

[24] M. Siegwart, B. Graillet, C. Blachere Lopez, S. Besse *et al.*, Resistance to bio-insecticides or how to enhance their sustainability: a review, *Front. Plant Sci.*, **2015**, 6, art. 381.

Laure MAMY*, directrice de recherche, et **Enrique BARRIUSO**, directeur de recherche, INRAE, UMR ECOSYS (Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes), Thiverval-Grignon.

* laure.mamy@inrae.fr ; enrique.barriuso@inrae.fr