


**FACULTÉ
DES SCIENCES
D'ORSAY**

Polluant dans l'écosystème

Marc Girondot, Université Paris Saclay
 marc.girondot@universite-paris-saclay.fr

Version du 07/09/2021

1


Polluants Organiques Persistants POPs

2

La Convention de Stockholm de 2001 sur les polluants organiques persistants (POP) entrée en vigueur en 2004:

12 prioritaires (« dirty dozen »):

- 1) l'aldrine
- 2) Le chlordane
- 3) le dichlorodiphényltrichloréthane (DDT)
- 4) La dieldrine
- 5) l'endrine
- 6) le l'heptachlore
- 7) le mirex
- 8) toxaphène
- 9) l'hexachlorobenzène
- 10) les polychlorobiphényles (PCB)
- 11) les dioxines
- 12) les furanes



Elle compte 184 membres signataires dont 152 pays l'ont signée et ratifiée.

L'institution de la ratification donne aux États le délai dont ils ont besoin pour obtenir l'approbation du traité, nécessaire sur le plan interne, et pour adopter la législation permettant au traité de produire ses effets en droit interne.

3

Polluants organiques persistants (POPs)

Définition : Les POPs sont des molécules complexes qui ne sont pas définies à partir de leur nature chimique mais à partir de 4 propriétés :

- Toxicité
- Persistance dans l'environnement
- Bioaccumulation
- Transport longue distance

4

Un rapide historique de l'utilisation des pesticides ...

- La plupart des POPs de la « dirty dozen » sont des pesticides:
 - L'aldrine est un insecticide chloré, non biodégradable.
 - Le chlordane est un insecticide organochloré non systémique
 - Le DDT est un puissant insecticide
 - La dieldrine est un insecticide organochloré.
 - L'endrine est un insecticide et rodenticide.
 - L'heptachlore est un insecticide organochloré non systémique.
 - Le mirex est un composé organochloré qui a été commercialisé comme retardateur de feu et comme insecticide.
 - Le Toxaphène est un pesticide.
 - L'hexachlorobenzène est un fongicide.
 - Les polychlorobiphényles (PCB) ont des applications industrielles.
 - Les dioxines sont des produits de dégradation d'autres POPs.
 - Les furanes se forment lors de la cuisson des aliments.

5

Les différentes classes de pesticides

Classe des pesticides	Cibles
Action sur les invertébrés Insecticides Nématicides	Insectes Nématodes
Action sur les vertébrés Rodenticides Avicides	Rongeurs Oiseaux
Action sur les plantes Herbicides	herbes
Action sur les micro-organismes Fongicides	(levures-moisissures)

Remarque : « pest » vient de l'anglais qui veut dire « nuisible »

6

D'après l'Union des Industries de la Protection des Plantes

Utilisation de pesticides en France

Catégorie	Pourcentage	Quantité
Herbicides	48 %	14 660
Insecticides	25 %	7 690
Fongicides	24 %	7 330
Divers	3 %	1 045

7

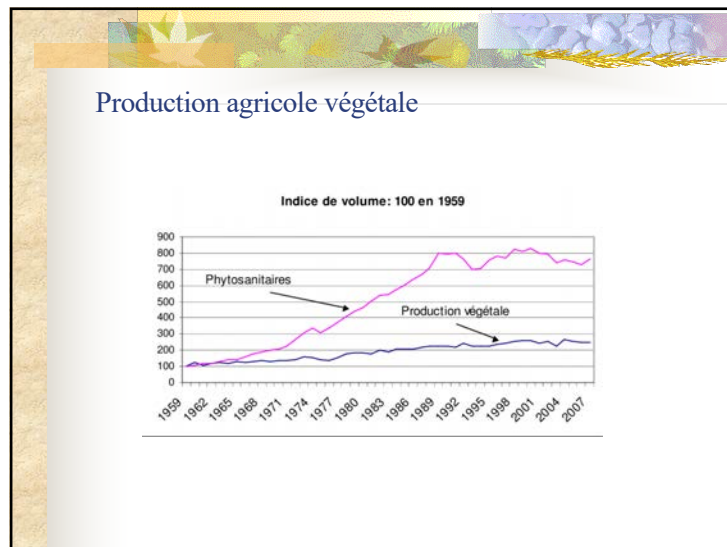
La révolution verte

- Ensemble de techniques qui ont permis d'augmenter de façon impressionnante la productivité.

Productivité approximative (en % de 1980)


Année	Produits	Productivité (%)
1950	Produits	~100
1950	Vaches laitières	~100
1950	Porcs	~100
1950	Carreaux non-jigés de l'Atlantique	~100
1950	Poissons tropicaux	~100
2000	Produits	~200
2000	Vaches laitières	~150
2000	Porcs	~120
2000	Carreaux non-jigés de l'Atlantique	~100
2000	Poissons tropicaux	~100

8



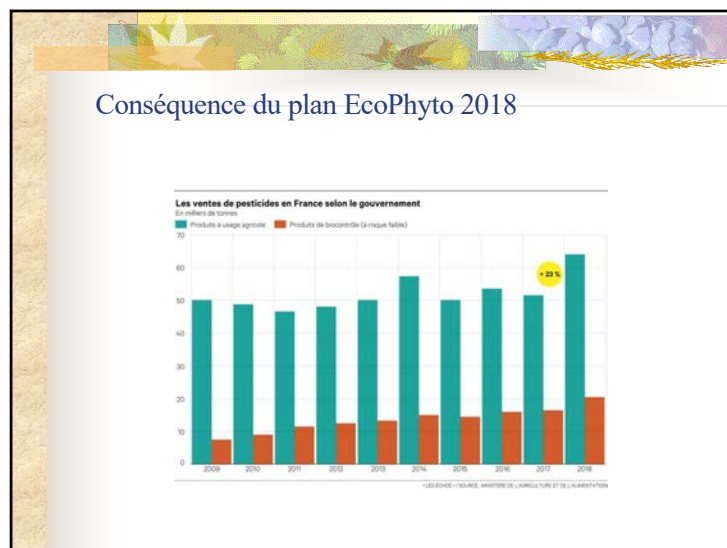
9

Plan EcoPhyto 2018



- Le plan Écophyto 2018 est l'une des mesures issues du Grenelle de l'environnement (2007) qui avait comme objectif phare la réduction de moitié de l'usage des pesticides à l'horizon 2018.
- Ce plan, confié par le président de la République au ministre de l'Agriculture et de la Pêche, visait à réduire et sécuriser l'utilisation des produits phytosanitaires (y compris pour des usages non agricoles).
- L'un de ses objectifs est de diviser par deux, « si possible », l'usage de pesticides avant 2018.
 - La formulation est ambiguë car ne précisant pas s'il s'agit de tonnage, de matière active, des produits les plus utilisés ou les moins utilisés ou les plus toxiques, etc.

10



11

Pourquoi +23% ?

- Le gouvernement a annoncé un bond de 23 % des ventes de pesticides en 2018. L'Union des industries du secteur (UIPP) estime la hausse à 8 %. La FNSEA dit « ne rien comprendre à la différence entre les chiffres ».
- « La politique menée depuis dix ans ne produit pas les résultats attendus », a, pour sa part, tweeté Elisabeth Borne, la ministre de la Transition écologique et solidaire.

12

EcoPhyto 2 (2025)

- Pour atteindre l'objectif d'Écophyto 2 qui est d'atteindre en 2025 50 % de réduction de l'usage des phytosanitaires (et -25 % en 2020) :
 - généraliser les meilleures pratiques agricoles économes en produits phytosanitaires (dont l'agriculture biologique) ;
 - s'appuyer sur la recherche & l'innovation et les retours d'expérience pour développer des systèmes de production viables et diffusables permettant cette réduction ;
 - Communiquer ; former ;
 - renforcer des réseaux de surveillance des « bioagresseurs » pour adapter au mieux les traitements en développant l'épidémiosurveillance ;
 - renforcer la connaissance des effets indésirables des produits phytosanitaires sur les cultures et l'environnement.

13

EcoPhyto 2+

- Suite à l'annonce du 22 juin 2018 pour une « sortie du glyphosate », le plan Écophyto 2 intègre dans son plan d'actions élaboré le 25 avril 2018, un objectif de sortie du glyphosate et se renomme Écophyto 2+ ».

14

Et en 2019...

- Les ventes de pesticides ont reculé en France de 44 % en volume en 2019, après l'envolée des ventes intervenue en 2018 (+18 %), a annoncé mardi le gouvernement.
- Les quantités vendues de glyphosate, désherbant controversé, « diminuent de 35 % (-3 358 tonnes) entre 2018 et 2019 après avoir augmenté de 11 % (+999 tonnes) entre 2017 et 2018 », ont précisé les ministères de la Transition écologique et de l'Agriculture dans un communiqué conjoint.

15


Destruction en masse des récoltes

- L'histoire offre de nombreux exemples de destruction en masse des récoltes par les maladies ou les insectes.




16

Les dix plaies d'Égypte



- Les dix plaies d'Égypte sont les dix châtements que, selon le Livre de l'Exode, Dieu inflige à l'Égypte pour convaincre Pharaon de laisser partir le peuple d'Israël :
 - 8 - Les sauterelles : « [...] Elles recouvrirent la surface de toute la terre et la terre fut dans l'obscurité ; elles dévorèrent toutes les plantes de la terre et tous les fruits des arbres, tout ce que la grêle avait laissé et il ne resta aucune verdure aux arbres ni aux plantes des champs dans tout le pays d'Égypte [...] » - Exode 10:13-14,19

Le livre de l'exode fait partie du Pentateuque de la bible chrétienne et donc de la Torah.
La date des événements qui y sont contés est entre -1600 et -1200 sans qu'il ne soit possible d'être plus précis actuellement.



17

Schistocerca gregaria (Forskål, 1775)




Phase grégaire

Le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) appartient à la catégorie des acridiens de type locuste présentant un phénomène de polymorphisme phasaire, c'est-à-dire la possibilité de développer des aspects variés et réversibles, selon la densité des populations, elle-même fonction des conditions écologiques et météorologiques.

Phase solitaire

Les individus se développant en phase grégaire mangent leur poids de feuille par jour.

18

Explosion démographique du cricket

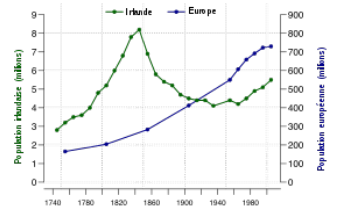


Mauritanie, 2004

19

Famine en Irlande

- Irlande entre 1845 et 1851, où les récoltes de pommes de terre, nourriture de base pour nombre d'irlandais, ont été détruite par un oomycète parasite appelé le mildiou, *Phytophthora infestans*, arrivé d'Europe continentale.



20

Pertes des cultures du maïs aux USA - 1970



- Les rouilles sont des maladies cryptogamiques des végétaux supérieurs.
- Les agents pathogènes responsables en sont des champignons basidiomycètes parasites biotrophes, de l'ordre des Pucciniales (la plupart des rouilles).
- Elles se manifestent par des macules foliaires ou des sortes de pustules apparaissant sur les feuilles.

21

Exemple du maïs

La sélection a conduit à une forte diminution de la diversité génétique des nouvelles variétés de maïs.



22

Ravageurs du maïs

- Or, du fait de cette trop grande homogénéité génétique, les cultures sont devenues très vulnérables à des agents pathogènes et autres ravageurs à capacité d'évolution rapide.
- Ainsi, aux Etats-Unis, la rouille refit une apparition en 1970 et l'épidémie provoque des dégâts considérables dans le maïs, devenu trop fragile.
 - Apparence de l'épi
 - Grosseur des épis
 - Grains secs

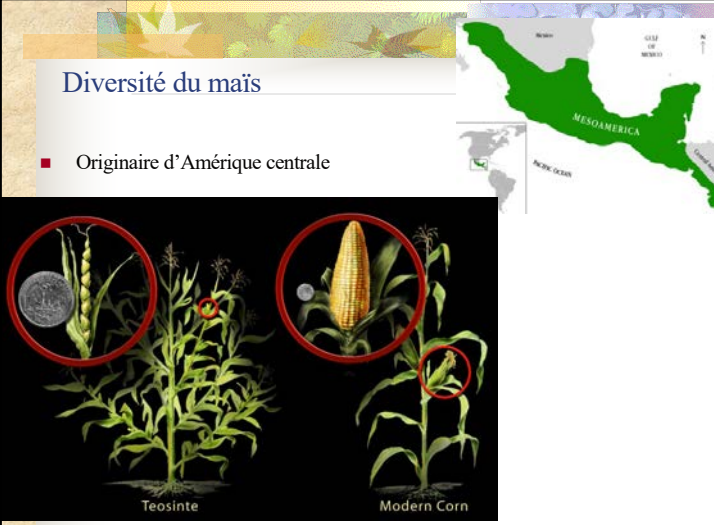


Common rust symptoms on sweet corn. Courtesy Harold Kaufman, TAEX, 1996.

23

Diversité du maïs

- Originaire d'Amérique centrale



24

Diversité du maïs

- Très grande diversité génétique même entre vallées



25



Dispersion des polluants dans l'environnement

26

Qu'elles sont les propriétés physico-chimiques des molécules qui déterminent la dispersion des polluants ?

- **La solubilité** d'un composé dans l'eau est exprimée en mg/L à 20 °C. Les composés de solubilité plus élevée sont normalement plus facilement lixiviables dans les eaux souterraines.
- **La pression de vapeur** est la pression à laquelle un liquide et sa vapeur sont en équilibre à une température donnée. Plus la pression de vapeur d'un liquide est élevée plus ce liquide s'évapore rapidement.
- **Rémanence** : désigne l'aptitude d'un polluant à demeurer dans le milieu
 - temps de $\frac{1}{2}$ vie (DT_{50}) temps nécessaire à l'élimination de 50% du polluant

27

Calcul et conséquence du temps de demi-vie

- La demi-vie est le temps mis par une substance pour que 50% soit éliminé du milieu dans lequel elle est présente.
- Le terme demi-vie est parfois mal interprété : deux demi-vies ne correspondent pas à la vie complète du produit ! La demi-vie est en fait la médiane de la durée de vie d'un produit, c'est-à-dire la durée en deçà de laquelle il reste plus de 50 % du produit.

28

Calcul et conséquence du temps de demi-vie

- Si la disparition d'un produit (dégradation, lixivation, etc.) est « totalement aléatoire », c'est-à-dire que sa probabilité de désintégration est uniforme dans l'avenir, et ne dépend que de la durée de l'intervalle d'avenir considéré, le taux de proportionnalité temporel est noté λ . La probabilité pour la particule de se désintégrer entre les instants futurs vaut donc :
 - Prob(disparition dans $[t; t+dt]$) = λdt
- A l'échelle d'une population de N molécules, on peut donc écrire :
 - $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$ où $N(t)$ est la population à l'instant t , λ est une constante homogène à l'inverse d'un temps (a^{-1}). C'est la constante d'élimination.

29

INTERMÈDE

30

Définition d'un système d'unités

- Système SI (sept grandeurs et unités de base)

Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Intensité électrique	ampère	A
Température thermodynamique	kelvin	K
Quantité de matière	mole	M
Intensité lumineuse	candela	c
- 19 unités dérivées, résultant de combinaisons d'unités de base d'après des relations algébriques (multiplication et division) liant les grandeurs correspondantes ont reçu des noms et des symboles spéciaux :

Température Celsius	degré Celsius	° C
---------------------	---------------	-----

31

Unités du Système International

- Des unités hors SI sont cependant admises dans le système SI car d'usage courant, par exemple :

■ minute	min	60 s
■ heure	h	3600 s
■ jour	j, d	86 400 s
- l'année julienne, de symbole a (d'après le latin annus ; souvent yr dans la littérature anglo-saxonne), d'une durée de 365,25 jours soit 31 557 600 secondes
 - Notez que l'année solaire est de 31 556 925 secondes et l'année grégorienne est de 31 556 952 secondes.
- litre l, L | 10^{-3} m^3 |

32

Convention d'écriture

- Les nombres s'écrivent avec des chiffres arabes en caractères romains (droits).
- Pour les nombres à partie décimale, la virgule (et non le point) sépare la partie entière de la partie décimale.
 - 3,141 6
- Si un nombre a plus de quatre chiffres chaque groupe de trois chiffres, doit être séparé par un espace.
 - 23 456
- La séparation n'existe pas pour les nombres de quatre chiffres désignant une date ou un millésime (l'an 2000).
 - An 2000

33

Conventions d'écriture

- Les noms d'unités sont des noms communs écrits en lettres minuscules. Ils prennent un "s" au pluriel sauf si les noms sont déjà terminés par un s, x ou z.
 - Exemples : un mètre, un kelvin, un newton, des pascals, des siemens, des lux, des hertz
- Le nom propre prend une majuscule quand il est associé à l'unité degré : degré Celsius, degré Fahrenheit, degré Rankine, degré Réaumur car cela reste un nom propre.
- L'abréviation du nom de l'Unité prend une majuscule si elle provient d'un nom propre (ie d'une personne) sinon elle reste en minuscule, à l'exception du litre qui peut s'écrire L:
 - K, L, kg, m
- Bien entendu si l'on désigne le nom de la personne dont est tiré l'unité, il prend une majuscule:
 - Le kelvin de symbole K est en l'honneur de Lord Kelvin
- Les symboles d'unités sont invariables, ne prennent pas la marque du pluriel et se placent après la valeur numérique complète séparés de celle-ci par un espace insécable.
 - 4 m, 293,15 K, 17 ° C

34

INTERMÈDE

35

Calcul et conséquence du temps de demi-vie

- A l'échelle d'une population de N molécules, on peut donc écrire:
 - $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$ où $N(t)$ est la population à l'instant t , λ est une constante homogène à l'inverse d'un temps (s^{-1}). C'est la constante d'élimination.
- La résolution de cette équation différentielle est une fonction exponentielle décroissante :
 - $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ dans laquelle N_0 est la concentration à $t = 0$.
 - La demi-vie (notée $t_{1/2}$) est donc la valeur pour laquelle :
 - $N(t_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$ d'où $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$
- La durée de vie moyenne d'une molécule est donc :
 - $T_{moy} = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)}$

36

Est-ce le cas général ?

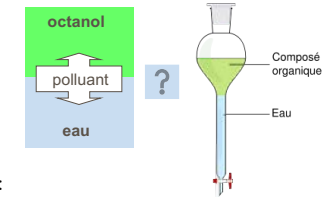
- Il faut se rappeler des conditions d'utilisation de cette fonction:
 - « Si la disparition d'un produit (dégradation, lixivation, etc.) est « totalement aléatoire », c'est-à-dire que sa probabilité de désintégration est uniforme dans l'avenir, et ne dépend que de la durée de l'intervalle d'avenir considéré... »
- Cette hypothèse peut être violée de nombreuses manières :
 - Les conditions physico-chimiques, tel que la température par exemple, peuvent ne pas être constante.
 - Les modes de dégradations peuvent être divers (chimiques, biologiques, physiques).

37

Coefficient de partage octanol-eau (Kow)

- Rapport de la concentration de polluant dans la phase octanol et dans l'eau.

$$Kow = \frac{[poll]_{\text{octanol}}}{[poll]_{\text{eau}}}$$



- Généralement exprimé en \log_{10} :
 - $Kow = 10^6 \rightarrow \log Kow = 6$
- Le Kow rend compte de la tendance d'une molécule à s'accumuler dans les membranes biologiques (substances lipophiles) des organismes vivants (bioaccumulation)

38



Temps de résidence

- Stratosphère 2 à 3 ans (30 km)
- Basse stratosphère 1 an
- Tropopause 2 mois
- Troposphère 30 jours

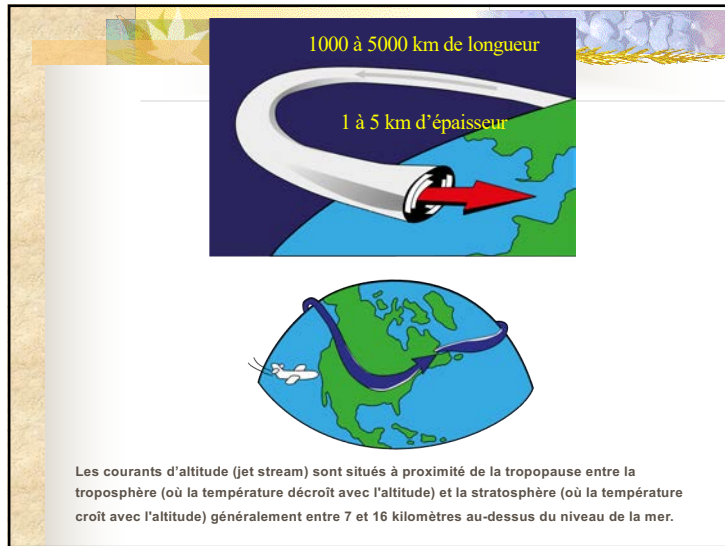
39

Circulation atmosphérique des polluants

Les cellules de convection



40



41

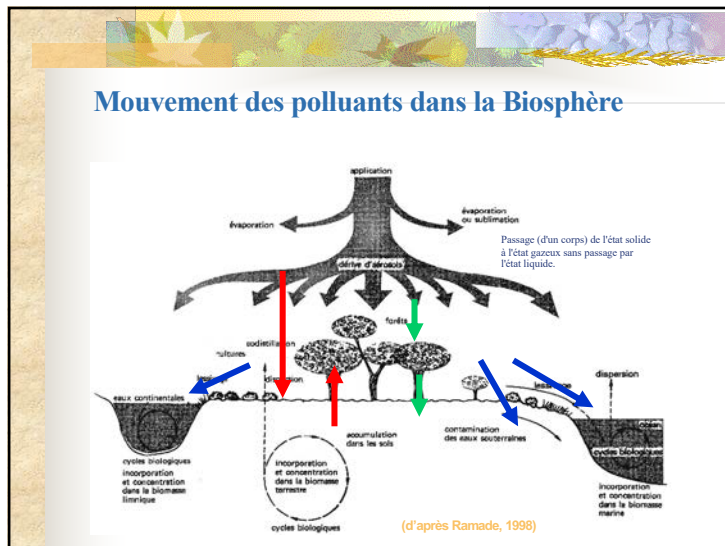
Conséquence

- Temps de résidence dans la stratosphère 2 à 3 ans (30 km)
- Contamination loin de source d'émission

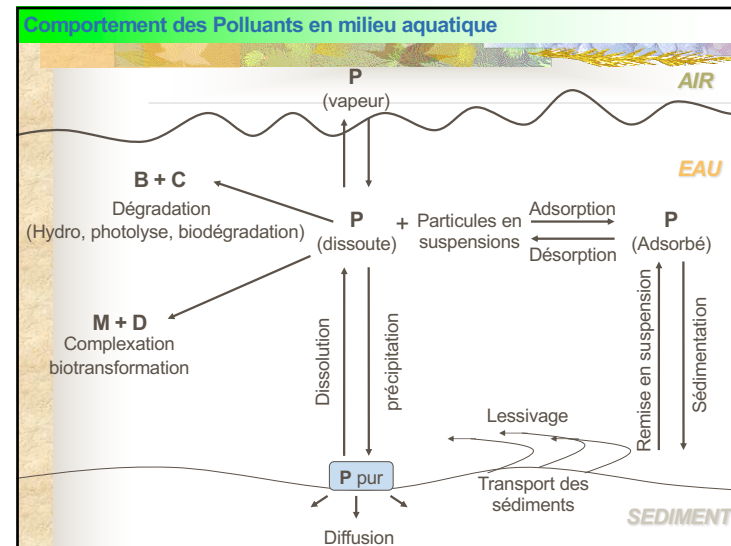
Exemples

- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans les lacs d'altitude
- Chez les ours polaires présence de PCB : diminuent les défenses du système immunitaire (sensibilité accrue aux infections virales: grippes, le virus REO ou celui de l'herpès)

42



43



44

Exemple

LE DDT

45

Le DDT



- Le DDT se présente sous forme de cristaux solides incolores. Il résiste à la destruction sous l'effet de la lumière et à l'oxydation.

Propriété	Paramètre	Unité	Valeur	Conclusion
Point de fusion		° C	108	
Pression de vapeur		mPa	0,025	
Densité		g/cm ³	non déterminée	
Dégradation	DT ₅₀ sol	années	4-30	très légèrement dégradable
Solubilité	S _w	mg/litre	0,0033	non soluble
Mobilité	Log K _{oc}		6.2	non mobile

46

Le DDT


- Insecticide organochloré le + utilisé le plus fabriqué au monde
- utilisation contre :
 - les moustiques vecteurs de la malaria
 - la mouche tsé tsé
 - les poux les tiques
 - les puces
- Prix Nobel de médecine pour Müller 1948 qui a découvert son action insecticide.
- Après la guerre : largement utilisé sur diverses cultures agricoles et pour lutter également contre les vecteurs de maladies (3 millions de tonnes entre 1943-1980)

47

Conséquences

- Campagne intensive de lutte contre les moustiques aux Etats-Unis pour lutter contre le paludisme
- Forte réduction des populations d'oiseaux et de rapaces ichthyophages entre 1950 et 1980.
 - Le faucon pèlerin a frôlé l'extinction aux Etats-Unis et au Canada.



48

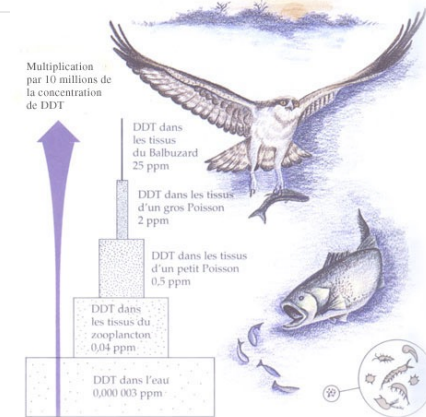
The Silent Spring- 1962



Rachel Carson, 1907-1964

49

Le DDT



50

Déclin des populations d'oiseaux

- De façon générale, le DDT se concentre dans les systèmes biologiques, principalement les corps gras. C'est un produit nocif pour diverses espèces qui se bioamplifie le long de la chaîne alimentaire, atteignant sa plus haute concentration pour les superprédateurs, comme les humains ou les rapaces.
- Le DDT a notamment été montré du doigt pour expliquer le déclin des pygargues à tête blanche ou des faucons pèlerins lors des années 1950 et 1960 : le DDT et ses produits de décomposition sont toxiques pour les embryons aviaires et peuvent perturber l'absorption de calcium, et donc sur la qualité de la coquille des œufs.



51

Des données difficiles à interpréter

- Pourtant, le DDT et le DDE ont très peu d'effet sur certains oiseaux, comme les poules.
- Une étude récente a montré que des dommages cérébraux significatifs chez les merles sauvages dus à une exposition au DDT aux États-Unis affecte leur chant, leur capacité à défendre leur territoire et à construire des nids.
- Le DDT est hautement toxique pour les organismes aquatiques, y compris les écrevisses, les daphnies, les crevettes et de nombreuses espèces de poissons.
- Le DDT peut être modérément toxique pour certaines espèces d'amphibiens, notamment à l'état larvaire.

52

Le DDT total

- Ses processus de dégradation incluent en effet la volatilisation, la photolyse et la biodégradation aérobie et anaérobie. Ces processus sont en général assez lents.
- Ses produits de décomposition dans les sols sont le DDE (dichlorodiphényldichloroéthylène ou 1,1-dichloro-2,2-bis(p-dichlorodiphényl)éthylène) et le DDD (dichlorodiphényldichloroéthane ou 1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophényl)éthane) qui sont eux aussi hautement persistants et possèdent des propriétés physiques et chimiques similaires.
- La quantité totale de ces produits est connue sous le nom de « DDT total ».

53

Persistence

- Le DDT est un polluant organique persistant avec une demi-vie évaluée entre 2 et 15 ans dans les sols. Dans les lacs, sa demi-vie est estimée à 56 jours et dans les rivières à 28 jours. Mais la persistance du DDT va au-delà ces durées, en raison, entre autres, de la présence des produits décomposés du DDT.
- Aux États-Unis, tous les échantillons humains de sang et de tissus graisseux pris au début des années 1970 présentent des niveaux détectables de DDT. Une étude ultérieure d'échantillons de sang pris dans la seconde moitié des années 1970 (soit après l'interdiction aux États-Unis) montrent une concentration plus faible, mais le DDT et ses métabolites restaient à des concentrations importantes.

54

Données en France

- Trente ans après son interdiction, ce pesticide a été retrouvé dans le bassin d'Arcachon et en Camargue en France probablement en raison d'un relargage de DDT piégé dans les sols.
- Il faut noter qu'il y a une synergie entre molécules, puisque le glyphosate qui est un désherbant, conduit à une augmentation de l'érosion des sols et donc à une remise en circulation du DDT piégé dans les sédiments.

55

Le DDT

Conséquences : 1970 sévères restrictions du DDT / ou interdiction

Aujourd'hui : 34 pays ont interdit le DDT
34 autres ont sévèrement restreint l'utilisation

Recommandation de l'OMS « Le DDT ne doit être pulvérisé qu'à l'intérieur des maisons et il faut prendre toutes les mesures nécessaires pour empêcher qu'il soit détourné vers l'agriculture »

56

DDT

EFFETS SUR LA SANTÉ HUMAINE

57

Effets aigus

- L'utilisation du DDT est généralement considérée comme sûre pour l'humain s'il respecte les recommandations d'usage. Il n'existe pas d'étude scientifique prouvant que le DDT soit particulièrement toxique pour les humains, ou d'autres primates, comparativement à d'autres pesticides répandus. Des doses allant jusqu'à 285 mg kg^{-1} ont été ingérées accidentellement sans causer la mort, mais ont néanmoins causé des vomissements.
- Le DDT a souvent été directement appliqué sur les vêtements, sur la peau, les poils ou les cheveux ou a été ajouté au savon

58

Effets chroniques

- Les résultats apparaissant contradictoires.
- Trois études ont conclu que le taux de DDT et DDE dans les tissus était plus élevés chez les malades atteints de cancer que pour ceux mourant d'autres maladies (Casarett et coll., 1968 ; Dacre and Jennings, 1970 ; Wasserman et coll., 1976) mais d'autres travaux n'ont pas trouvé de corrélation (Maier-Bode, 1960 ; Robinson et coll., 1965 ; Hoffman et coll., 1967).
- Le Centre international de recherche sur le cancer a classé en 2017 le DDT comme « cancérogène probable ».
 - Cette classification s'appuie sur plus de 100 études de cohorte et cas-témoins qui donnent des résultats limités quant aux liens entre l'exposition au DDT ou au DDE et les lymphomes non-hodgkiniens, cancers du foie et cancers des testicules.
- Il existe en revanche des preuves solides de cancérogénicité du DDT chez certains animaux.

59

Cancer du sein

- Une étude menée en 1993 a montré une corrélation statistiquement significative entre le taux sanguin d'un métabolite du DDT, le DDE, et le risque de cancer du sein dans un échantillon de plus de 14 000 New-yorkaises. Les études antérieures n'avaient pas trouvé de lien.
- En 2001, S. M. Snedeker, responsable d'un programme sur le cancer du sein et les facteurs de risques environnementaux à l'université Cornell de l'État de New-York, a estimé que les contradictions apparentes de ces études pourraient être expliquées par des effets de perturbation endocrinienne différents selon les formes de DDT utilisées (estrogénicité variable selon les formes): l'influence des facteurs alimentaires, du statut ménopausique des patientes, des différences entre types de populations de contrôle, de l'histoire de lactation (durant la lactation, la mère « se débarrasse » de nombreux polluants liposolubles via le lait maternel).

60

Effet sur le développement

- Selon le rapport de l'agence européenne de l'environnement citant plusieurs études publiées dans les années 2000, l'exposition in utero au DDT est liée à des problèmes de développement psychomoteurs durant l'enfance.
- Une étude publiée en 2018 montre un lien entre présence de métabolites du DDT dans le sang de femmes enceintes en Finlande et prévalence de l'autisme chez leurs enfants.

61

DDT
INQUIÉTANT MAIS...

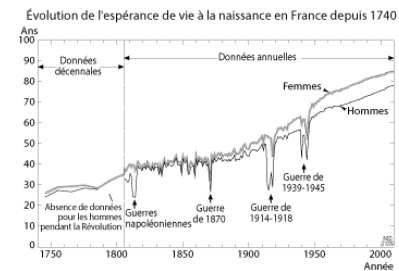
62

Mais...

- Biais de publication ?
 - Il est plus probable de publier un article montrant un effet significatif qu'un article ne montrant aucun effet !
- Méthodes inadéquates d'analyse des données:
 - Girondot M, Guillon J-M (2018) Comment obtenir des résultats significatifs dans vos études écotoxicologiques: un guide pratique. ECOTOX INRA, Réseau d'écotoxicologie terrestre et aquatique

63

Pourquoi il faut rester vigilant avec les publications



64

Diversité des polluants

- D'abord, la notion de contaminant n'est pas simple à appréhender. Les cas simples correspondent à des molécules fabriquées par l'Homme et qui n'existent pas à l'état naturel. Des cas plus complexes apparaissent avec les molécules dérivées des précédentes qui peuvent apparaître au cours d'un procédé de fabrication. Mais ces molécules dérivées peuvent aussi apparaître comme des produits de dégradation. Tout ceci pour dire que le nombre de contaminants potentiels est infini et certains, qui existent déjà, ne sont pas encore caractérisés. L'Inventaire Européen des Substances Chimiques Commerciales Existantes (EINECS) contient 100 102 substances chimiques (Geiss et al., 1992) mais ne recense bien entendu qu'une fraction des molécules réellement produites, volontairement ou non, par l'Homme. On est donc dans une situation inédite où le nombre de facteurs explicatifs d'un effet peut être quasiment infini. Bien sûr, en pratique, on n'analyse pas l'ensemble des contaminants possibles mais il est relativement facile d'obtenir le dosage de 200 molécules dans un même échantillon.

65

Diversité des cibles

- Une autre particularité de l'écotoxicologie est que les effets des contaminants peuvent toucher de très nombreuses fonctions. On disposera donc de très nombreuses mesures sur les organismes que l'on cherchera à mettre en relation avec des contaminants potentiels.
- Une troisième particularité des études actuelles d'écotoxicologie est d'avoir accès à des cohortes de très grandes tailles, notamment en écotoxicologie humaine.

66

Recettes pour obtenir des effets significatifs

- Prenez des individus en nombre suffisamment important, de l'ordre de la centaine (la centaine de milliers si vous avez la chance de travailler sur des cohortes humaines). N'oubliez pas de prendre des informations sur leur milieu de vie, leur histoire et toute information qui vous semble pertinente ou non, mais qui pourra être utile (voir point 3 ci-dessous). Sur chacun de ces individus, dosez des contaminants divers, organochlorés, métaux lourds, HAP... vous avez le choix. Arrangez-vous pour en avoir au moins une vingtaine. Maintenant étudiez des caractéristiques biométriques chez les individus. Cela peut-être des mesures de taille, de masse, de caractéristiques physiologiques ou psychologiques... tout ce qui vous paraît faisable et surtout si c'est très divers.
- *Avec ces données en main, voyons comment être certain d'obtenir des effets significatifs.*

67

Stratégie pour avoir des résultats significatifs (1)

- Combiner les contaminants dans l'analyse de façon à pouvoir augmenter le nombre de tests. Par exemple, vous pourrez inclure les interactions entre contaminants dans l'analyse. Les interactions dans une analyse linéaire se présentent comme un produit entre les concentrations de différents produits. Limitez-vous aux interactions de premier ordre (entre deux produits) sauf si vraiment vous ne trouvez pas d'effets significatifs, ce qui a peu de chance de se produire. Vous pourrez aussi sommer les contaminants pour analyser des classes de produits, soit des classes chimiques soit des regroupements de produits selon la nature de leurs effets suspectés.

68

Stratégie pour avoir des résultats significatifs (2)

- Combiner les caractéristiques biométriques pour là encore multiplier les tests. Par exemple, si vous avez une longueur et une largeur, multipliez-les pour obtenir une surface et si vous multipliez avec une hauteur, cela vous fait un volume. Donc à partir de 3 mesures linéaires, vous obtiendrez 3 surfaces et un volume, donc 7 mesures. Vous pouvez faire ce genre de traitement pour un peu tout. Par exemple, à partir de dénombrement de tumeurs en 4 catégories de tailles, vous obtiendrez facilement un nombre total de tumeur, une surface et un volume. A partir de concentration de solutés dans le milieu intérieur, vous pouvez combiner les éléments chimiques, par exemple les anions et les cations.

69

Stratégie pour avoir des résultats significatifs (3)

- Si ces stratégies ne permettent pas d'obtenir au moins un effet significatif (ce qui est peu probable), vous avez aussi la possibilité de retirer des individus du jeu de données. C'est ici qu'il s'avère utile de connaître les caractéristiques des individus : sur cette base, vous pourrez décider de retirer certains d'entre eux de l'analyse, par exemple, ceux qui sont en surpoids, le genre ou ceux qui proviennent d'une localité X. Vous avez aussi la possibilité de créer des sous-ensembles du jeu de données à partir de ces caractéristiques et d'analyser ces sous-ensembles séparément.

70

Caricature ?

- Vous trouvez que la situation décrite est caricaturale ? Et pourtant les procédures décrites ci-dessus sont celles-là même rencontrées dans nombre de publications très sérieuses et sur les résultats desquels des décisions de politique publique pourront s'appuyer.

71

Par exemple

- Effet de la pollution de l'air pendant la vie embryonnaire sur le développement du cerveau et les troubles cognitifs (Guxens et al., 2018). Il est difficile de dénombrer les *p-values* de ce papier car toutes ne sont pas montrées, ce qui interdit ici d'utiliser les procédures de correction pour la multiplication de tests statistiques, mais elles sont très nombreuses.
- Cette étude est à mettre en relation avec d'autres sur le même sujet. Par exemple, l'effet potentiel de 52 polluants sur 1 variable à expliquer avec la cohorte entière ou séparée selon le genre a été analysé (Braun et al., 2014).
 - Le nombre de tests total est donc de 156 (52×3) et le nombre de polluants pour lesquels un effet significatif au seuil de 0,05 est détecté est de 6

72

Par exemple

- Cette étude est à mettre en relation avec d'autres sur le même sujet. Par exemple, l'effet potentiel de 52 polluants sur 1 variable à expliquer avec la cohorte entière ou séparée selon le genre a été analysé (Braun et al., 2014).
 - Le nombre de tests total est donc de 156 (52x3) et le nombre de polluants pour lesquels un effet significatif au seuil de 0,05 est détecté est de 6
- Ces différents résultats sont exactement ceux attendus s'ils correspondent à des faux-positifs (effets significatifs variables selon les études, en proportion à peu près égales à 5% soit environ 9 quand 156 tests sont effectués, avec des relations parfois positives et parfois négatives). Tout est fait ici pour trouver des résultats positifs et de telles situations sont extrêmement fréquentes dans la littérature.