Apports de la chimie dans l'agriculture (2/2) : les produits phytosanitaires

Publié le 03.04.17 | Par Amicie Delahaie

Cet article en deux volets présente l'apport de la chimie dans l'agriculture moderne, en s'attachant plus particulièrement à décrire :

- **la synthèse et l'impact des engrais azotés sur le rendement des cultures (1er volet) ;**
- **la synthèse et l'impact des produits phytosanitaires sur le rendement des cultures (2ème volet, ci-dessous).**

1. Définitions

Les **pesticides** sont des produits chimiques destinés à lutter contre certains organismes indésirables (les « pestes »), qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, de champignons ou de bactéries. Ils tirent leur nom des mots latins *caedere* (signifiant « tuer ») et *pestis* (signifiant « fléau »).

Le terme pesticides regroupe plusieurs catégories de produits :

- les **biocides**, définis comme les substances actives ou produits « destinées à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière, par une action chimique ou biologique », en milieu non agricole ;
- les **produits phytosanitaires ou phytopharmaceutiques**, substances utilisées pour lutter contre les organismes nuisibles aux cultures, qui visent à éliminer ou prévenir les maladies pouvant se développer chez les végétaux, en milieu agricole ou non ;
- les antiparasitaires à usage humain et vétérinaire.

Accordeon
Titre
Pour en savoir plus sur la définition des biocides d'après la réglementation européenne [2]
Texte
D'après le règlement européen n° 528/2012, il existe 22 types de produits biocides répartis en 4 groupes :

- les désinfectants (hygiène humaine ou animale, désinfection des surfaces, désinfection de l'eau potable...),
- les produits de protection (produits de protection du bois, des matériaux de construction....),
- les produits de lutte contre les nuisibles (rodenticides, insecticides, répulsifs...),
- les autres produits biocides (fluides utilisés pour l'embaumement, produits antisalissures).

Pour en savoir plus sur la définition des produits phytosanitaires d'après la réglementation européenne [1]

Les produits phytosanitaires ou phytopharmaceutiques sont définis par le réglement européen n° 1107/2009 comme les « produits, sous la forme dans laquelle ils sont livrés à l'utilisateur, composés de substances actives, phytoprotecteurs ou synergistes, ou en contenant, et destinés à l'un des usages suivants :

- protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles ou prévenir l'action de ceux-ci, sauf si ces produits sont censés être utilisés principalement pour des raisons d'hygiène plutôt que pour la protection des végétaux ou des produits végétaux ;
- exercer une action sur les processus vitaux des végétaux, telles les substances, autres que les substances nutritives, exerçant une action sur leur croissance ;

- assurer la conservation des produits végétaux, pour autant que ces substances ou produits ne fassent pas l'objet de dispositions communautaires particulières concernant les agents conservateurs ;
- détruire les végétaux ou les parties de végétaux indésirables, à l'exception des algues à moins que les produits ne soient appliqués sur le sol ou l'eau pour protéger les végétaux ;
- freiner ou prévenir une croissance indésirable des végétaux, à l'exception des algues à moins que les produits ne soient appliqués sur le sol ou l'eau pour protéger les végétaux.

La suite de cet article traite des ***produits phytosanitaires***, dont l'utilisation a permis une amélioration considérable des conditions de vie dans les sociétés contemporaines, en assurant aux populations un apport en nourriture plus stable et plus important, permettant ainsi de s'affranchir des famines.

2. Les produits phytosanitaires

À la différence des engrais, qui améliorent le rendement de culture en favorisant la croissance de la plante d'intérêt *via* un apport en nutriments, les produits phytosanitaires peuvent également améliorer ce rendement :

- soit en empêchent sa destruction par des organismes indésirables, tels que les champignons ou les insectes ;
- soit en favorisant sa croissance *via* l'élimination d'autres plantes (dont la présence n'est pas souhaitée) qui pourraient pousser à son voisinage et prélever une partie des ressources nécessaires à la plante d'intérêt.

Certains produits phytopharmaceutiques sont très complexes et réservés à l'agriculture intensive ; d'autres sont d'usage commun jusque dans nos jardins, comme la bouillie bordelaise, à base d'ions cuivre (II).

Les **produits phytopharmaceutiques ou phytosanitaires** sont constitués de trois principales catégories :

- les **fongicides**, qui combattent les champignons et les moisissures susceptibles de se développer sur les plantes ;
- les **insecticides** qui visent à éliminer les insectes (adultes, juvéniles ou larves) se nourrissant des cultures ;
- les **herbicides**, qui luttent contre les « mauvaises » herbes (aussi appelées *adventices*). Pour rappel, le terme « mauvaise herbe » ne saurait être assimilé à une catégorie de plantes ; il s'agit simplement d'une plante qui pousse là où l'on ne souhaite pas sa présence. Un rosier dans un champ de choux est une mauvaise herbe au même titre que des pissenlits dans une roseraie.

Nous présentons ci-après quelques fongicides, insecticides et herbicides, ainsi que leur mode d'action, sans viser une liste exhaustive.

2.1. Fongicides

Les fongicides sont destinés à empêcher l'attaque des végétaux par des champignons (prévention) et le cas échéant à éliminer les champignons déjà présents sur la plante (destruction). La plupart des fongicides sont à base de métaux (le cuivre dans la bouillie bordelaise par exemple, voir ci-après), de soufre ou de produits soufrés (thiocarbamates). Ces fongicides peuvent agir de plusieurs manières : certains attaquent les spores des champignons pour stopper leur expansion ; d'autres empêchent la respiration cellulaire dans les mitochondries ; d'autres enfin affectent la synthèse des composés (acides aminés par exemple) nécessaires au champignon. Certains fongicides sont produits naturellement par certaines espèces pour se protéger.



Figure 1 - Poudre de sulfate de cuivre pentahydraté utilisé dans la préparation de la bouillie bordelaise.

Auteur(s)/Autrice(s) : Wikipédia – Licence : Domaine public – Source : Wikimedia

La bouillie bordelaise tire son nom de ses premières utilisations, dans la région de Bordeaux, où les vignerons l'appliquaient sur les ceps de vigne en bord de route pour éviter que leur raisin ne soit volé . Il s'agit d'un mélange de sulfate de cuivre (II) pentahydraté, de formule $CuSO_4$, 5 H_2O, et de chaux éteinte (hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$). Auparavant commercialisée sous forme de solution aqueuse, elle est aujourd'hui vendue en poudre (de couleur bleue) et mêlée à un surfactant, souvent du savon, pour améliorer sa tenue sur les végétaux.

Les ions cuivre qu'elle contient bloquent les enzymes des spores des champignons et empêchent leur germination. Elle est utilisée préventivement et est très sensible au lessivage par les eaux de pluie.

2.2. Insecticides

Les insecticides peuvent agir sur l'insecte adulte ou juvénile, ou sur les œufs et les larves.

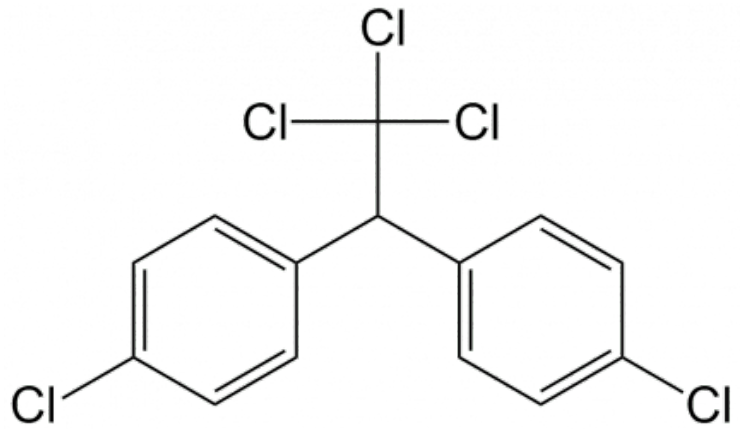

Figure 2 - Structure du DDT

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

Ils se répartissent en plusieurs grandes familles en fonction de leur mode d'action. Des dérivés organochlorés (tels que le dichlorodiphényltrichloroéthane, communément désigné par DDT), des dérivés organophosphorés et certains carbamates sont neurotoxiques et bloquent l'influx nerveux, conduisant à la paralysie et à la mort de l'insecte.

Suite à l'interdiction des insecticides organochlorés (dont le DDT) dans les années 1970, les produits organophosphorés et les pyréthrinoïdes se sont développés et constituent aujourd'hui une part importante du marché.

Les pyréthrinoïdes de synthèse sont les analogues synthétiques des pyréthrines, qui sont des substances naturelles présentes dans les fleurs de certains chrysanthèmes, comme le pyrèthre de Dalmatie.



Figure 3 - Pyrèthre de Dalmatie (Tanacetum cinerariifolium), dont les pyréthrines peuvent être extraites

Auteur(s)/Autrice(s) : Wikipédia – Licence : Domaine public – Source : Wikimédia

Ils ont un mode d'action analogue aux insecticides organochlorés et organophosphorés, avec pour cible le système nerveux des insectes.

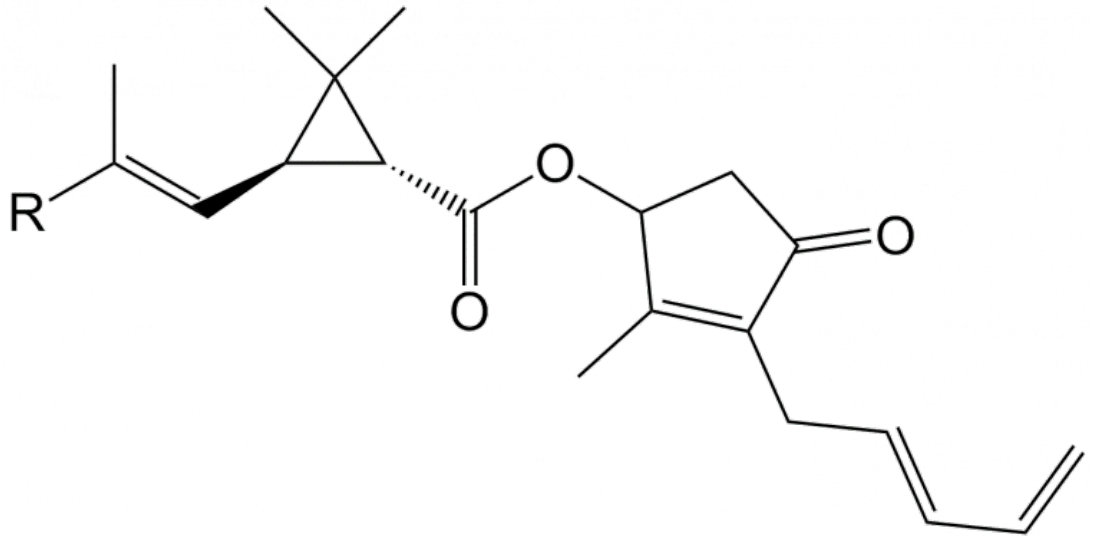

Figure 4 - Structure des pyréthrines (Pyréthrine I, R = CH_3 et Pyréthrine II, R = CO_2CH_3).

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

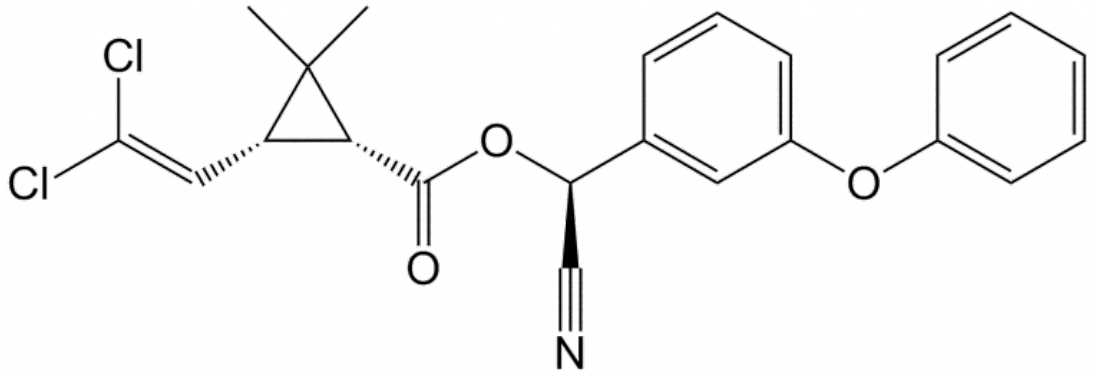

Figure 5 - Structure de la cyperméthrine, un exemple de pyréthrinoïde de synthèse.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

Les benzoylurés perturbent la formation de la chitine, polymère qui constitue l'exosquelette des insectes et assure leur protection et leur survie. Lors de la mue suivant le contact avec le produit, l'insecte meurt.

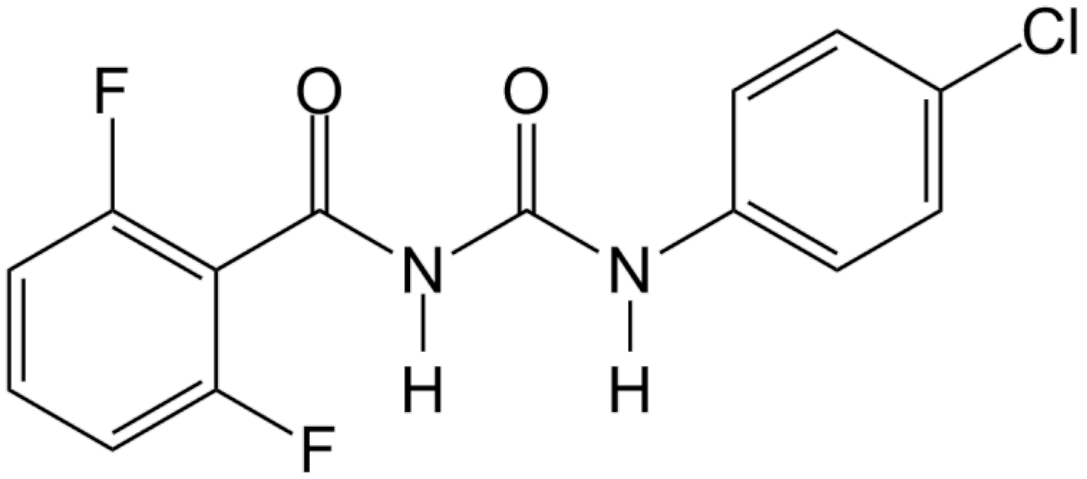

Figure 6 - Structure du Diflubenzuron, insecticide de la famille des benzoylurées.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

2.3. Herbicides

Les herbicides, ou désherbants, ont la propriété de tuer les végétaux. Certains sont spécifiques d'une plante, d'autres tuent sans distinction toutes les espèces végétales qu'ils touchent.

Certains herbicides tuent la plante entière ; d'autres, appelés **défanants**, n'attaquent que les feuilles : ces derniers sont particulièrement utilisés pour la récolte des pommes de terre, en permettant d'éliminer les feuilles pour mieux accéder aux tubercules.

Leurs modes d'action sont variables. Certains herbicides inhibent la photosynthèse, comme les urées substituées ou les triazines.

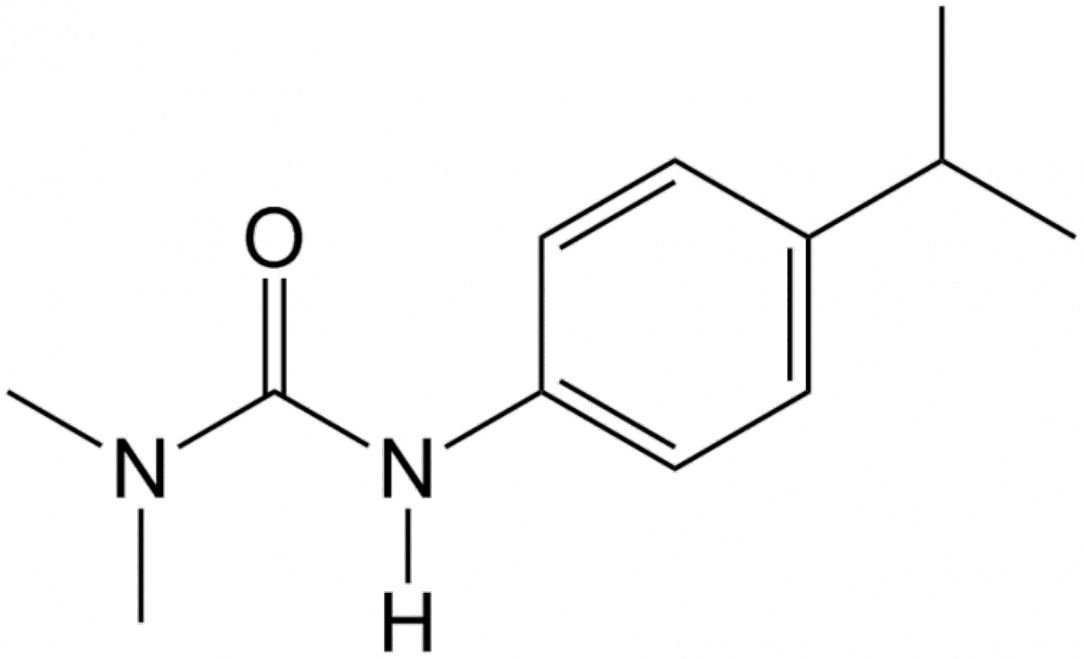

Figure 7 - Structure du 3-(4-isopropylphényl)-1,1-diméthylurée ou isoproturon, herbicide appartenant à la famille des urées substituées.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie – Licence : CC-BY-SA

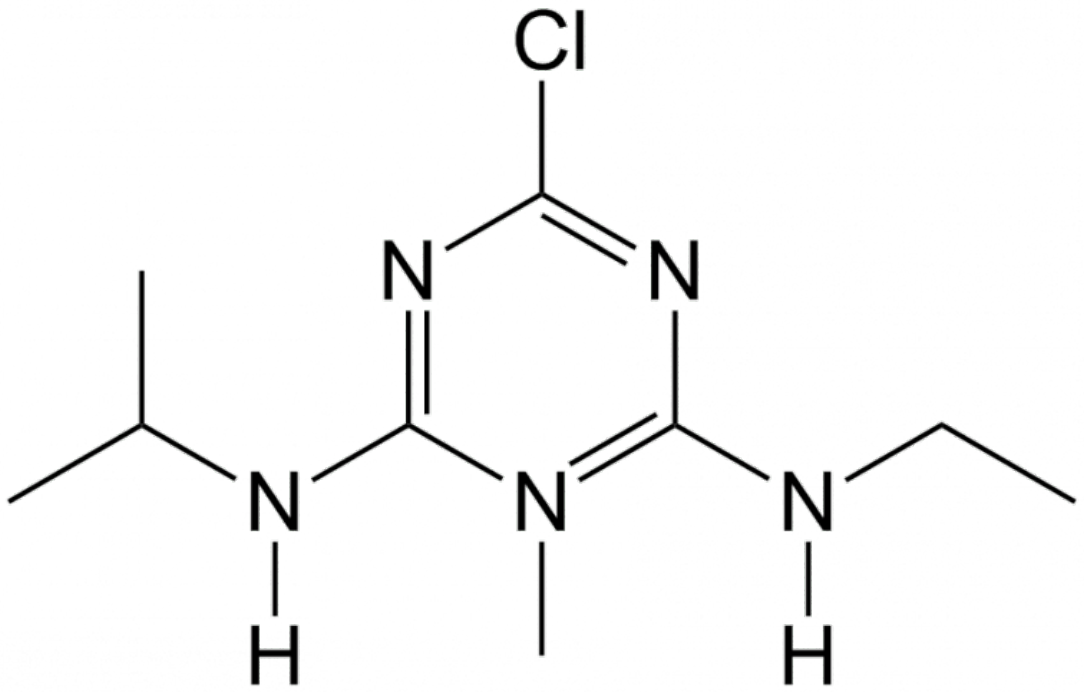

Figure 8 - Structure de l'atrazine, herbicide appartenant à la famille des triazines.
L'atrazine bloque le transport d'électrons au sein du système photo-synthétique, rendant ainsi impossible la conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique et conduisant à la mort cellulaire (son utilisation comme produit phytosanitaire est interdite en France depuis 2003).

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

D’autres bloquent la synthèse des molécules nécessaires à la plante (imidazolinones, sulfonylurées) ou provoquent la nécrose des tissus végétaux.

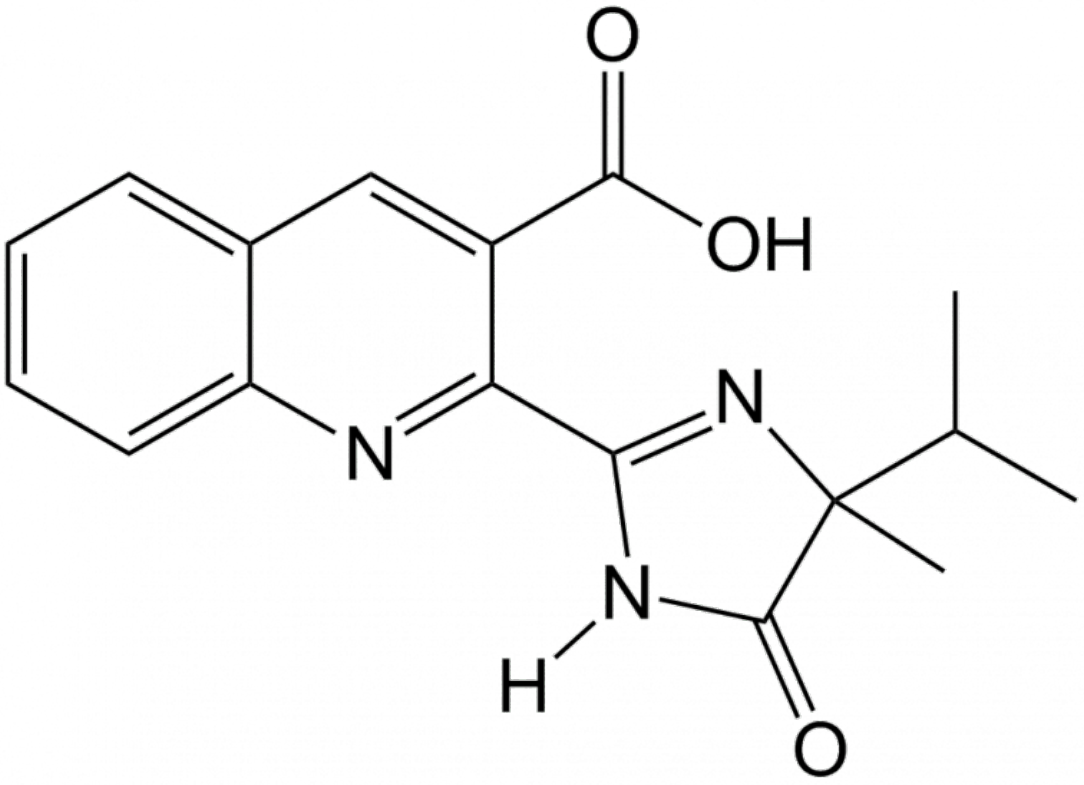

Figure 9 - Structure de l’Imazaquin, herbicide de la famille des imidazolinones, qui inhibe une enzyme appelée acétolactate synthase, impliquée dans la synthèse de certains acides aminés.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie



Figure 10 - Pulvérisateur de Roundup®

Un herbicide bien connu du grand public est le Roundup®, commercialisé par l'entreprise Monsanto, dont le principe actif est le glyphosate, (N-(phosphométhyl)glycine), de formule $C_3H_8NO_5P$. Il s'agit d'un herbicide non sélectif, absorbé assez médiocrement par les feuilles des plantes et qui induit la mort des cellules végétales, en bloquant la biosynthèse des acides aminés aromatiques.

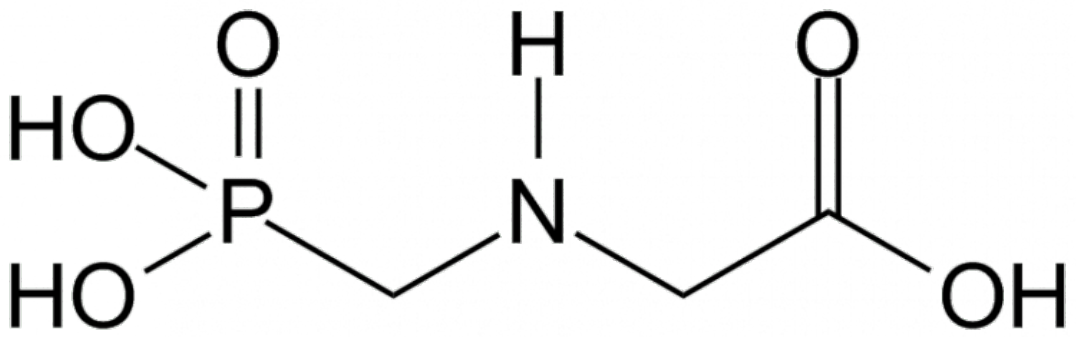

Figure 11 - Structure du glyphosate

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

3. Apport de la chimie de synthèse : exemple de la synthèse du DDT

La chimie, *via* la synthèse, a permis le développement d'une grande variété de pesticides au cours de la 2e moitié du XXe siècle. Parmi eux, citons le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), l'un des premiers pesticides « modernes ».

Les premières synthèses du dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) datent du XIXe siècle mais ce n'est qu'au cours des années 1930 que ses propriétés insecticides sont mises en évidence. Il est synthétisé à grande échelle à partir de la Seconde Guerre Mondiale (notamment pour approvisionner les Alliés), à partir de chlorobenzène et de trichloroacétaldéhyde (chloral), en présence d'acide sulfurique et à chaud, *via* une double substitution électrophile aromatique :

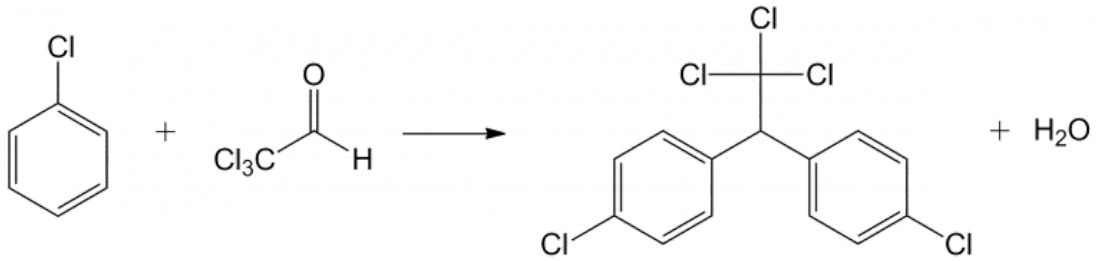

Figure 12 - Équation-bilan de la synthèse du DDT.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

Il se présente sous forme de cristaux incolores ou de poudre blanche, peu solubles dans l'eau mais très solubles dans les huiles, matières grasses et solvants organiques.

Il a été utilisé massivement à partir de la Seconde Guerre Mondiale pour lutter contre un très large panel de nuisibles, en milieu agricole ou non, tels que poux, puces, vers, mais aussi contre le moustique anophèle, vecteur du paludisme. Il était dissous dans un solvant hydrophobe ; la solution obtenue était ensuite pulvérisée, soit à l'intérieur des maisons pour éradiquer les insectes vecteurs de maladie, soit sur les cultures lors d'un usage agricole.

4. Risques sanitaires : une exposition importante et des risques mal connus

La France est le premier consommateur européen de produits phytosanitaires (parce que premier producteur agricole européen), et le quatrième au niveau mondial. On trouve en France plus d'un millier de produits commerciaux, basés sur environ 500 substances actives. Toutefois, leur utilisation est de plus en plus controversée à cause des suspicions de maladies qui pourraient y être associées, en particulier divers cancers. De plus, ils seraient alors dangereux non seulement pour les agriculteurs qui les utilisent, mais également pour les consommateurs (présence dans les végétaux consommés) et l'environnement (dispersion dans le sol, l'atmosphère et les cours d'eau). Des études sur les liens qui pourraient exister entre pesticides et problèmes de santé sont en cours.

L'exposition aux pesticides passe par des voies diverses. En effet, outre l'exposition directe des agriculteurs lors de l'épandage des pesticides, nous faisons face à une exposition indirecte dans la mesure où ces substances se retrouvent dans plusieurs systèmes : réseau aquatique, atmosphère, plantes, denrées alimentaires... Par ailleurs, différents mécanismes interviennent dans la dispersion de ces substances à travers l'environnement : mode d'application des produits, propriétés physico-chimiques, climat, composition du sol...

L'Institut Français de l'Environnement réalise chaque année depuis 1998 un bilan de la contamination des systèmes aquatiques, extérieurs et souterrains ; ces bilans montrent que présence de pesticides est avérée à des taux plus ou moins élevés dans tous les milieux aquatiques. Ainsi, en 2006, on a relevé une contamination aux pesticides dans 90 % des points contrôlés en surface et 55 % des points contrôlés souterrains, bien que les mesures aient révélé des taux parfois très faibles. Ceci met en lumière une

contamination générale du réseau aquatique, avec un nombre très important de produits (pas moins de 265 composés différents ont été retrouvés à certains endroits) [3]. On y trouve notamment le carbofuran (insecticide de la famille des carbamates), la cyperméthrine, le glyphosate, l'acide pélargonique (ou acide nonanoïque), la terbuthylazine (herbicide de la famille des triazines)...

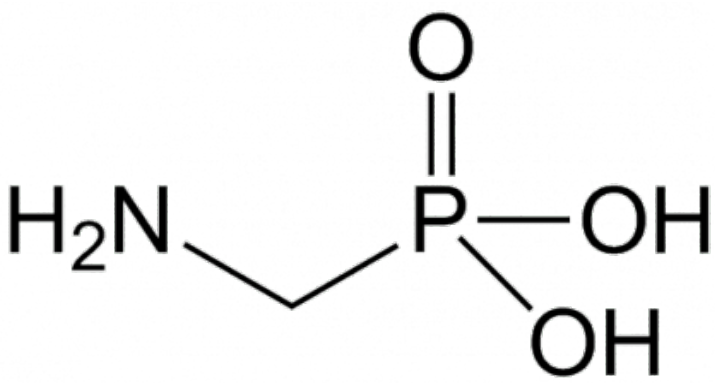

Figure 13 - Structure de l'acide aminométhylphosphonique.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

Les 15 molécules de pesticides les plus quantifiées dans les cours d'eau de France métropolitaine en 2011 sont en majorité des herbicides ou leurs produits de dégradation (appelés aussi métabolites). La dégradation de certains pesticides en milieu aqueux (souvent leur oxydation et hydrolyse) peut en effet conduire à l'obtention de sous-produits plus persistants encore que les pesticides eux-mêmes : c'est le cas par exemple pour le glyphosate, dégradé en acide aminométhylphosphonique.

Glyphosate et acide aminométhylphosphonique persistent dans l'argile du sol et sont relargués lors des fortes pluies ; ils suivent ensuite le cycle de l'eau dans les eaux de surface. Un rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques datant de 2010 indique que le glyphosate et l'acide aminométhylphosphonique sont les principaux contaminants dans les cours d'eau et la principale cause de déclassement des eaux en France [3].

En outre, l'analyse des eaux souterraines permet de retrouver des substances parfois utilisées il y a plusieurs dizaines d'années, car ces composés mettent beaucoup de temps à descendre en profondeur dans le sol pour atteindre les eaux souterraines, et ont de plus des durées de vie parfois très longues. Moins les roches sont perméables, moins les pesticides peuvent pénétrer le sol : cela explique, à contamination de surface égale, la qualité des eaux souterraines dans certaines zones, par exemple en Bretagne, où celle-ci est bien meilleure que celle des eaux de surface grâce à la faible perméabilité des roches du sous-sol.

Dans le but de protéger la population, des limites de qualité sont fixées dans les eaux brutes et dans l'eau au robinet du consommateur :

Récapitulatif des limites de qualité dans les eaux brutes et dans l'eau du robinet (source : Observatoire des Résidus de Pesticides [4])

Dans les ressources en eau	Au robinet du consommateur
2 µg/L pour chaque pesticide	0,10 µg/L pour chaque pesticide (à l'exception de l'aldrine, la dieldrine, l'heptachlore et de l'heptachloroépoxyde : 0,03 µg/L)
5 µg/L pour le total des substances mesurées	0,50 µg/L pour le total des substances mesurées

Au-delà de ces valeurs, l'eau brute ne peut pas être utilisée pour produire de l'eau potable, sauf autorisation exceptionnelle délivrée par le préfet après avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF).

La contamination aux pesticides se retrouve non seulement dans les sols et les milieux aquatiques, mais également dans l'atmosphère, soit lors de leur application (par pulvérisation notamment), soit du fait d'une volatilisation de certaines substances au niveau du sol. Toutefois, cette présence est encore peu et mal étudiée, et donc non quantifiée.

5. Conclusion et perspectives : utiliser moins de produits phytosanitaires et dépolluer

L'usage des produits phytosanitaires, apparus sur le marché au milieu du XXe siècle, a permis d'augmenter les rendements des terres agricoles et de générer une nourriture abondante et peu chère. Par voie de conséquence, cela a également permis de limiter la déforestation. Cependant, compte tenu du degré de contamination des écosystèmes, il apparaît important de réduire les quantités de pesticides utilisées et de trouver des moyens efficaces de dépollution.

C'est dans cette optique qu'a été lancé en 2008 le plan gouvernemental EcoPhyto, qui vise à réduire et améliorer l'usage des produits phytosanitaires, en impulsant une agriculture « raisonnée », par opposition à l'agriculture « intensive ». Dans ce cadre, des recherches conduites par l'Inra ont mené à des résultats, publiés tout récemment dans *Nature Plants* (le 27 février 2017), montrant qu'une réduction significative des produits phytosanitaires est possible sans diminution des rendements de culture, à condition de modifier les pratiques agricoles [5].

5.1. Dépollution par des bactéries

Concernant la dépollution, l'une des méthodes envisagées est l'utilisation de bactéries résistantes aux produits phytosanitaires et capables de les dégrader. Par exemple, dans le cadre du projet Life-PHYTOBARRE, soutenu par le programme européen Life, qui vise à sensibiliser la communauté agricole à la réduction de son impact environnemental, une équipe de chercheurs du CEA de Cadarache (13) a démontré l'efficacité d'un système de traitement des effluents phytopharmaceutiques par des bactéries photosynthétiques sélectionnées. Les souches bactériennes utilisées sont issues de l'environnement (non transformées) et non pathogènes; leur activité a été testée vis-à-vis des effluents issus du rinçage des outils utilisés pour épandre les produits phytosanitaires. Des expériences réalisées au sein d'exploitations agricoles en 2014 et 2015 ont montré que ces bactéries étaient capables de dégrader une centaine de substances actives et qu'en moyenne 80 % de la quantité totale de produits phytopharmaceutiques présente dans les effluents est absorbée.

Daniel GARCIA, membre de cette équipe de chercheurs du CEA, présente ce procédé de façon ludique et accessible au grand public, dans le cadre du concours « 3 minutes pour une invention », organisé par le CEA. Son intervention a obtenu le prix du jury.



5.2. Phytoremédiation

Une autre méthode de dépollution des sols ou des eaux usées est la **phytoremédiation**, technique déjà utilisée pour les friches industrielles par exemple. Elle repose sur la capacité de certaines plantes, alliées à des micro-organismes, à dégrader ou immobiliser des polluants comme les métaux lourds. Ces végétaux peuvent capturer les éléments-traces métalliques et d'autres substances inorganiques, ou des substances organiques, solvants, molécules xénobiotiques ou non. Une molécule **xénobiotique** est une substance présente dans un organisme vivant qui n'est ni produite par celui-ci ni apportée par son alimentation habituelle : typiquement, les pesticides ou les médicaments sont des xénobiotiques apportés par l'alimentation bien que leur présence dans cette dernière soit anormale. Certaines plantes peuvent métaboliser certains de ces xénobiotiques et ainsi les valoriser dans leur processus de croissance. D'autres vont simplement les capter et les stocker dans leurs tissus. Les polluants ainsi immobilisés deviennent inoffensifs pour l'environnement proche.

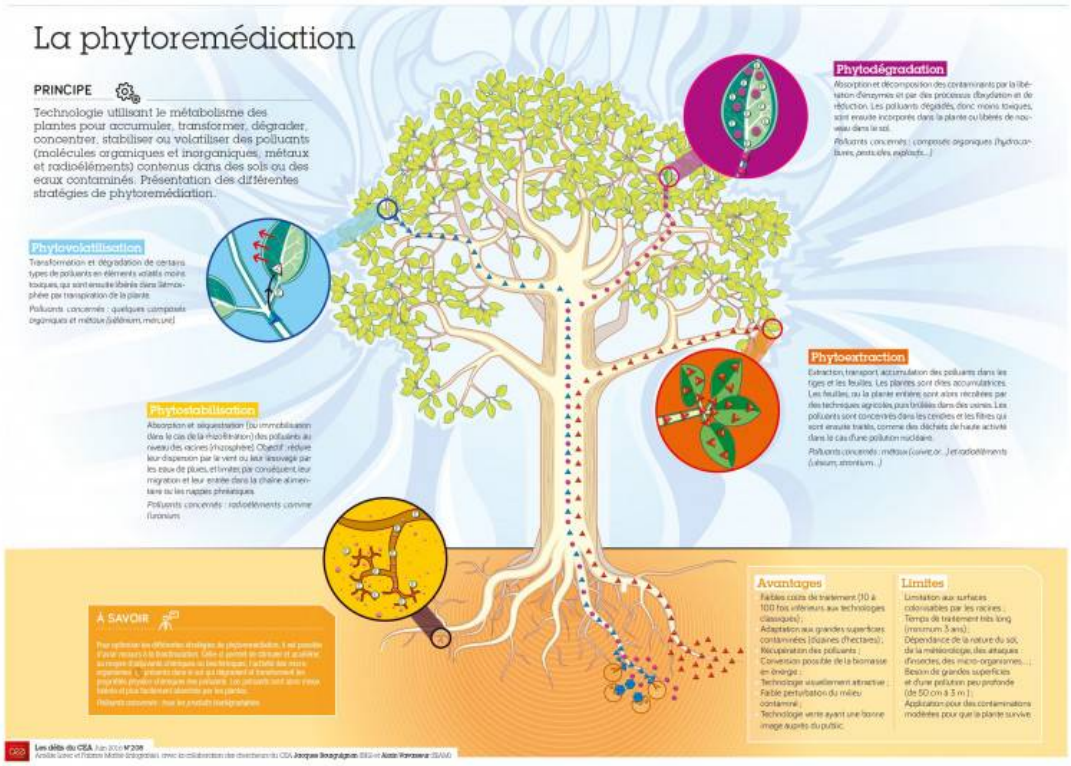

Figure 14 - Les grands principes de la phytoremédiation

Auteur(s)/Autrice(s) : F.Mathé / Les Défis du CEA – Source : CEA

5.2.1. La phytoremédiation expliquée au jeune public

Le magazine « Les Savanturiers », publié par le CEA, propose une infographie et une animation expliquant la phytoremédiation adaptées au jeune public.

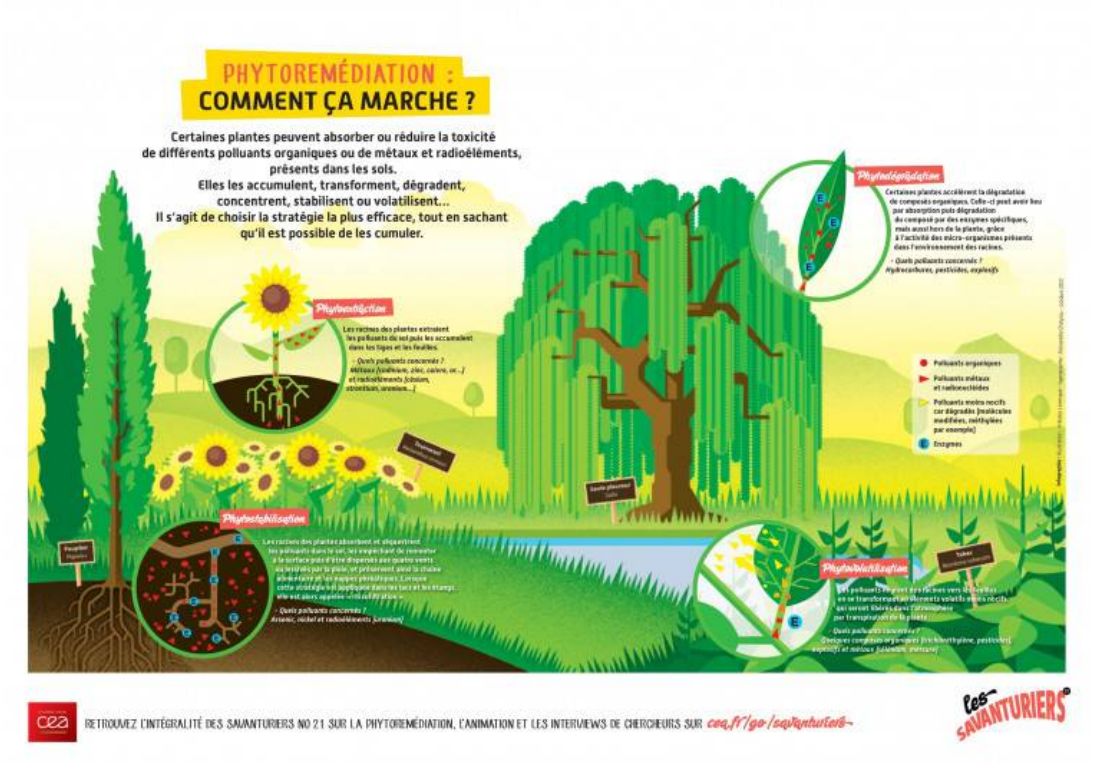

Figure 15 - La phytoremédiation : commment ça marche ?

Auteur(s)/Autrice(s) : Les Savanturiers (CEA) – Source : CEA

fin de faciliter l'opération de traitement du sol et/ou des eaux souterraines, les plantes utilisées en **phytoremédiation** doivent avoir une croissance rapide, être résistantes et faciles à planter et à entretenir, pouvoir évacuer beaucoup d'eau par les feuilles, et bien entendu avoir la capacité de stocker les polluants ou de les transformer en produits non ou moins toxiques. La transpiration de ces plantes, évacuant de l'eau par les feuilles, participe, avec l'évaporation de l'eau au niveau du sol, au phénomène d'**évapotranspiration**, transfert de l'eau du niveau terrestre vers l'atmosphère. Plus l'évapotranspiration est grande, plus l'eau souterraine aura tendance à monter vers les racines des plantes, favorisant un transfert plus rapide des polluants qu'elle contient vers les plantes chargées de les dégrader ou de les stocker. La durée du processus de dépollution est ainsi réduite.

La technique de phytoremédiation la plus utilisée est la **phytoextraction**, aussi appelée **phytoaccumulation**. Elle met en jeu des plantes pouvant stocker les polluants, qui sont appelées **hyperaccumulateurs**.

Tableau regroupant les différentes plantes utilisée en phytoremédiation et la nature de l'espèce chimique piégée ou dégradée.

Espèce piégée/dégradée	Plantes
Arsenic	Agrostide capillaire, commune, de Castille ou élégante, fougère à feuilles longues
Cadmium	Fougère, avoine, chou, tournesol, jacinthe d'eau, petite lentille d'eau, osier vert
Chrome	Colza, osier, hydrilla, bassie à balais, lenticule à nombreuses racines
Cuivre	Fougère, tape grass, tournesol, petite lentille d'eau, tabouret des bois
Mercure	Colza, hydrilla, bassie à balais, osier
Nickel	Lenticule à nombreuses racines, tabouret des bois, chou faux
Plomb	Agrostide de Castille, fougère, colza, chou ornemental, hydrilla, tournesol, osier vert, tabouret des bois,
Uranium	Amaranthe, jacinthe d'eau, tournesol, juniper, épicéa noir, chêne, osier vert, maïs doux
Zinc	Agrostide de Castille, fougère, colza, tournesol, petite lentille d'eau, osier, tabouret des bois, trèfle rouge
Hydrocarbures	Pins (*pinus*), osier-saule (*salix spp.)*

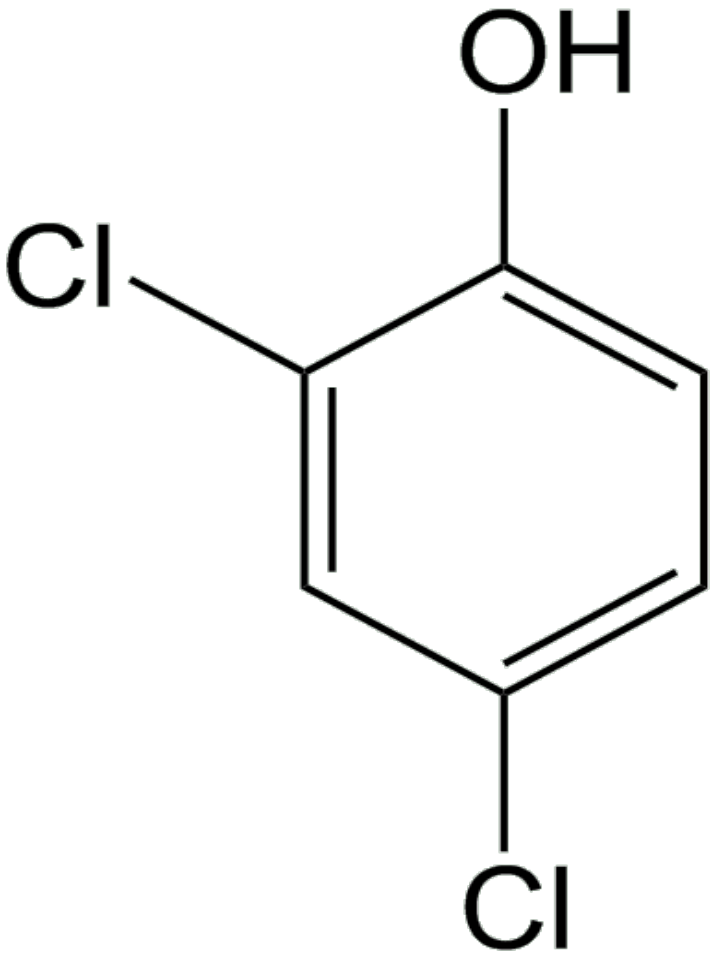

Figure 16 - Structure du 2,4-dichlorophénol.

Auteur(s)/Autrice(s) : CultureSciences-Chimie

La phytoremédiation appliquée aux pesticides est un sujet de recherche assez récent. À titre d'exemple, des études en laboratoire ont montré qu'une culture de *Brassicanapus* (colza) en présence d'une solution contenant du 2,4-dichlorophénol (produit de dégradation de pesticides) était capable d'en extraire jusqu'à 90 %, en fonction du pH [6].

La phytoremédiation appliquée aux herbicides est plus délicate dans la mesure où l'herbicide à piéger ou dégrader est susceptible de tuer la plante utilisée pour la phytoremédiation. Toutefois, dans le cas de l'atrazine par exemple, des recherches récentes ont montré que certaines plantes devenues résistantes à cet herbicide peuvent être utilisées pour la phytoremédiation des sols contaminés par cet herbicide [7].

6. Références

[1] Anses: Evaluation des produits phytopharmaceutiques, comment ça marche?

[2] Anses: L'évaluation des produits biocides, comment ça marche?

[3] *Pesticides et santé*, rapport réalisé au nom de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques :

- Résumé
- Rapport complet

[4] Observatoire des Résidus de Pesticides

[5] Inrae : Réduire l'usage des pesticides en agriculture sans perte de performances

[6] Lee A Newman and Charles M Reynolds, Phytodegradation of organic compounds, Current Opinion in Biotechnology 2004, 15:225–230

[7] Phytoremediation of atrazine-contaminated soil using Zea mays (maize), S.I. Ibrahim, M.F. Abdel Lateef, H.M.S. Khalifa, A.E. Abdel Monem, Annals of Agricultural Sciences, Volume 58, Issue 1, June 2013, Pages 69–75.

7. Bibliographie

1. BLOGOWSKI, A. *Pesticides*. Consulté le 20 mars 2017, sur Encyclopedia Universalis
2. ERRANTE, S. (2013). *Rapport sur l'interdiction de certains pesticides responsables de la mortalité des abeilles*.
3. INERIS. (2011). *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Glyphosate et principaux composés / AMPA*.
4. *La Chimie et l'alimentation*. (2010). EDP Sciences.
5. Manahan, S. E. (s.d.). *Fundamentals of environmental and toxicological chemistry*.
6. Eau et pesticides, Planet-Vie, Lundi 25 janvier 2010.
7. *La phytoremédiation*, fiche élaborée par la Société Québécoise de Phytotechnologie
8. *La phytoremédiation*, Défis du CEA n° 208

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Amicie Delahaie

Ancienne élève au département de Chimie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, doctorante en biogéochimie au laboratoire de Géologie de l'ENS

RELECTURE SCIENTIFIQUE

Jean-Bernard Baudin

Professeur à l'Ecole Normale Supérieure

MISE EN LIGNE

Claire Vilain

Responsable éditoriale de CultureSciences-Chimie

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE

Creative Commons - Attribution - Pas d'utilisation commerciale