



Rencontres Alternatives Phytos


Devenir dans l'environnement des produits
phytosanitaires :

quelle influence des pratiques agricoles ?

*Témoignages et échanges sur les systèmes maïsicoles
Vic en Bigorre (65)*

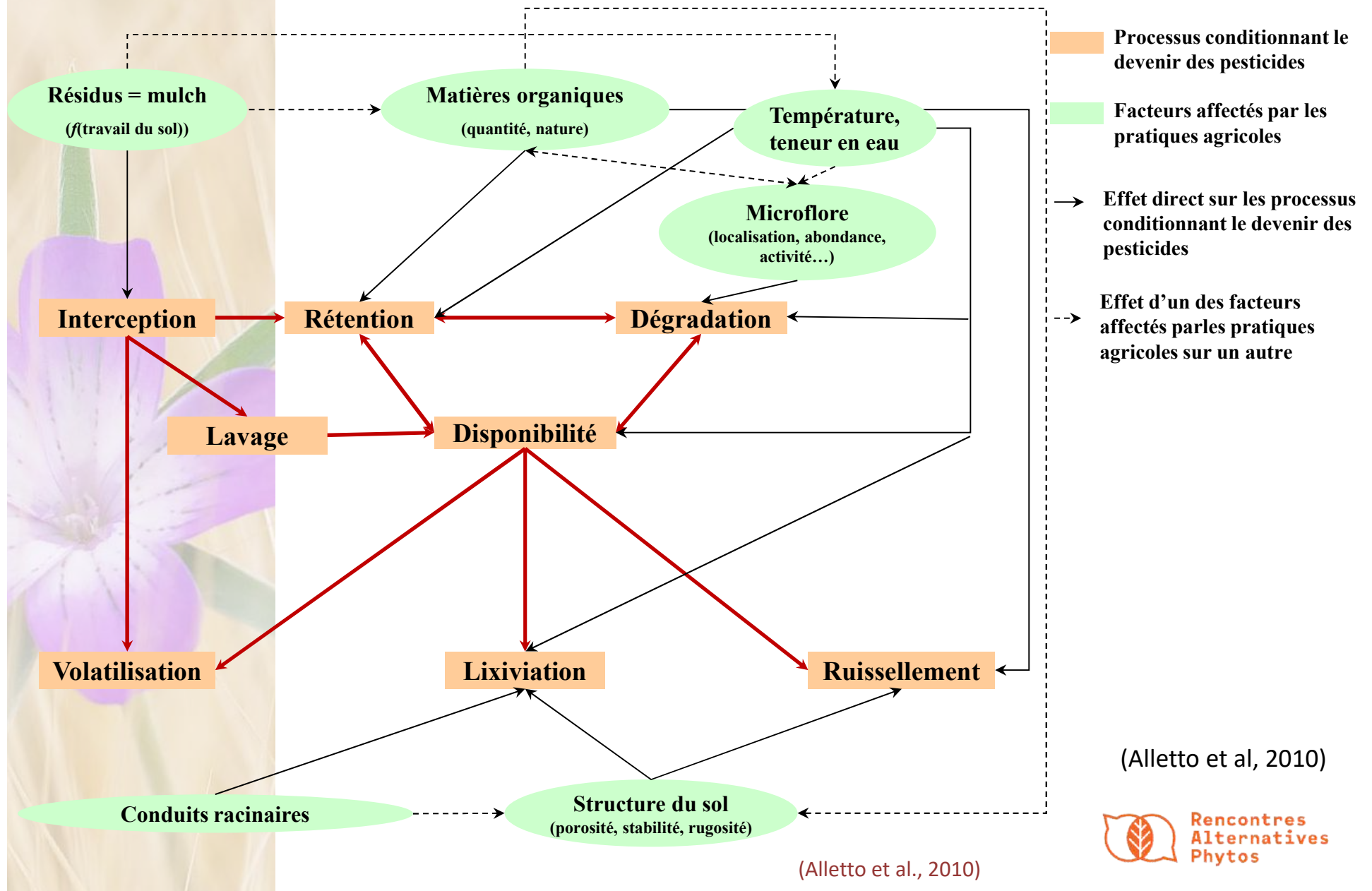
Lionel ALLETTO
Chambre Régionale d'Agriculture d'Occitanie
Chercheur associé INRA UMR Agroécologies,
Innovations, Territoires

lionel.alletto@occitanie.chambagri.fr

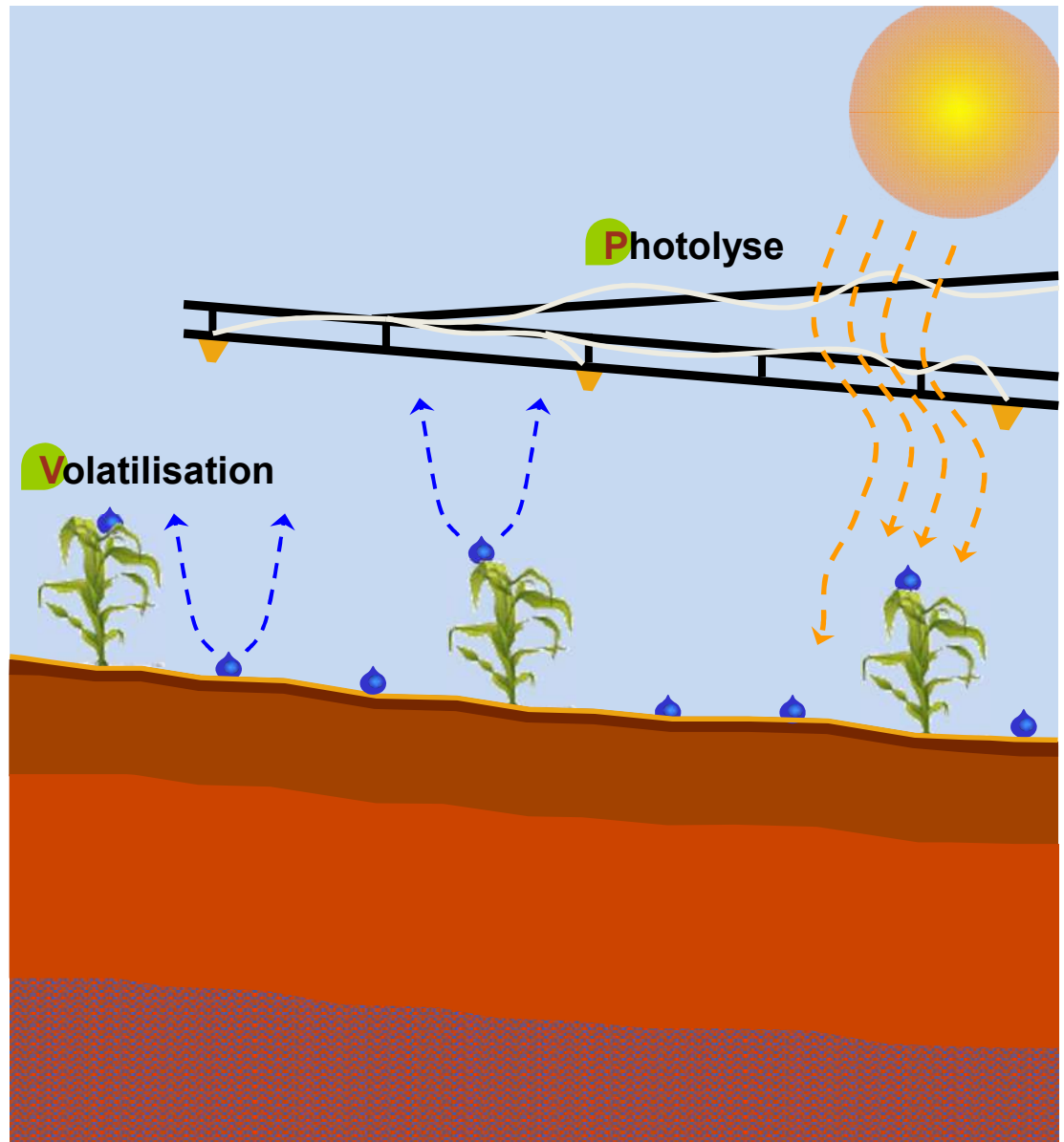
 @LionelAlletto



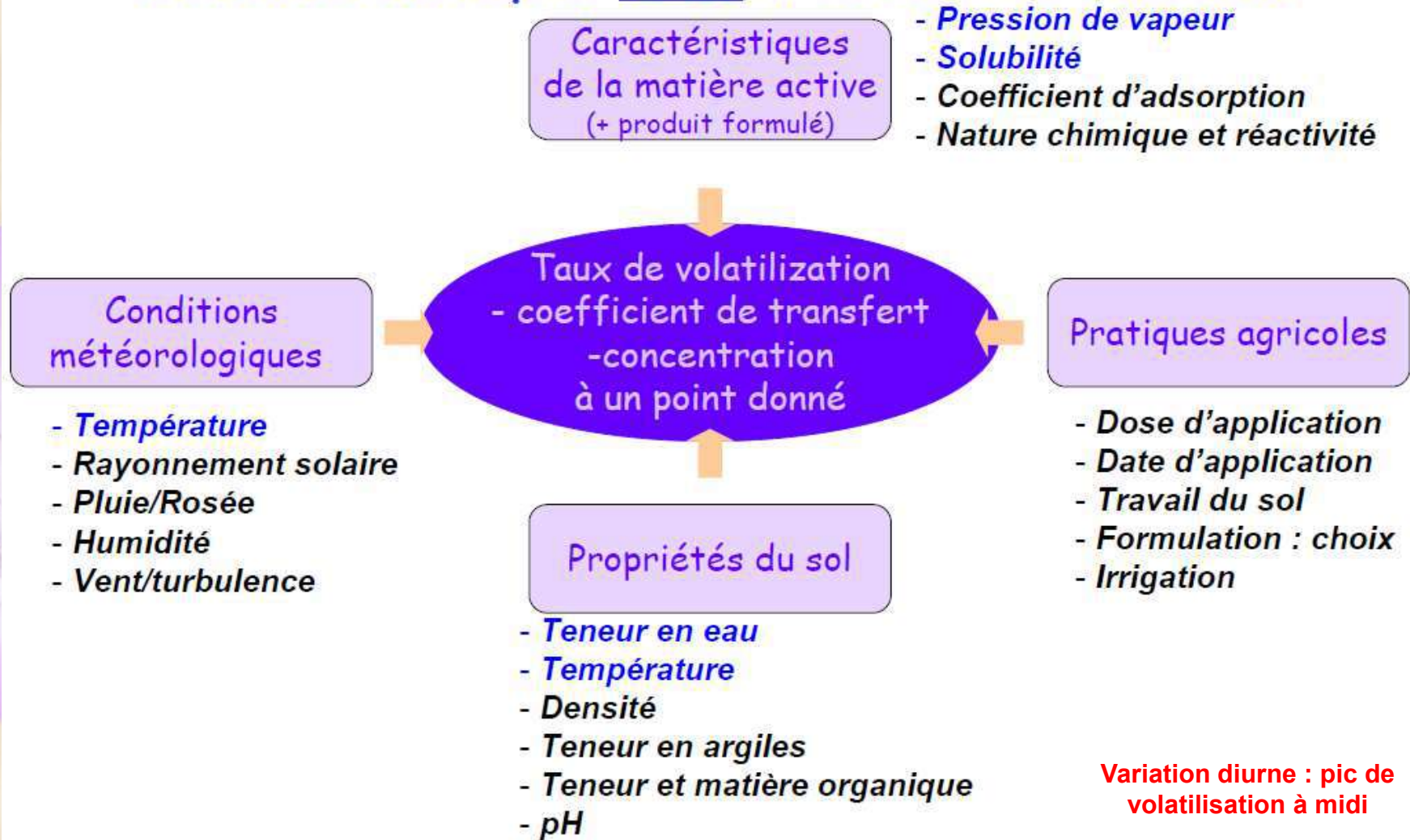
FOCUS sur le Devenir dans l'environnement des pesticides



Volatilisation



Volatilisation depuis le sol: Facteurs de variation



Volatilisation

Table I. Fluxes observed from soil just after treatment (within 12 to 24 h) after Woodrow et al. [49].

Compound	Flux ($\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	Application Dose ($\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Wind ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Method of determination
Herbicides					
Trifluralin	1440	2840	ns*	19–30	Micro-meteorological
Atrazine	20	2500	0.08	5–35	Residue analysis [✓]
Insecticides					
Fonofos	1919	5300	ns	11–32	Micro-meteorological
Diazinon	6	1500	0.8–1.3	ns	Micro-meteorological
Lindane	242	1500	0.8–1.3	ns	Micro-meteorological
Chlorpyrifos	22	1500	0.8–1.3	ns	Micro-meteorological
p,p' DDT	11	1300	1.6–1.7	30–34	Micro-meteorological
Prometon	3	ns	0.3	25	Residue analysis
Dieldrin	69	2500	0.08	5–3	Residue analysis
Fungicides					
PCNB	958	2500	0.08	5–35	Residue analysis

[✓] Residue analysis of treated matrix.

* ns: not specified.

(Bedos et al., 2002)

Volatilisation

Table II. Fluxes observed from plants just after treatment (within 12 to 24 h) Woodrow et al. [49].

Compound	Flux (g·ha ⁻¹ ·d ⁻¹)	Application dose (g·ha ⁻¹)	Wind (m·s ⁻¹)	Temperature (°C)	Method of determination
Herbicides					
2,4-D (wheat)	160	500	2.6	23–31	Micro-meteorological
Pendimethalin (turfgrass)	247	3400	ns*	22	Micro-meteorological
Trifluralin (weedy turf)	381	2500	ns	ns	Residue analysis [✓]
Insecticides					
Diazinon (dormant peach orchard)	218	4500	0.8–1.1	ns	Residue analysis
p,p'-DDT (cotton)	11	1300	1.6–1.7	30–34	Micro-meteorological
Toxaphene (cotton)	47.7	3730	1.6–1.7	30–34	Micro-meteorological
Dieldrin (weedy turf)	41.25	2500	ns	ns	Residue analysis

[✓] Residue analysis of treated matrix.

* ns: not specified.

(Bedos et al., 2002)

Volatilisation

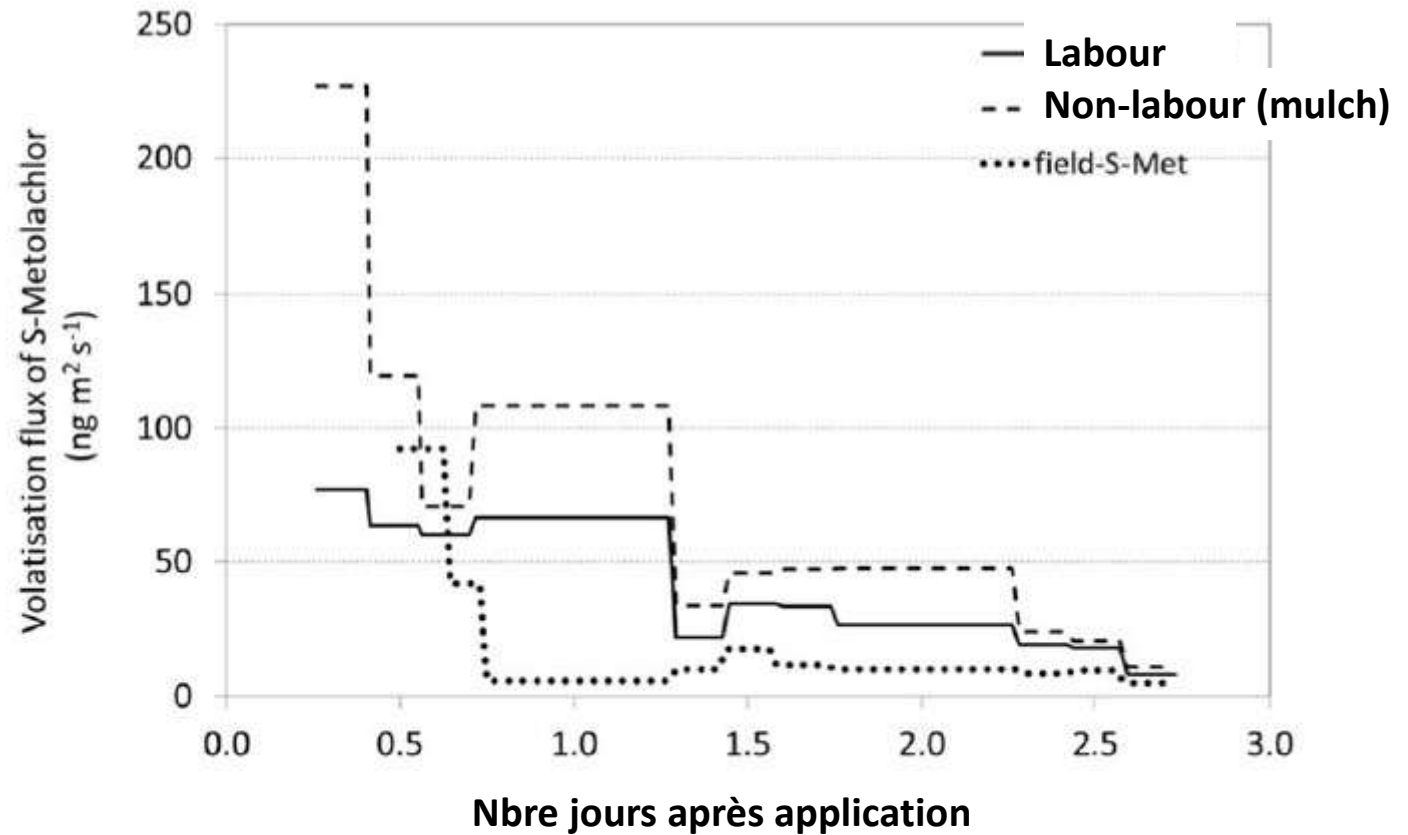
Effets d'un mulch en surface vs. sol nu sur volatilisation du S-métolachlore

Volatilisation d'herbicides (UMR EGC Grignon)



Volatilisation

Effets d'un mulch en surface vs. sol nu sur volatilisation du S-métolachlore



► Pertes plus importantes sur la modalité en non-labour avec mulch



Volatilisation

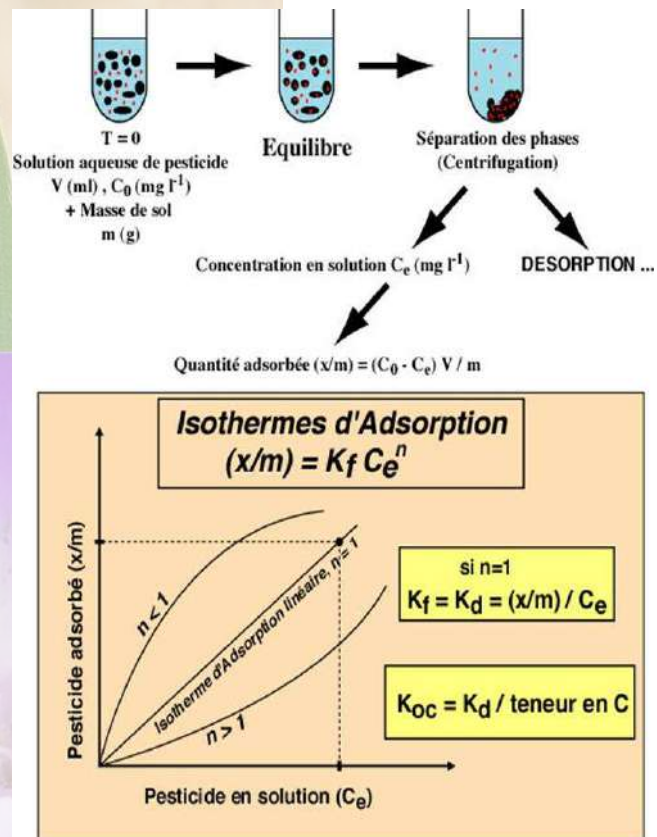
► un processus encore peu suivi mais avec une volonté d'organisation des suivis de la qualité de l'air au niveau européen et national

25 juin 2018 - Lancement de la campagne exploratoire nationale de mesure des résidus de pesticides dans l'air

collaboration Anses / Ineris / ATMO France

2,4 D	Diflufenican	Mirex
2,4 DB	Dimethenamid-p	Myclobutanil
Acetochlore	Dimethoate	Oryzalin
Aldrine	Diuron	Oxadiazon
Bifenthrine	Endrine	Oxyfluorène
Boscalid	Epoxiconazole	Pendimethaline
Bromadiolone	Ethion	Pentachlorophenol
Bromoxynil	Ethoprophos	Permethrine
Butralin	Etofenprox	Phosmet
Carbetamide	Fenarimole	Piclorame
Chlordane (cis, trans)	Fenpropidine	Piperonyl Butoxide
Chlordécone	Fipronil	Prochloraz
Chlorothalonil	Fluazinam	Propyzamide
Chlorpropham	Flumetraline	Prosulfocarbe
Chlorpyrifos-éthyl	Fluopyram	Pyrimethanil
Chlorpyrifos-méthyl	Folpel	Pyrimicarbe
Clomazone	Glufosinate	Quinmerac
Cymoxanil	Glyphosate	S-metolachlore
Cyperméthrine	Heptachlore	Spiroxamine
Zeta-cyperméthrine	Iprodione	Tebuconazole
Cyproconazole	Lambda-cyhalothrine	Tebuthiuron
Cyprodinil	Lenacil	Tembotrione
Deltaméthrine	Lindane	Terbuthryne
Dicamba	Linuron	Tolyfluanide
Dicloran	Metamitrone	Triadimenol
Dicofol	Métazachlore	Triallate
Dieldrine	Metribuzine	Trifloxystrobine
Difenoconazole		

Rétention

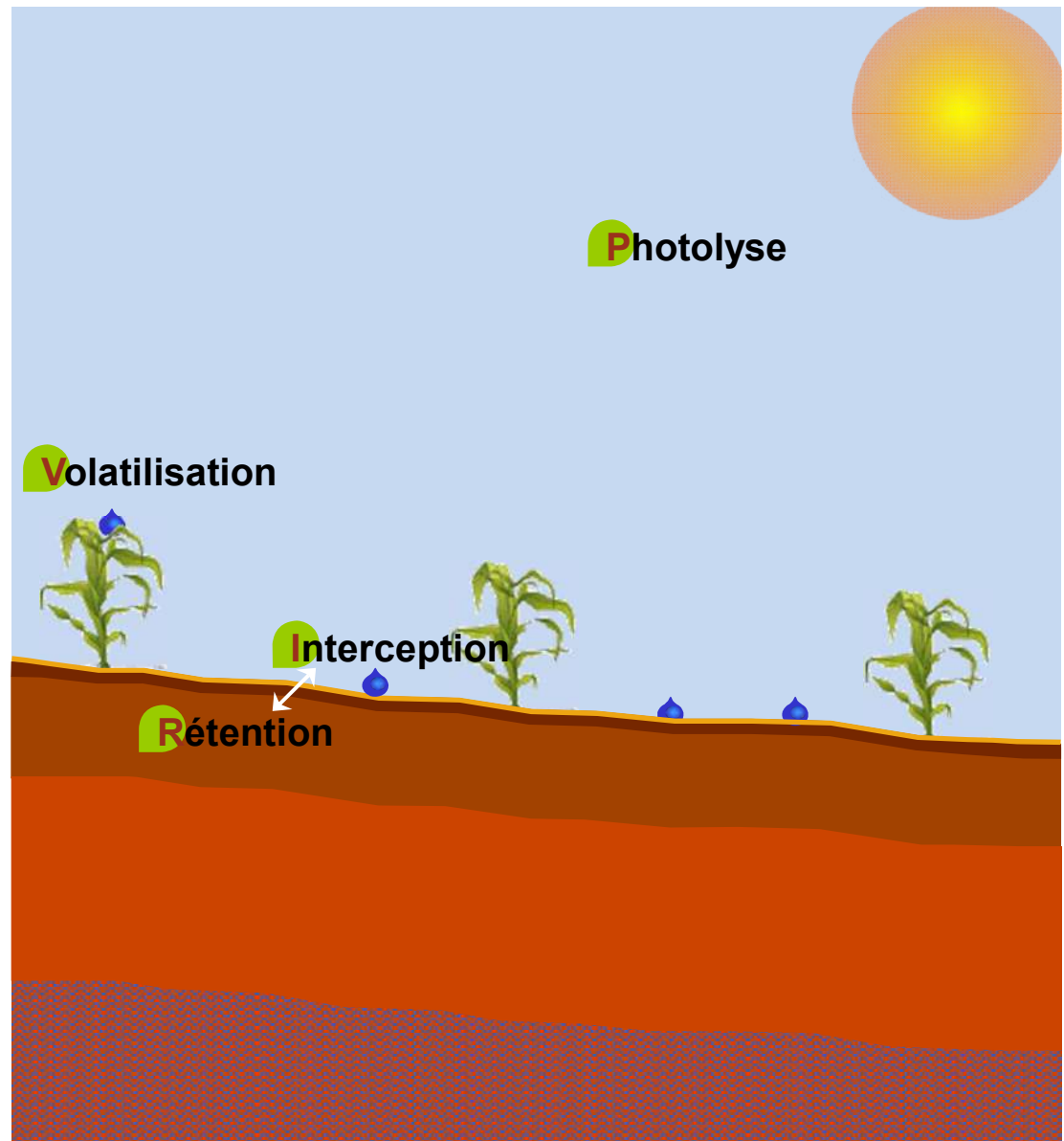


► Variabilité importante en fonction :

- molécules
- pH
- composition physicochimique du milieu : surtout MO et argiles !
- pratiques culturales

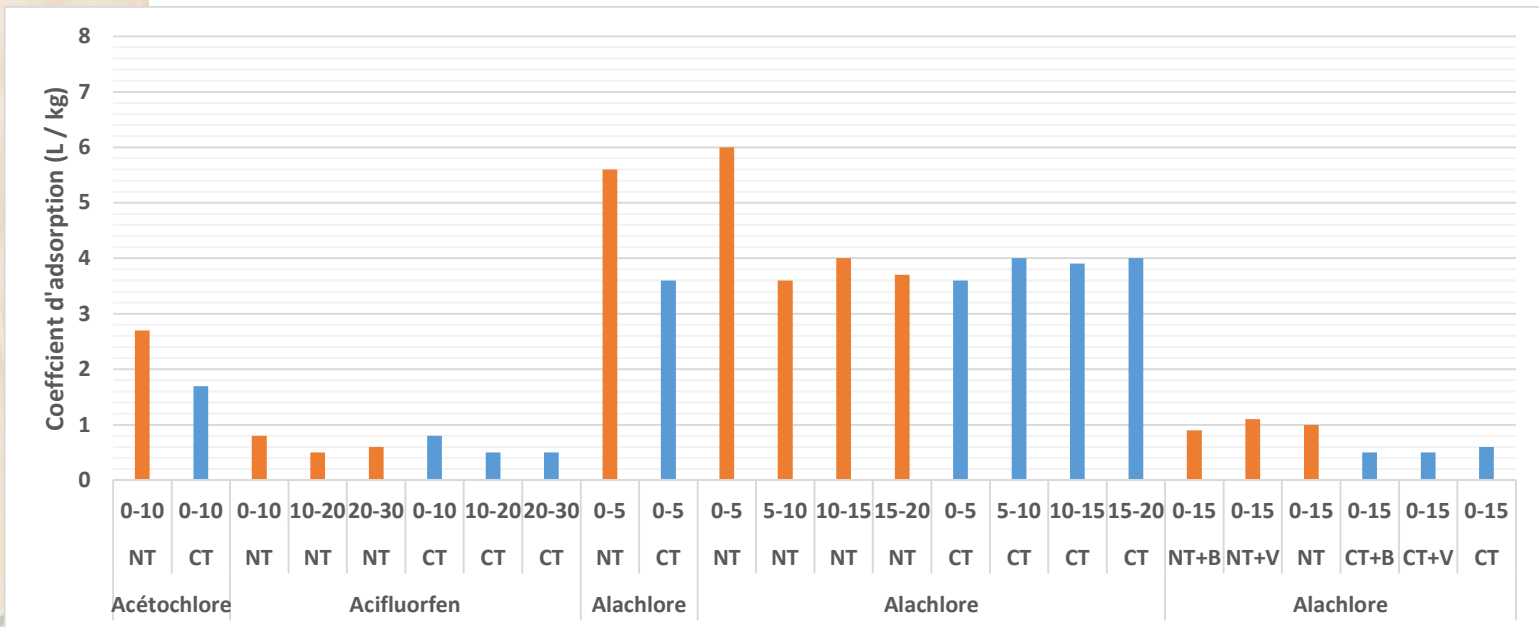
Photolyse

Volatilisation

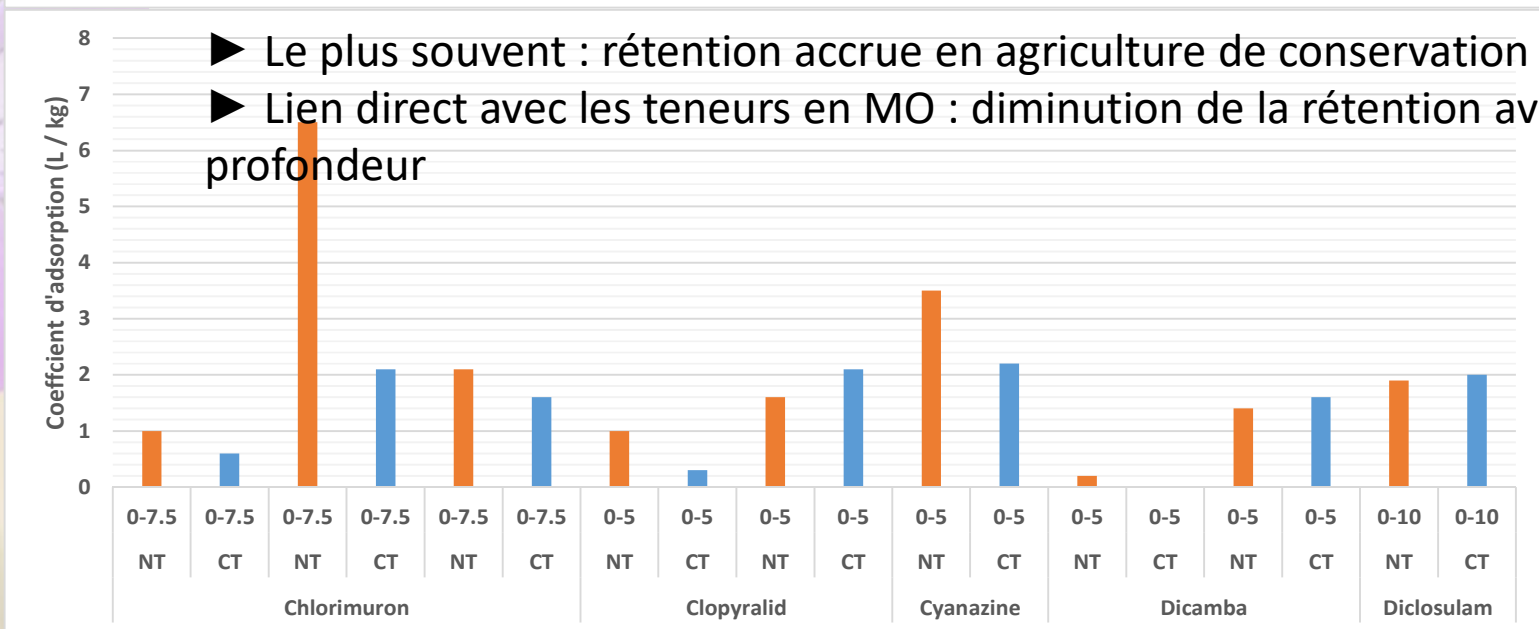


Rétention

Effets de pratiques de travail du sol

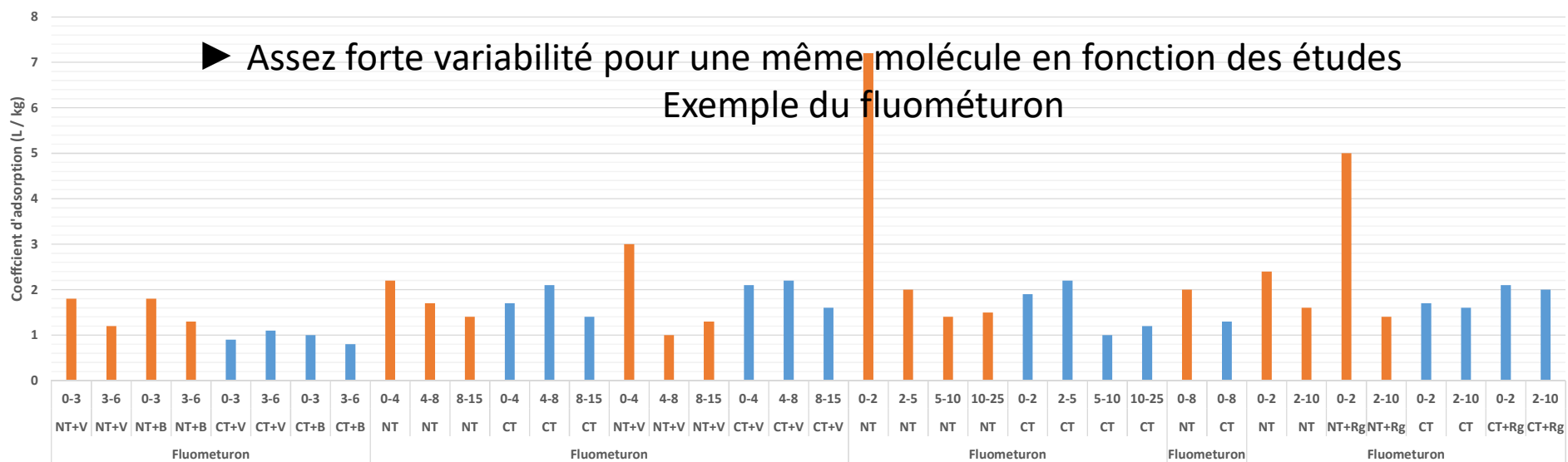


- ▶ Le plus souvent : rétention accrue en agriculture de conservation
- ▶ Lien direct avec les teneurs en MO : diminution de la rétention avec la profondeur

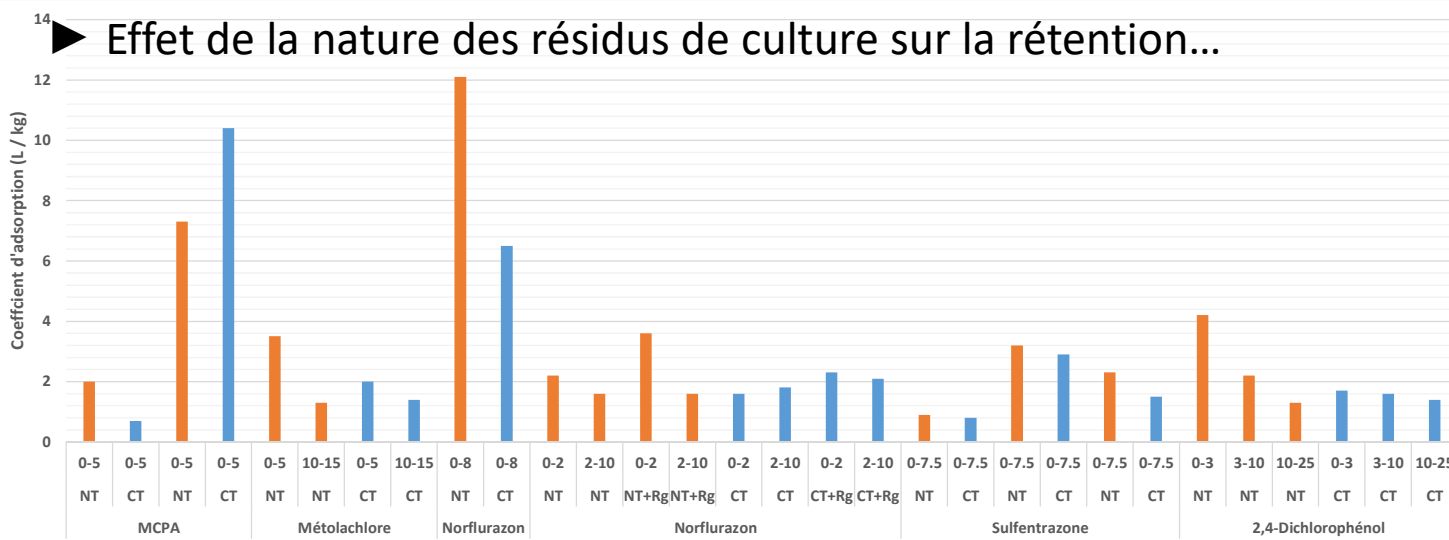


(Alletto et al., 2010)

► Assez forte variabilité pour une même molécule en fonction des études
Exemple du fluométron
















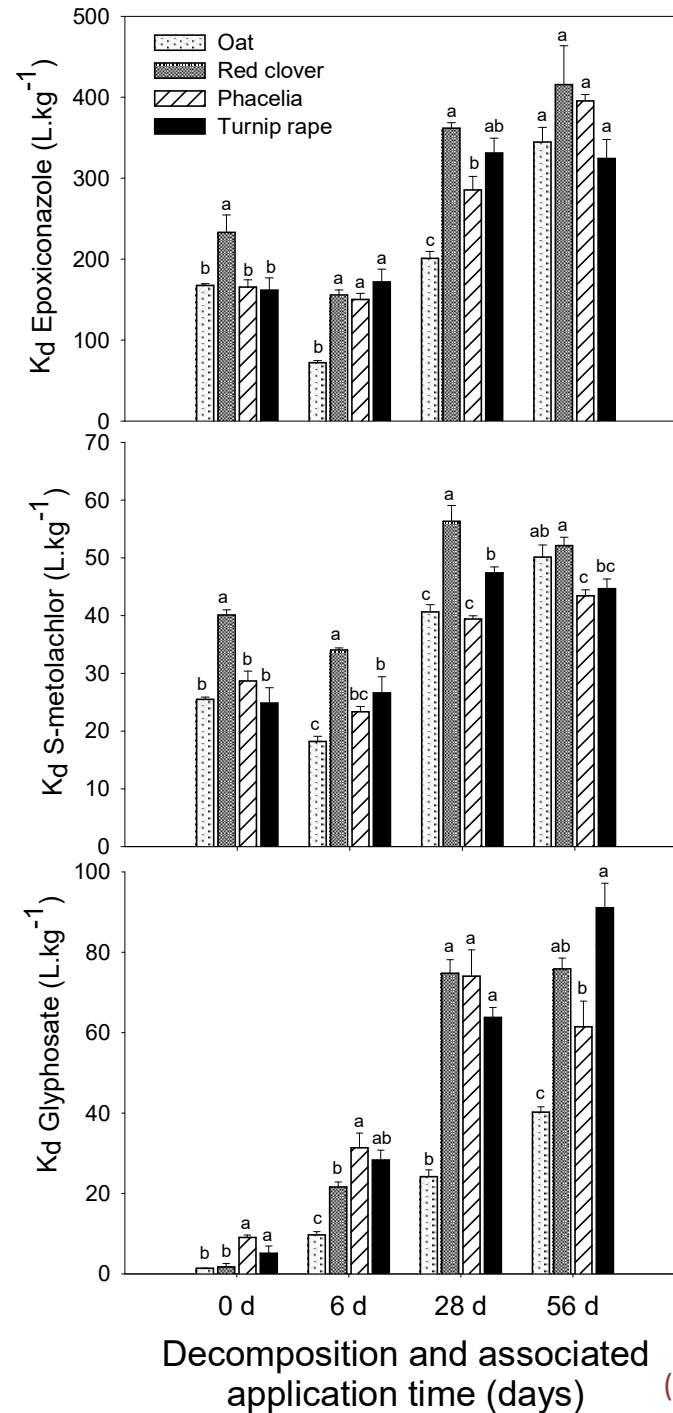
► Effet de la nature des résidus de culture sur la rétention...



Rétention

Effets des résidus de culture à la surface du sol

	D ₀	D ₇	D ₂₈	D ₅₆
Avoine				
Maïs				
Trèfle inc.				
Phacélie				



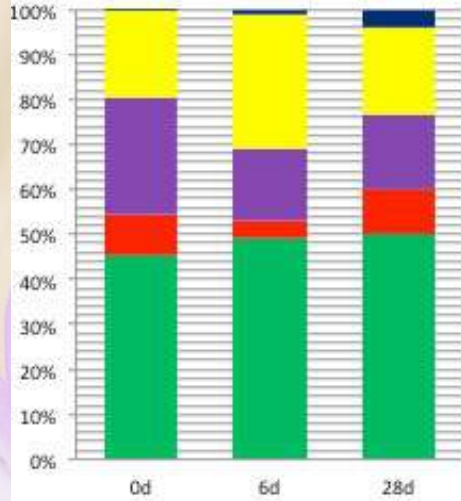
► Augmentation de la rétention avec le vieillissement des résidus de cultures

► En lien avec la modifications de leur composition au cours du temps ?

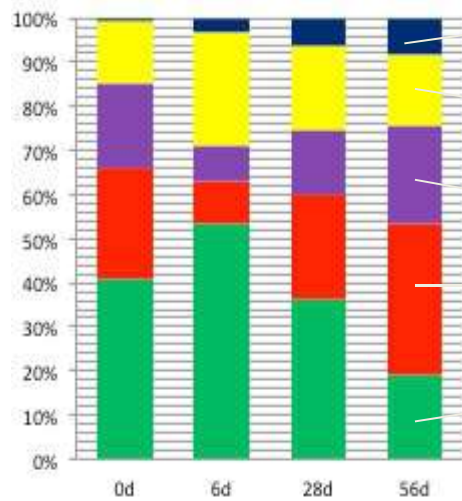
(Cassigneul et al., 2015)

Rétention

Avoine



Trèfle Fractionnement Van Soest



LIC « Lignines + Cutines »

CEL « Cellulose »

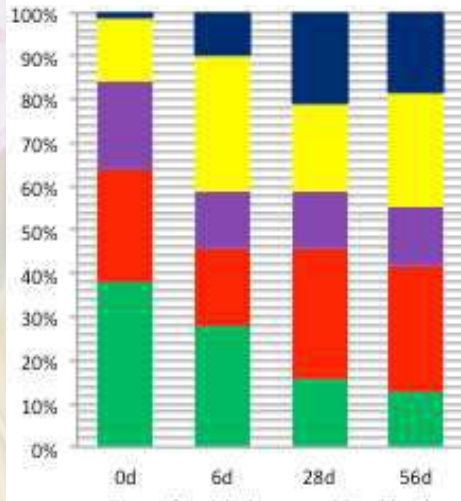
HEM « Hemicellulose »

SOL-Ndf « Soluble – détergent neutre »

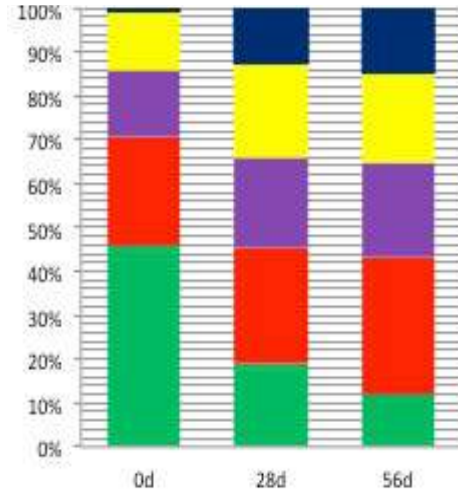
SOL-Eau « Soluble – eau chaude »



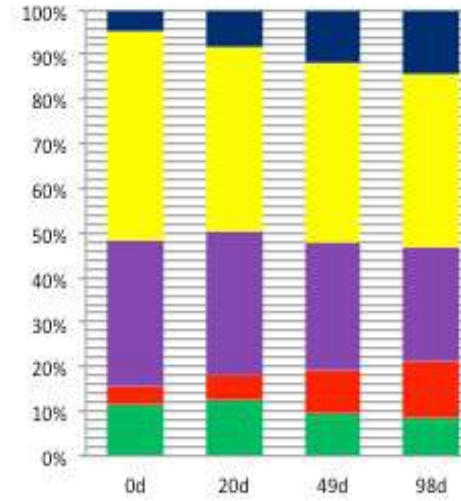
Phacélie



Navette

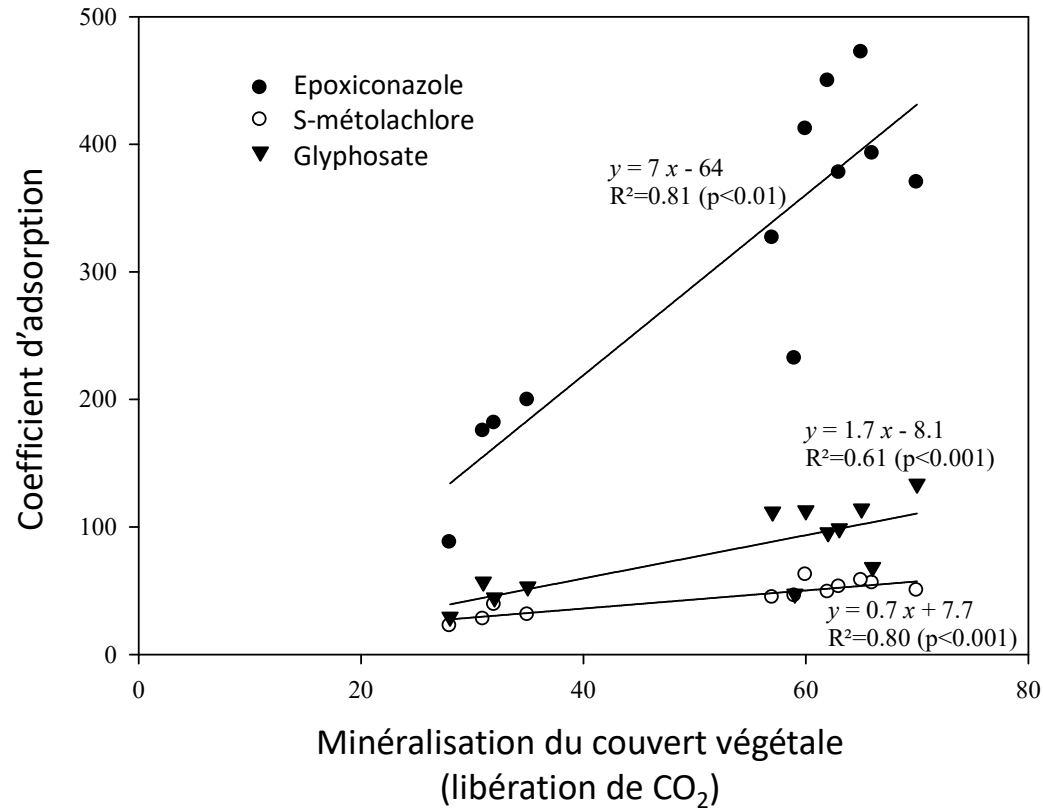


Maïs



(Cassigneul et al., 2015)

Effets des résidus de culture se décomposant à la surface du



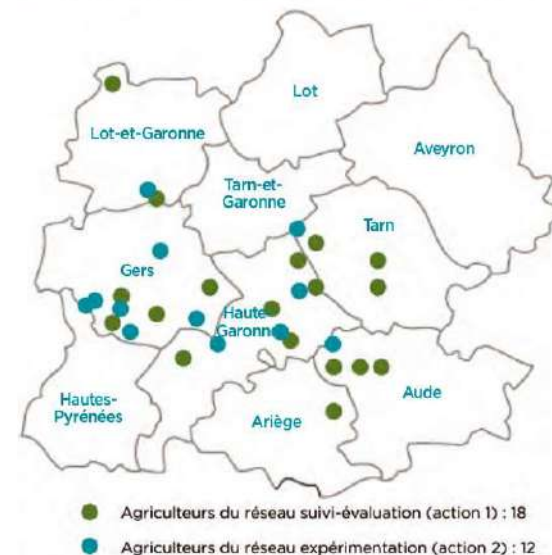
, 2015)

► Relation intéressante entre la rétention de phyto et la minéralisation (= décomposition) des résidus à la surface du sol

Rétention



30 agriculteurs associés au projet



► Prélèvements sur 64 parcelles en non-labour (Strip-till, travail superficiel, semis direct), avec/sans couverts végétaux, rotation de durée variable, ...

Rétention



Agitation ^{14}C -Herbicide +
Eau + CaCl_2

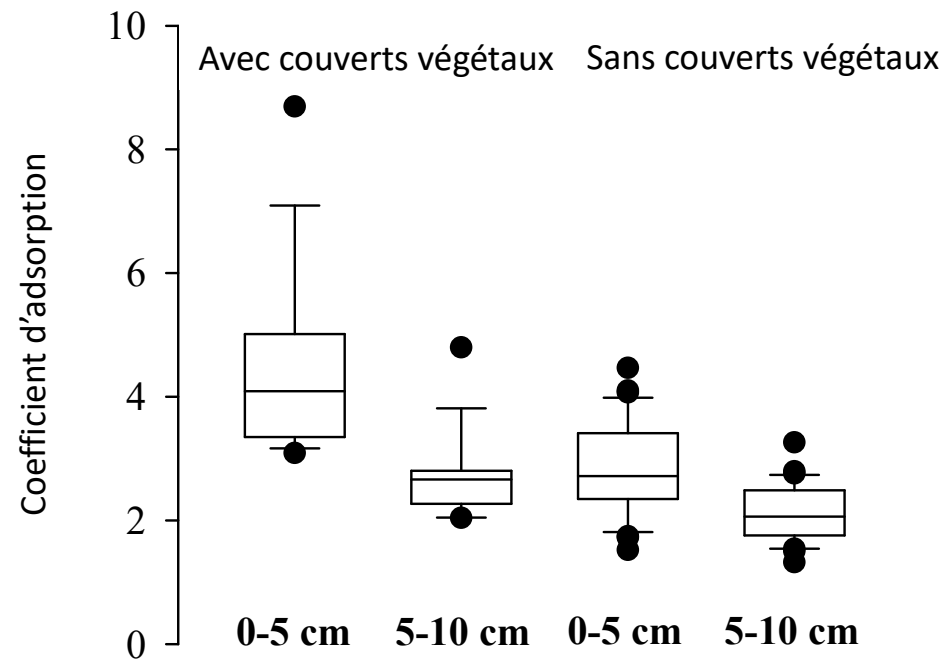
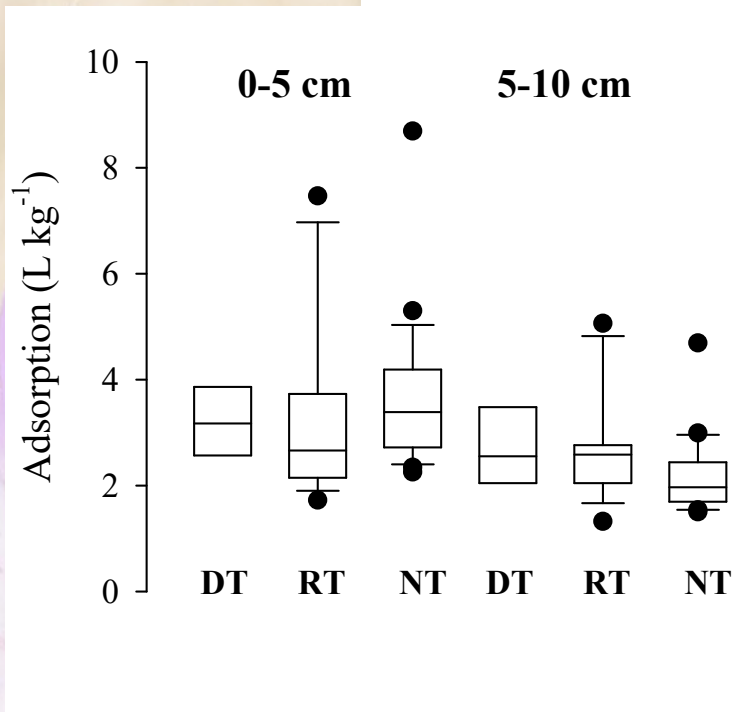


Conditions expérimentales

- T°C: 25°C
- Obscurité

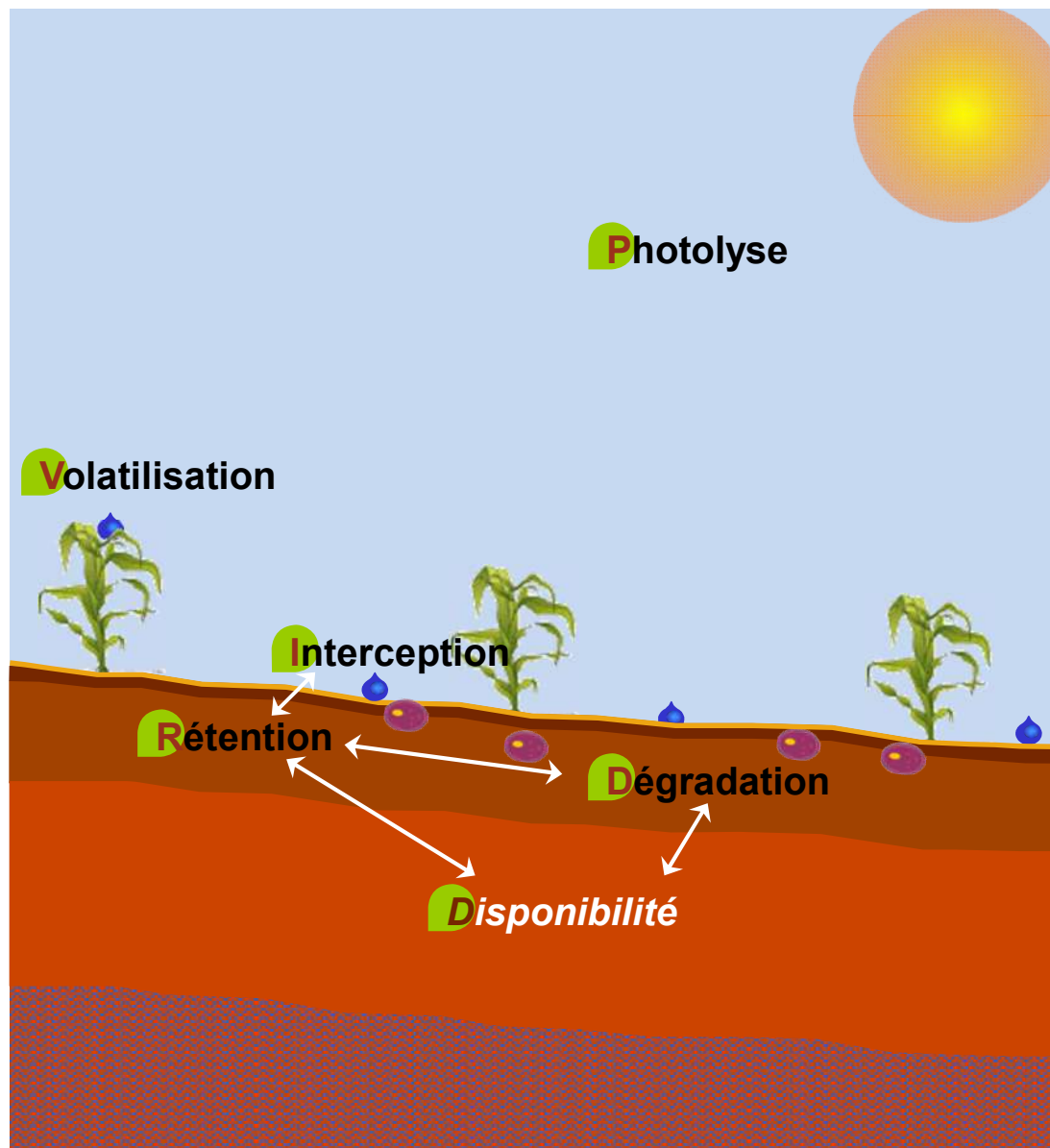
Coefficient d'adsorption K_D et K_{OC} : quantité de molécule pouvant se fixer sur les composés organo-minéraux

Rétention



► Adsorption du S-métolachlore plus élevée dans les sols non labourés recevant des couverts végétaux vs. sols non labourés sans couverts végétaux

Dégradation



Photolyse

Volatilisation

Interception

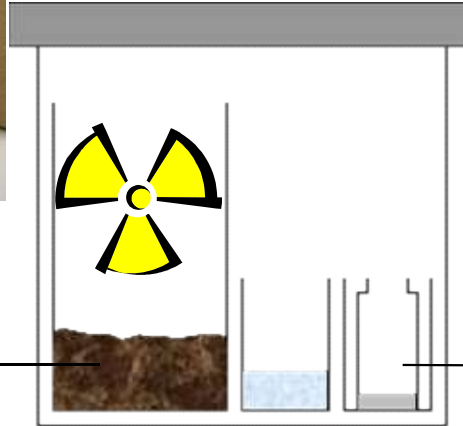
Rétention

Dégradation

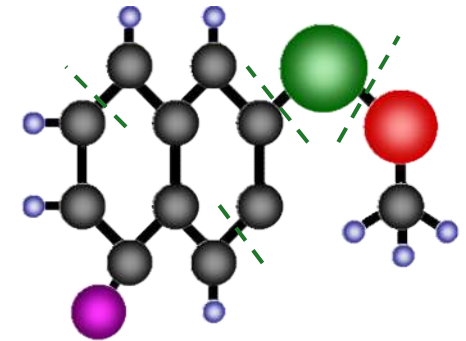
Disponibilité

• = eau + pesticide
• = microorganismes

Dégradation : étude au laboratoire



$^{14}\text{CO}_2$: fraction minéralisée



Extraction Eau

+ CaCl_2

Extraction Solvants
organiques

Combustion d'échantillons

=

piégeage du $^{14}\text{CO}_2$

2

Fraction facilement **biodisponible**

3

Fraction plus difficilement **extractible**

Conditions d'incubation

- T°C : ?

- Teneur en eau / Potentiel matriciel

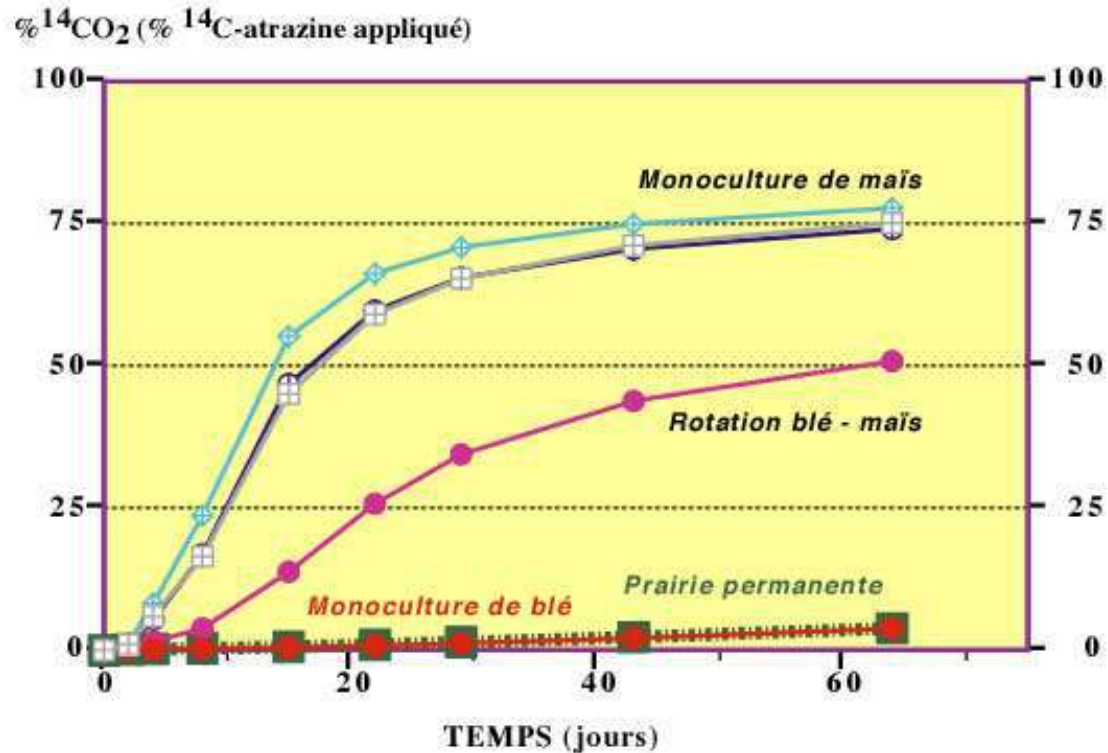
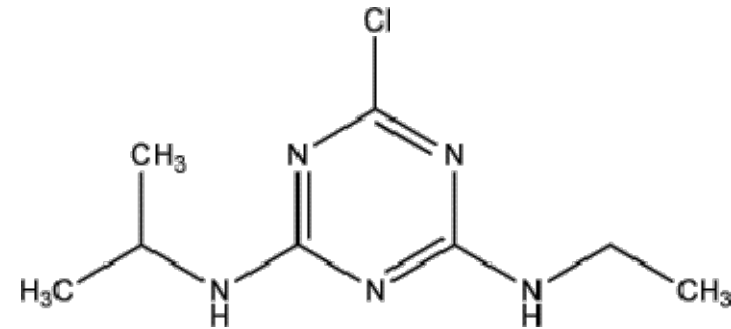
4

Fraction **non-extractible** ("résidus liés")

Analyses par
chromatographie :
formes moléculaires

% Molécule mère (=DT₅₀),
autres métabolites

Dégradation : étude au laboratoire



- La dégradation de certaines molécules dépend de microorganismes spécifiques = la répétition régulière d'un même traitement peut conduire à une accélération de la dégradation par sélection d'une flore adaptée

Dégradation : étude au laboratoire



Labour à la charrue
Période: Avril
Profondeur : 28-30 cm

+



Cultivateur + rouleau + herse plate
Période : Mai
Profondeur : 8 cm

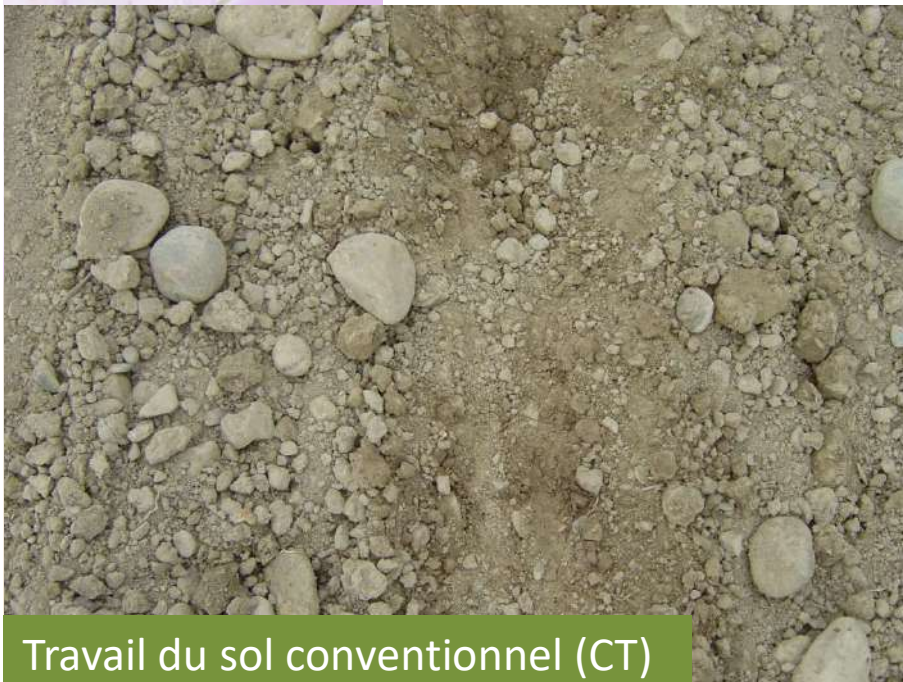


Disques + rouleau
Période : Novembre
Profondeur : 9-12 cm

+



Cultivateur + herse plate
Période : Mai
Profondeur : 8 cm



Travail du sol conventionnel (CT)

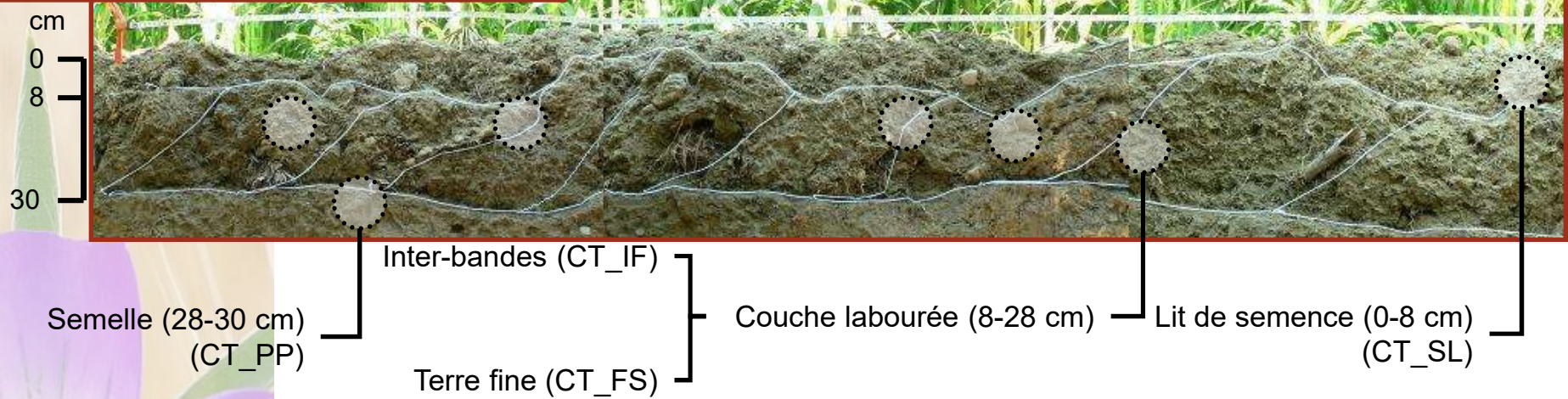
cm



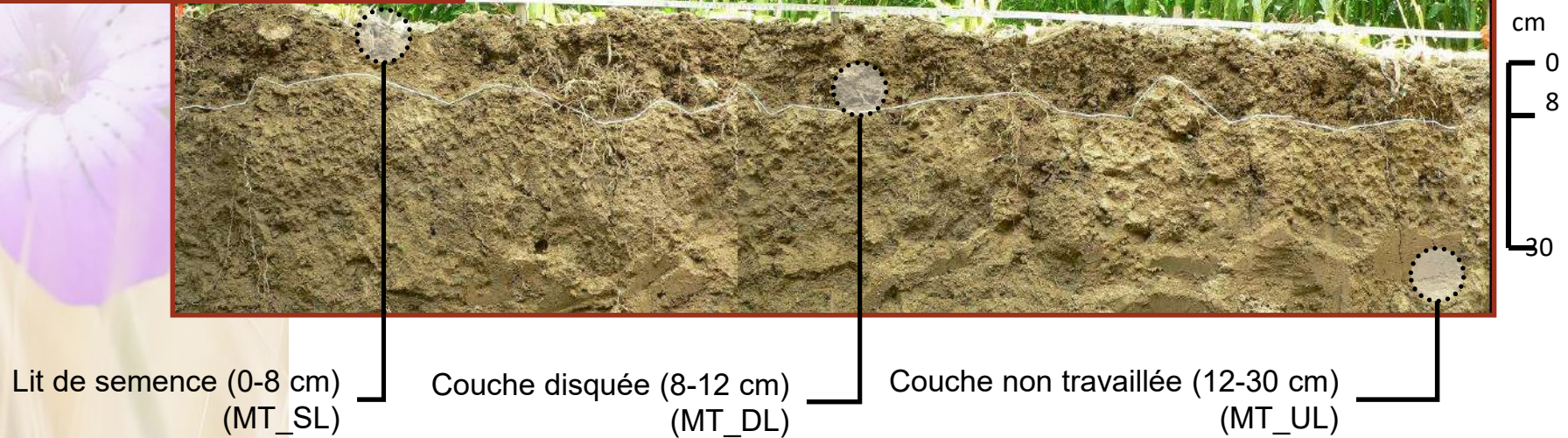
Travail superficiel du sol (MT)

Dégradation : étude au laboratoire

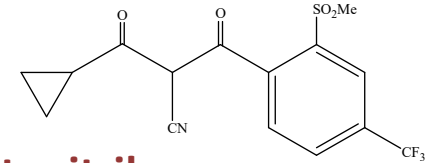
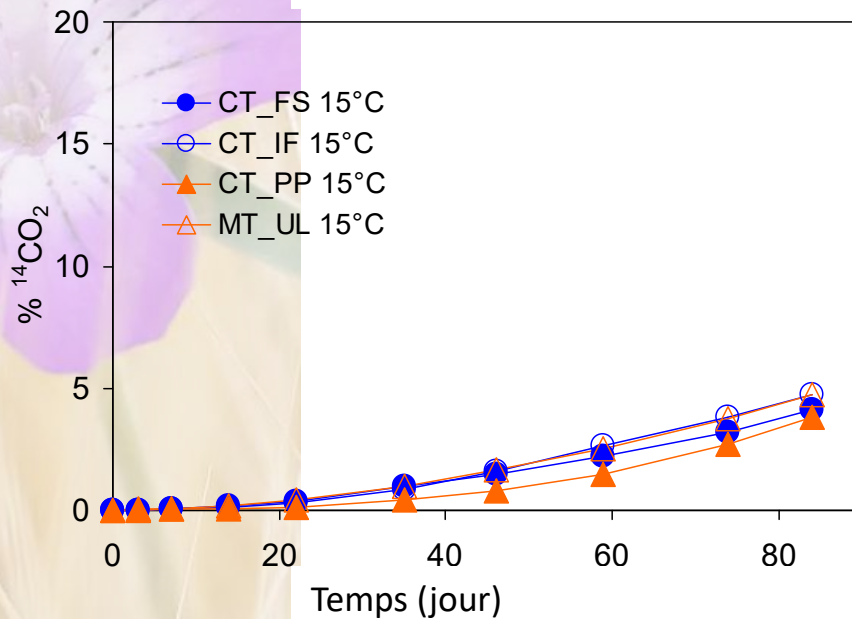
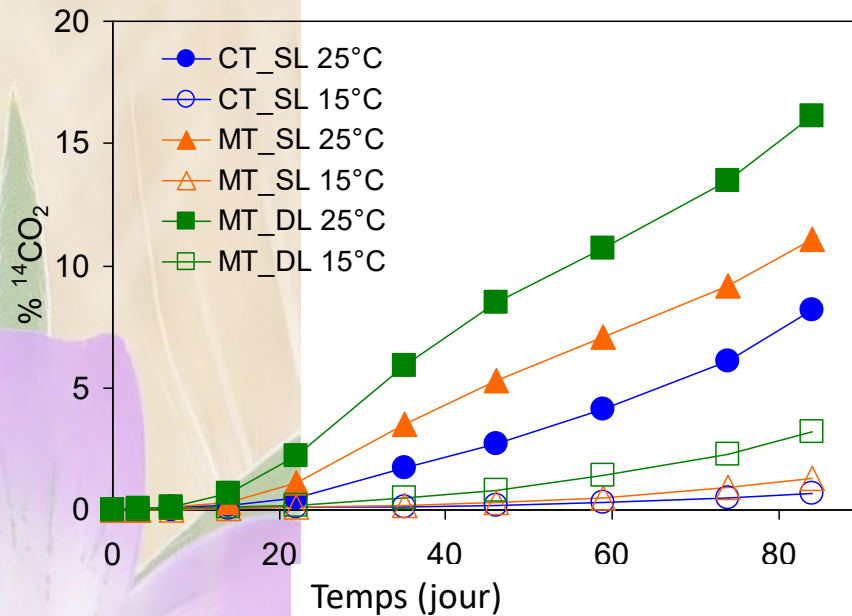
Travail du sol conventionnel (CT)



Conservation tillage (MT)



Dégradation : étude au laboratoire



Etude du dicétonitrile

(produit de dégradation à action herbicide de l'isoxaflutole)

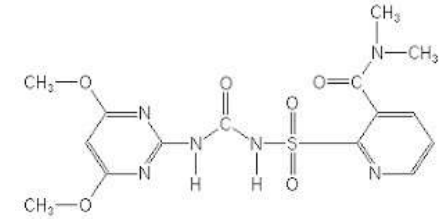
► Pas de différence dans le lit de semence en CT et MT

► Minéralisation plus forte dans la couche disquée = moins de résidus que dans le lit de semence avec moins de rétention (compétition réduite entre ces processus)

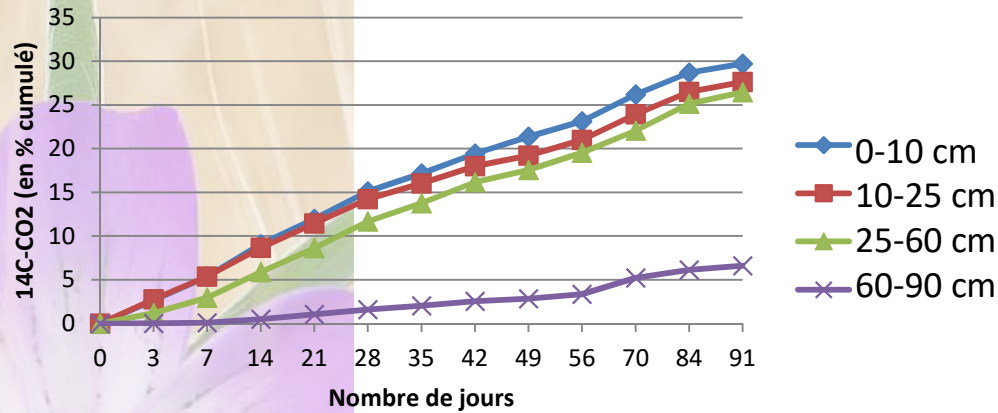
► Pas de différence dans les horizons profonds en CT et MT

Dégradation : étude au laboratoire

Etude du nicosulfuron

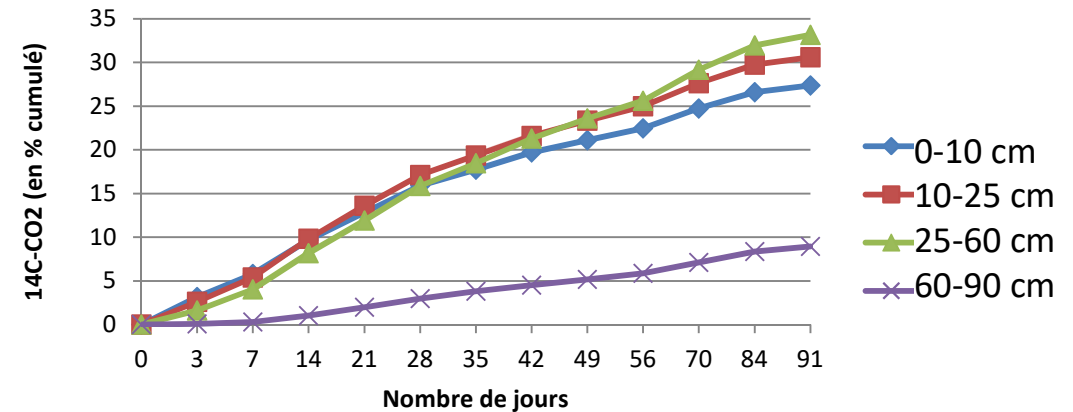


Minéralisation du nicosulfuron Agri. Conventionnelle (64)



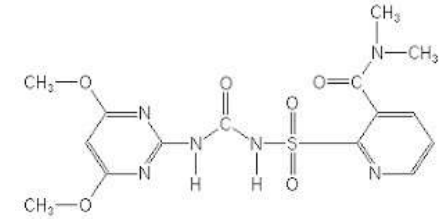
► sur des sols riches en MO :
→ Pas de modification de la
dégradation des molécules étudiées

Minéralisation du nicosulfuron ACS (64)

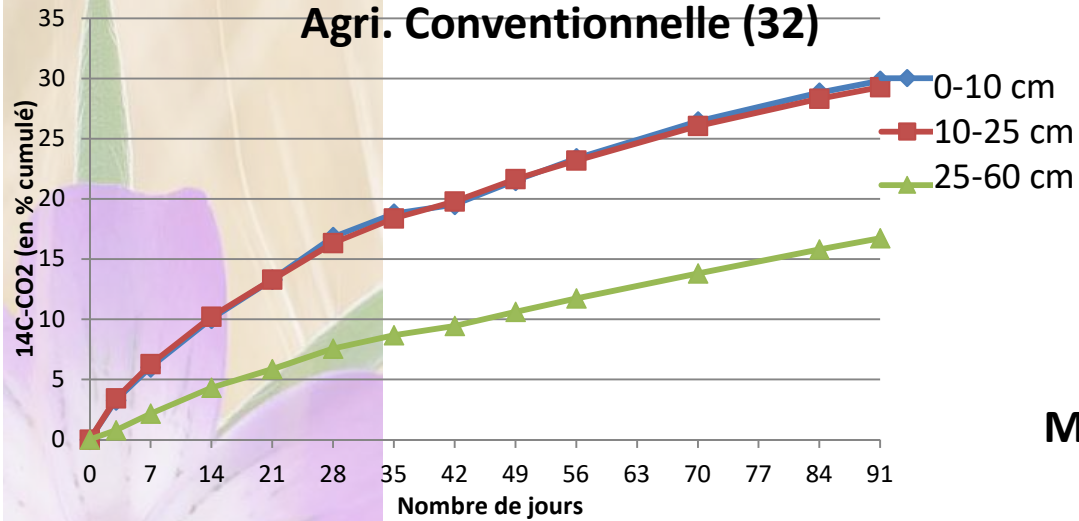


Dégradation : étude au laboratoire

Etude du nicosulfuron



Minéralisation du nicosulfuron Agri. Conventionnelle (32)

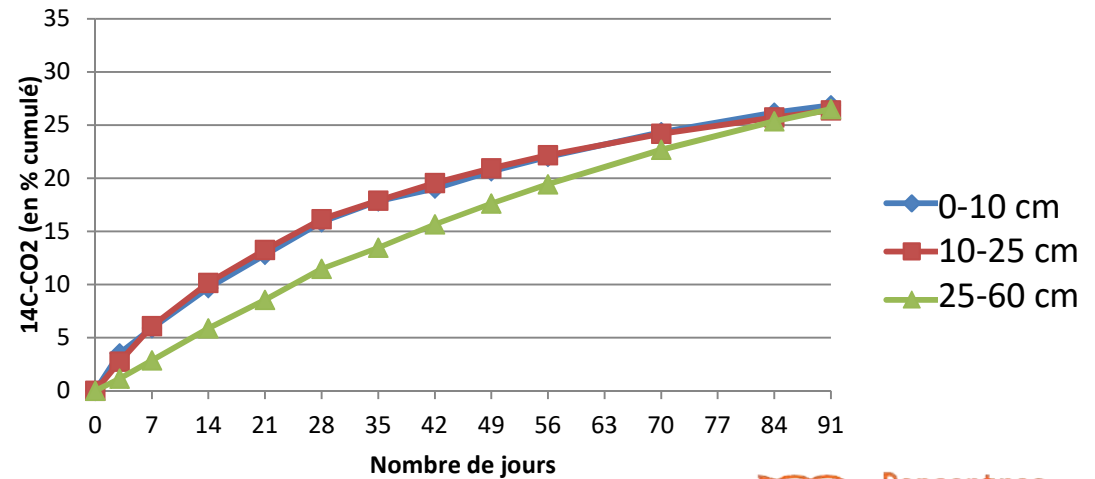


► sur des sols initialement pauvres en MO :

→ Peu de différence

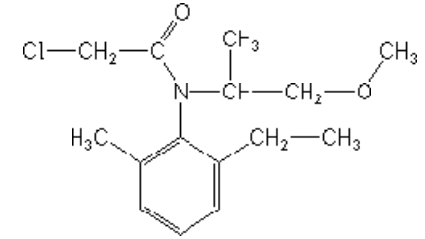
→ Augmentation sensible de la minéralisation dans l'horizon « profond »

Minéralisation du nicosulfuron ACS (32)

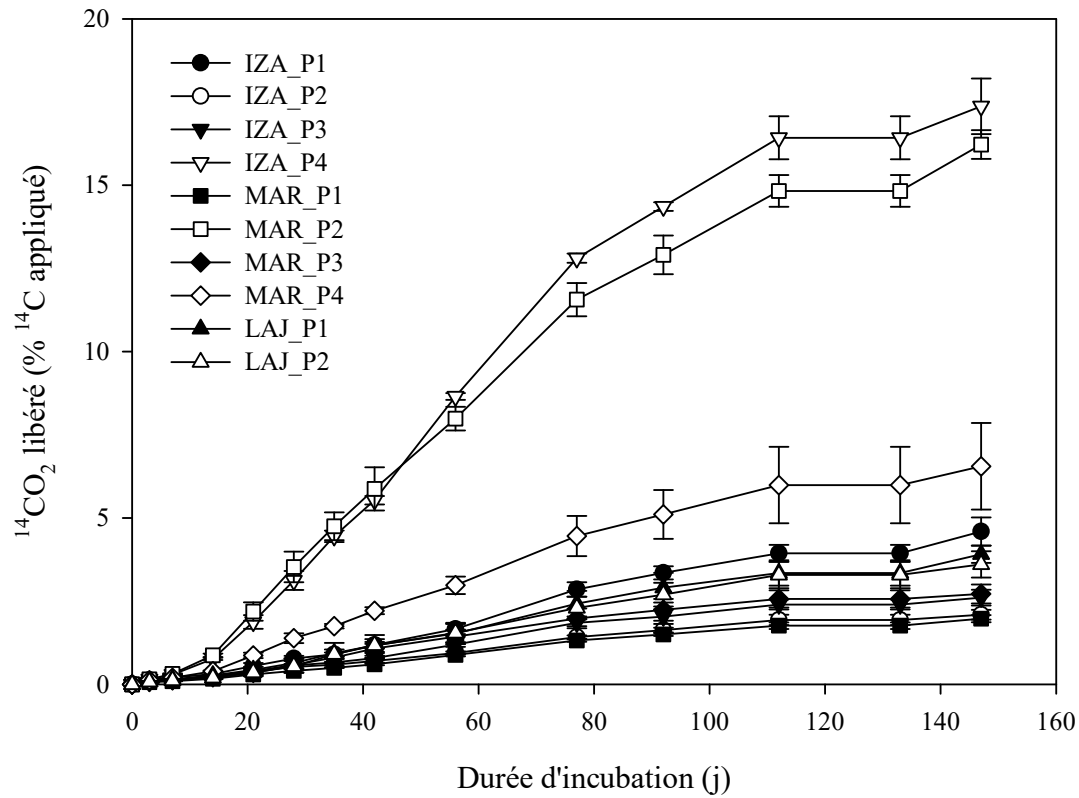


Dégradation : étude au laboratoire

Etude du S-métolachlore



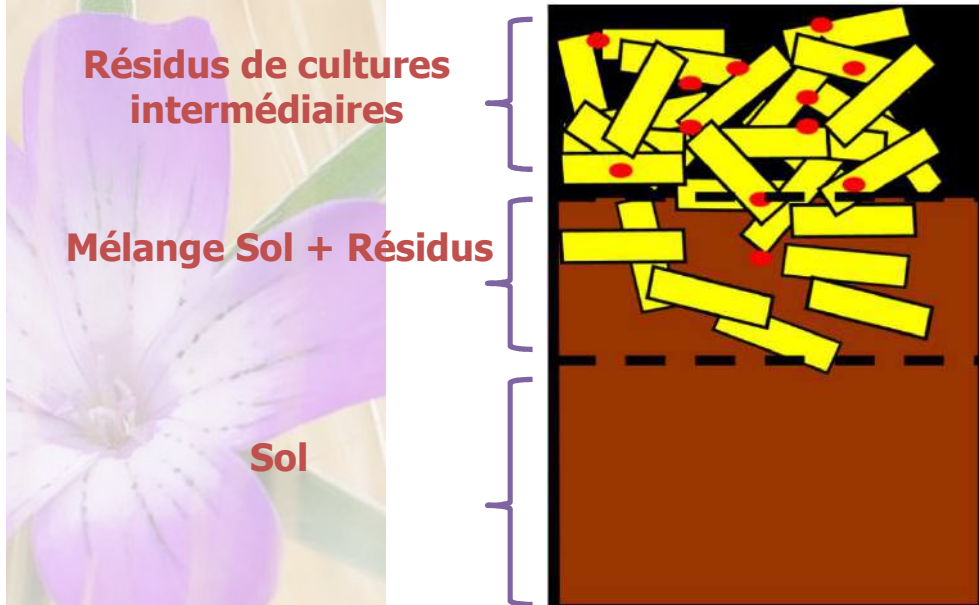
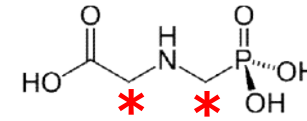
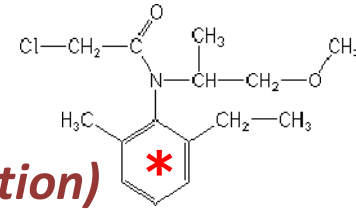
Echantillons de sols en parcelles en agriculture de conservation



► Variabilité en fonction des sols, des systèmes de culture

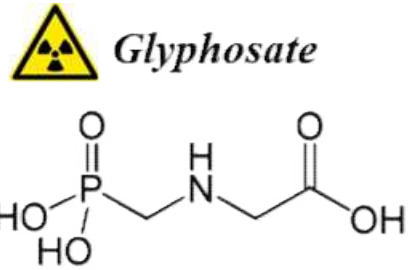
Dégradation : étude au laboratoire

Effets de la nature et de l'âge (degré de décomposition) des résidus sur la dégradation d'herbicides



Piège à soude = $^{14}\text{CO}_2$

Dégradation : étude au laboratoire



Minéralisation

Extractible

Résidus non extractibles (...)

Elevé

Elevé avec bcp de métabolites

Faible

Sol nu

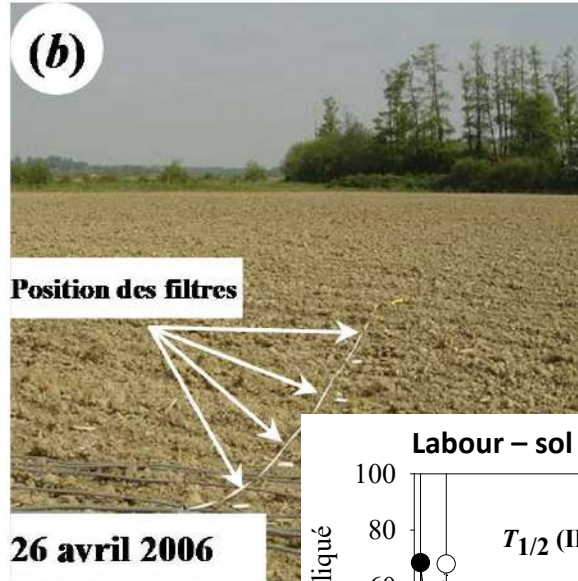
Faible

Faible avec peu de métabolites

Elevé

Sol + résidus de CIMS

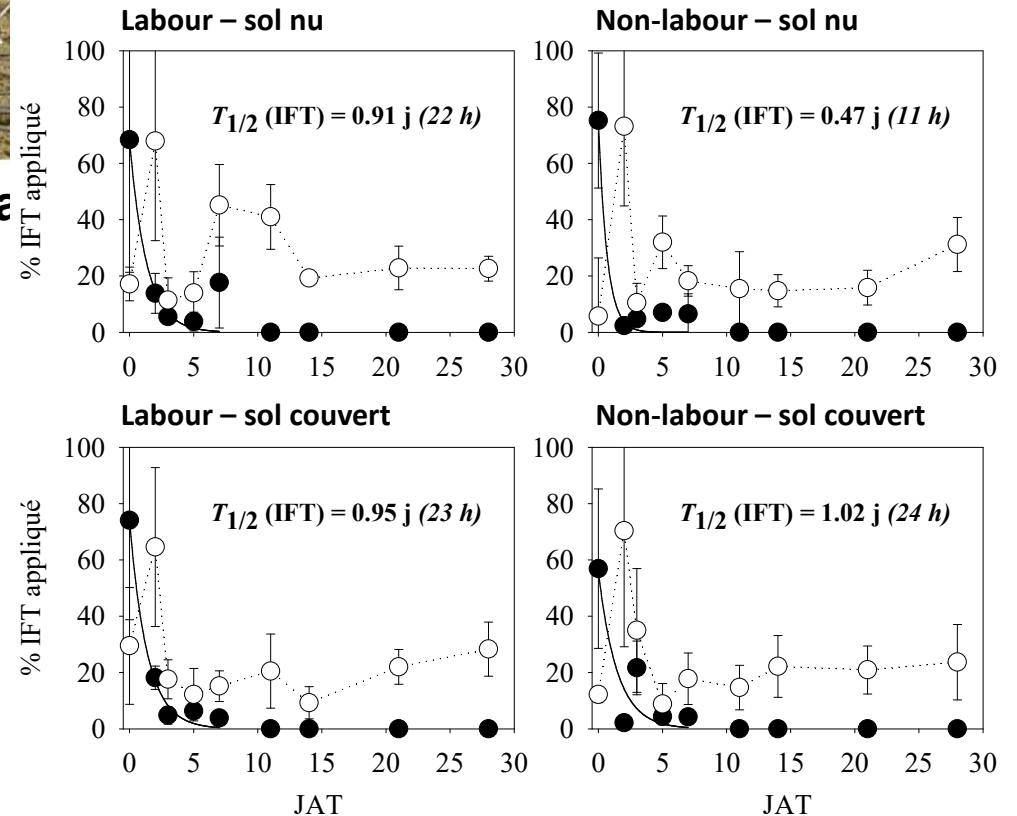
Dégradation : étude au champ



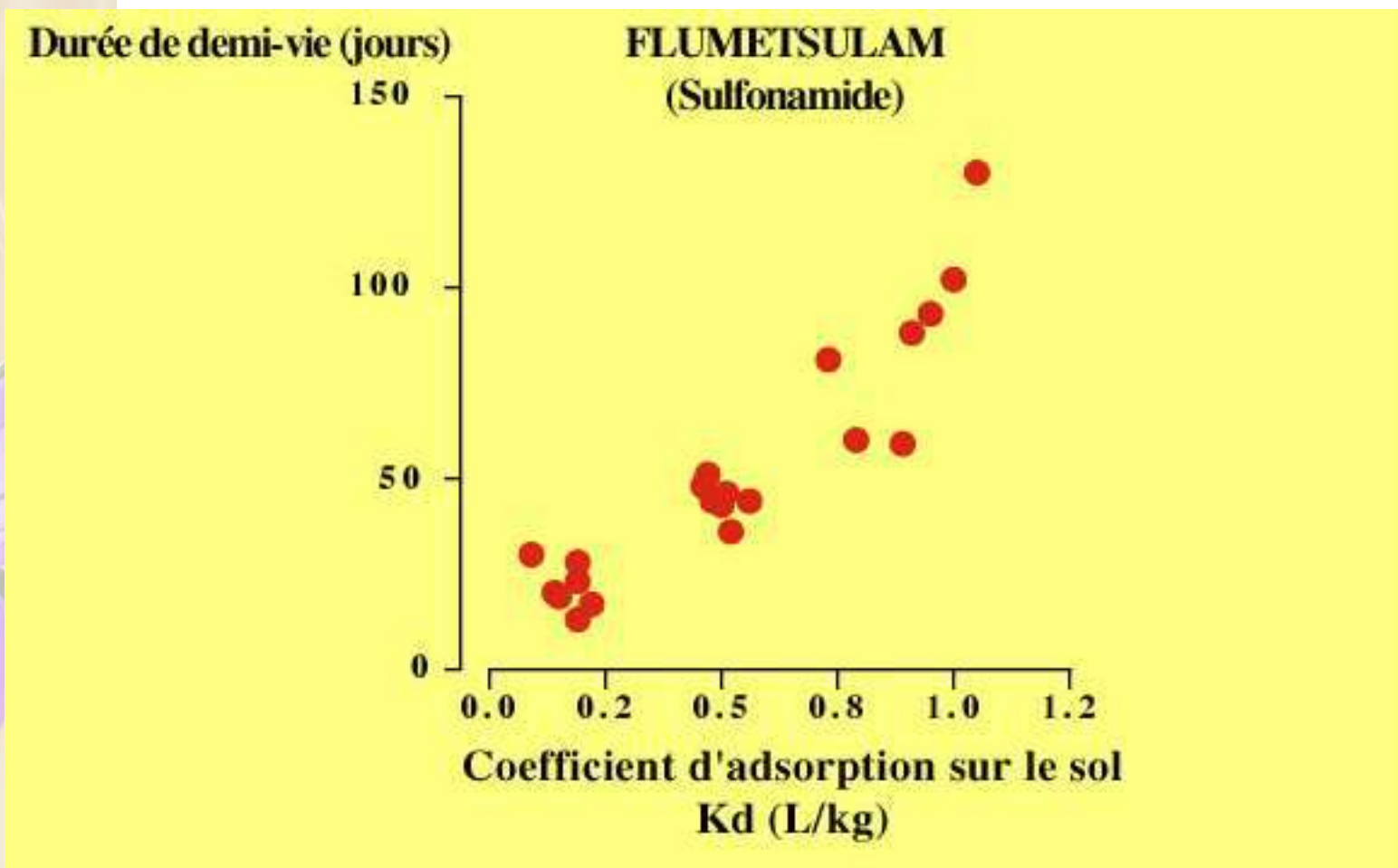
► Dégradation au champ plus difficile à quantifier :
 → Effort porté sur le suivi des transferts

Estimation de la variabilité de l'épanda

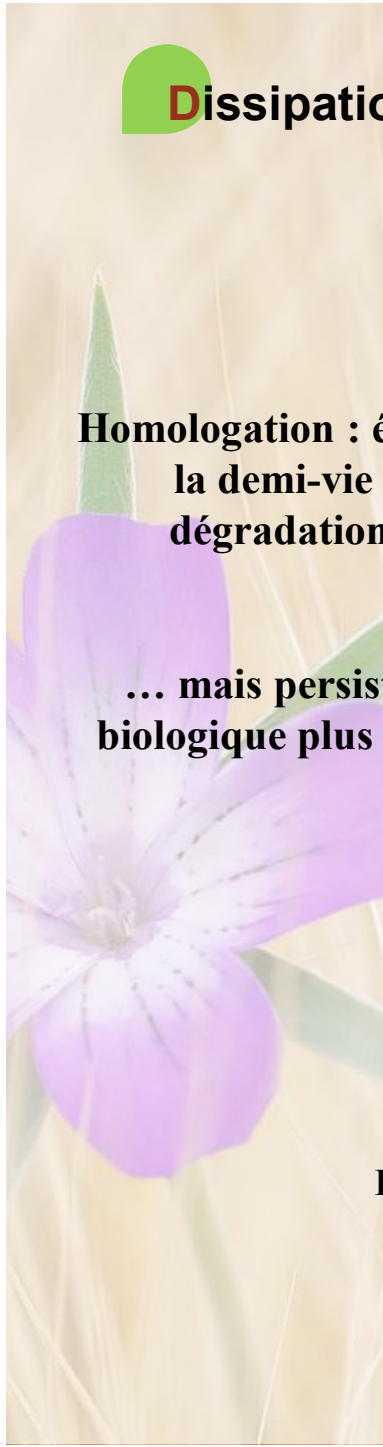
Ajustement non linéaire (cinétique d'ordre 1) = Estimation de la $T_{1/2}$



Dégradation / Rétention : illustration de la compétition

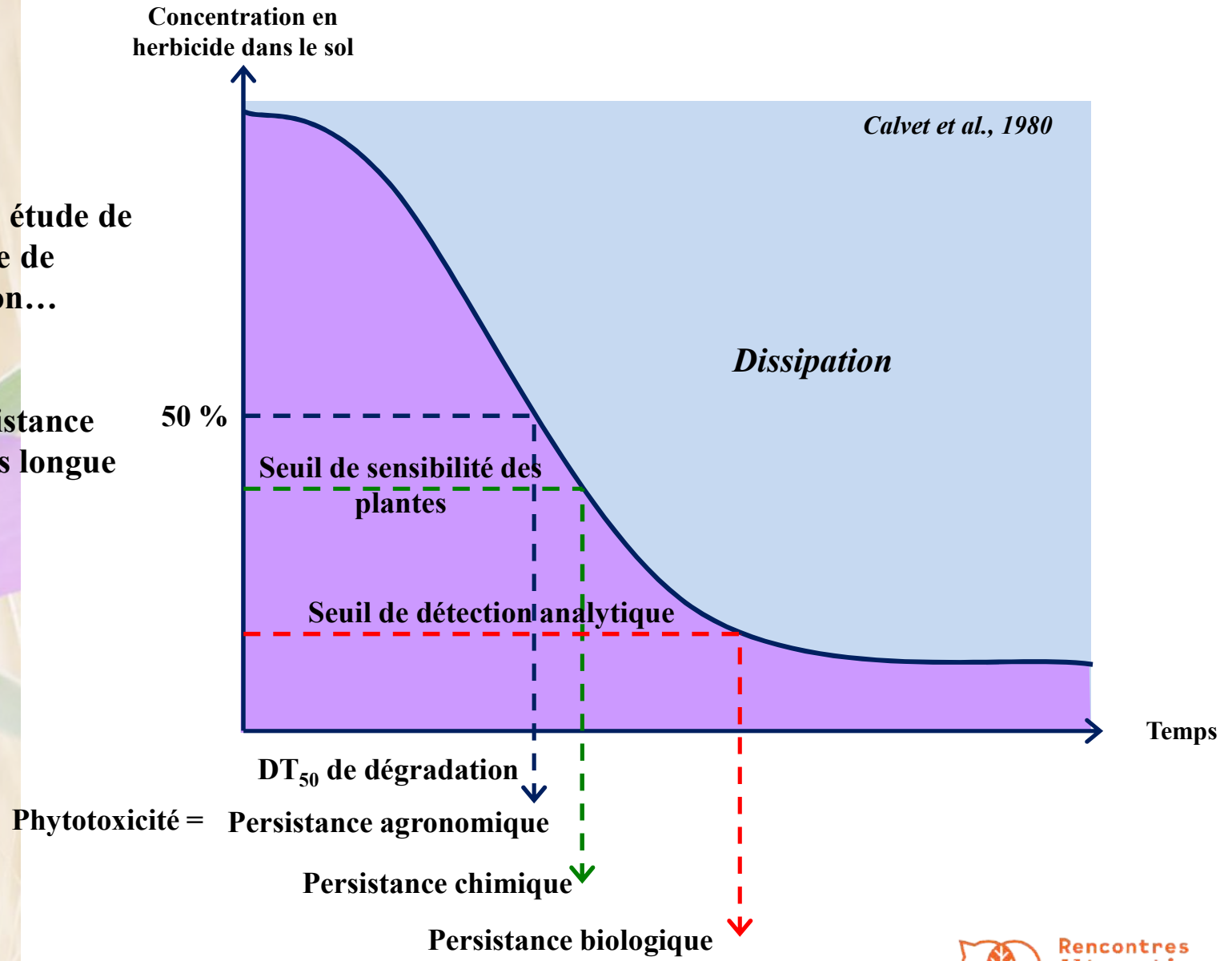


Dissipation



Homologation : étude de la demi-vie de dégradation...

... mais persistance biologique plus longue



Dégradation : devenir du glyphosate après absorption par la plante

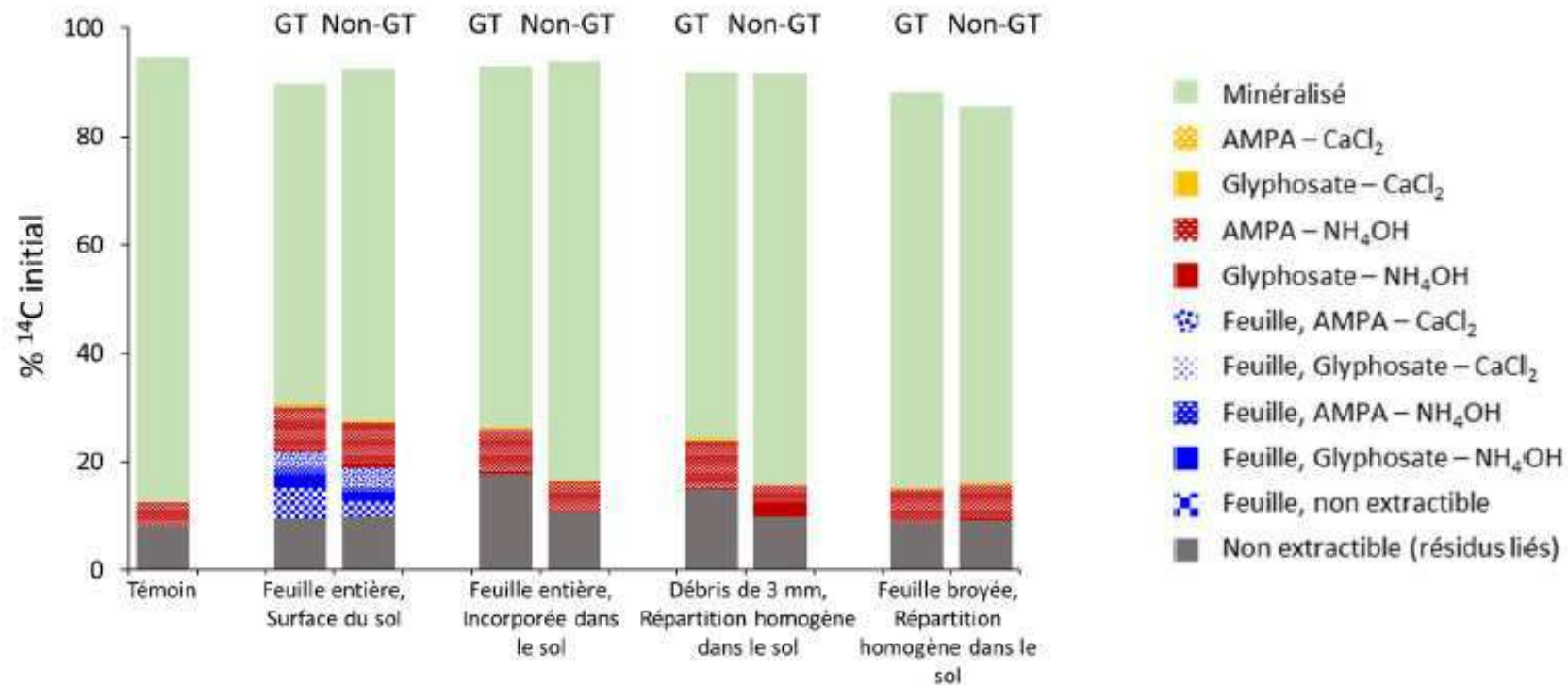


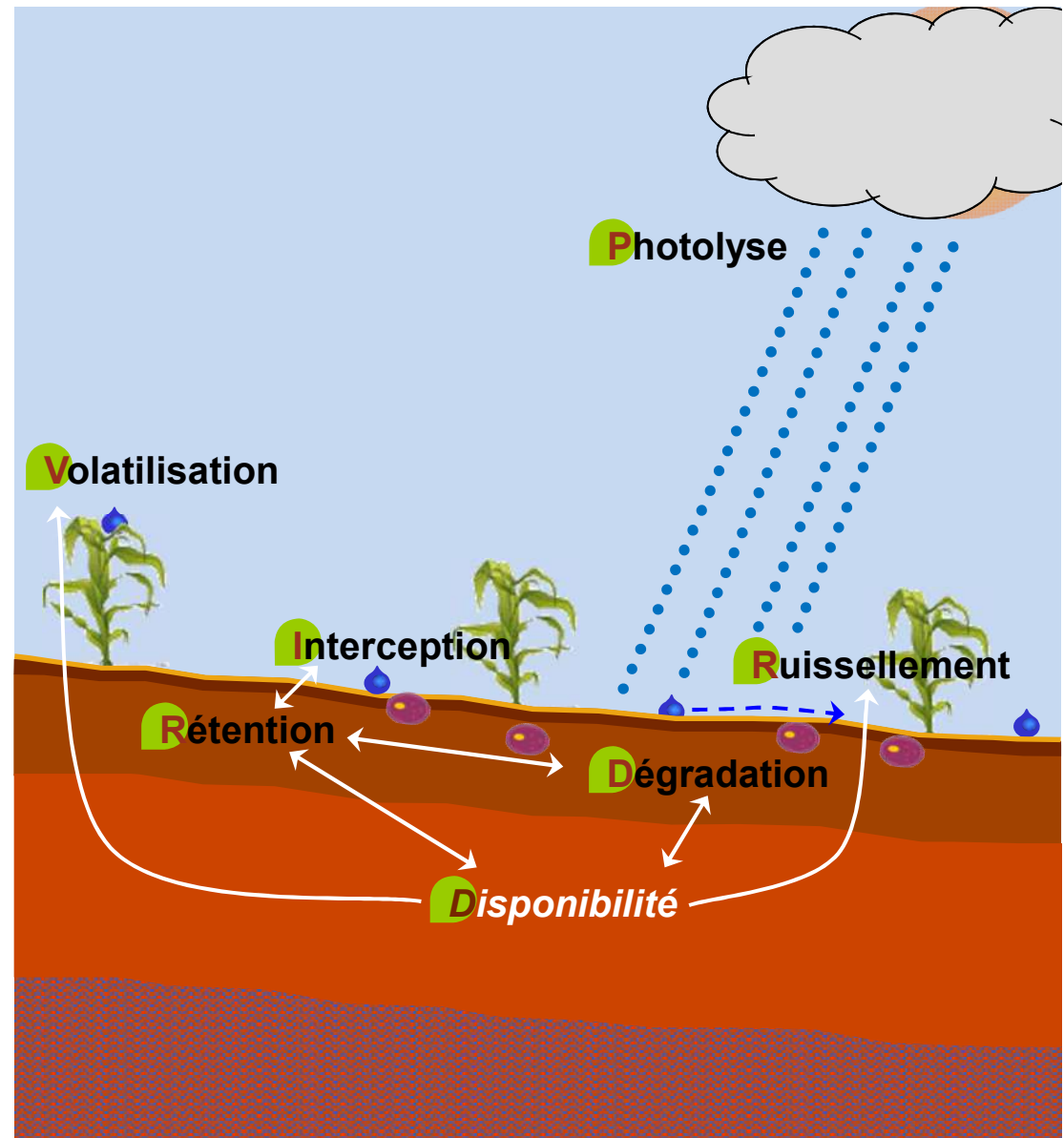
Figure 2.10. Distribution du ¹⁴C-glyphosate entre les fractions minéralisées, extractibles et non extractibles, après 80 jours d'incubation dans le cambisol calcaire à 28 °C. Exemple des résidus de glyphosate dans des feuilles de colza résistant (GT) et non résistant (non-GT) au glyphosate : feuille entière placée à la surface du sol ou incorporée dans le sol, débris de 3 mm répartis de manière homogène dans le sol, débris de feuille broyée répartis de manière homogène dans le sol. Témoin : application directe de glyphosate sur le sol (d'après Mamy et al., 2016a)

Ruissellement & Erosion

- 3-15 % dose appliquée (Fawcett et al., 1994, Lacas et al., 2005)

- variabilité en fonction :

- ▶ propriétés des molécules : Solubilité, Rétention => transport en solution ou par érosion...
- ▶ topographie
- ▶ météo : nombreuses relations
 $\ln [\text{atrazine}]_{\text{runoff}} = a + b \cdot \ln$
(number of days after treatment)
(Triplett et al., 1978)
- ▶ pratiques culturales : travail du sol, couverture du sol, ...



Ruissellement & Erosion

1- Réduire l'énergie cinétique des pluies

► Présence d'un couvert végétal à la surface du sol



Période d'interculture



Cycle cultural des cultures marchandes

► Présence d'un mulch

mélange sorgho fourrager + trèfle Alexandrie

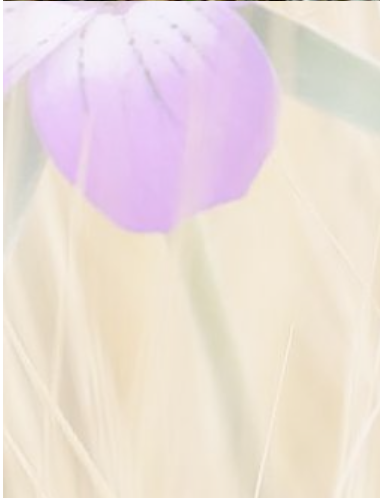


mélange navette + moutarde éthiopienne + trèfle Alexandrie



Ruissellement & Erosion

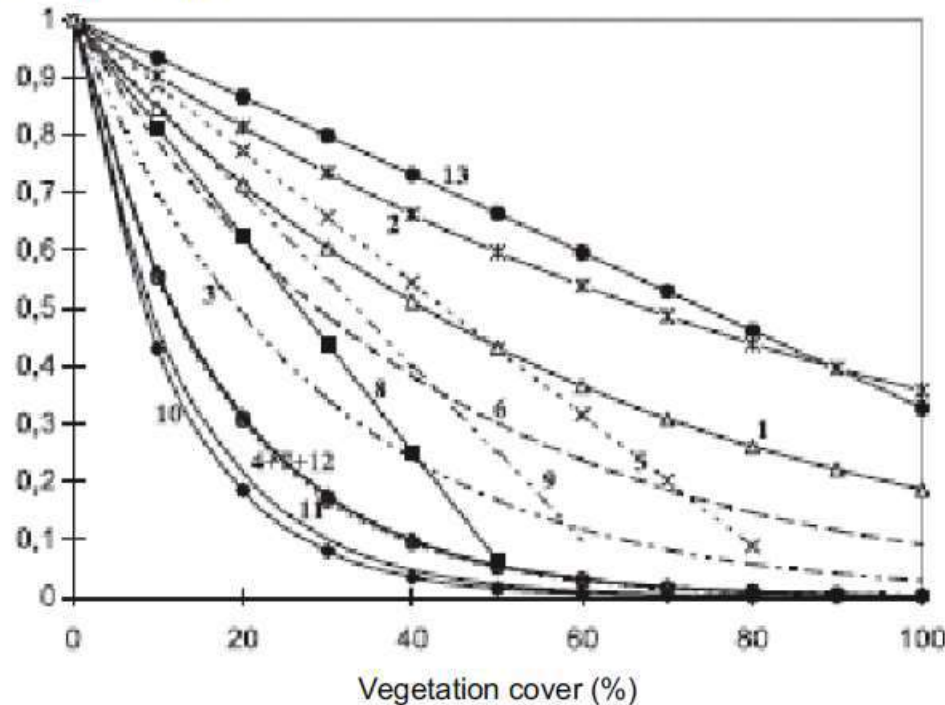
1- Réduire l'énergie cinétique des pluies



Ruissellement & Erosion

1- Réduire l'énergie cinétique des pluies

Relative runoff volume



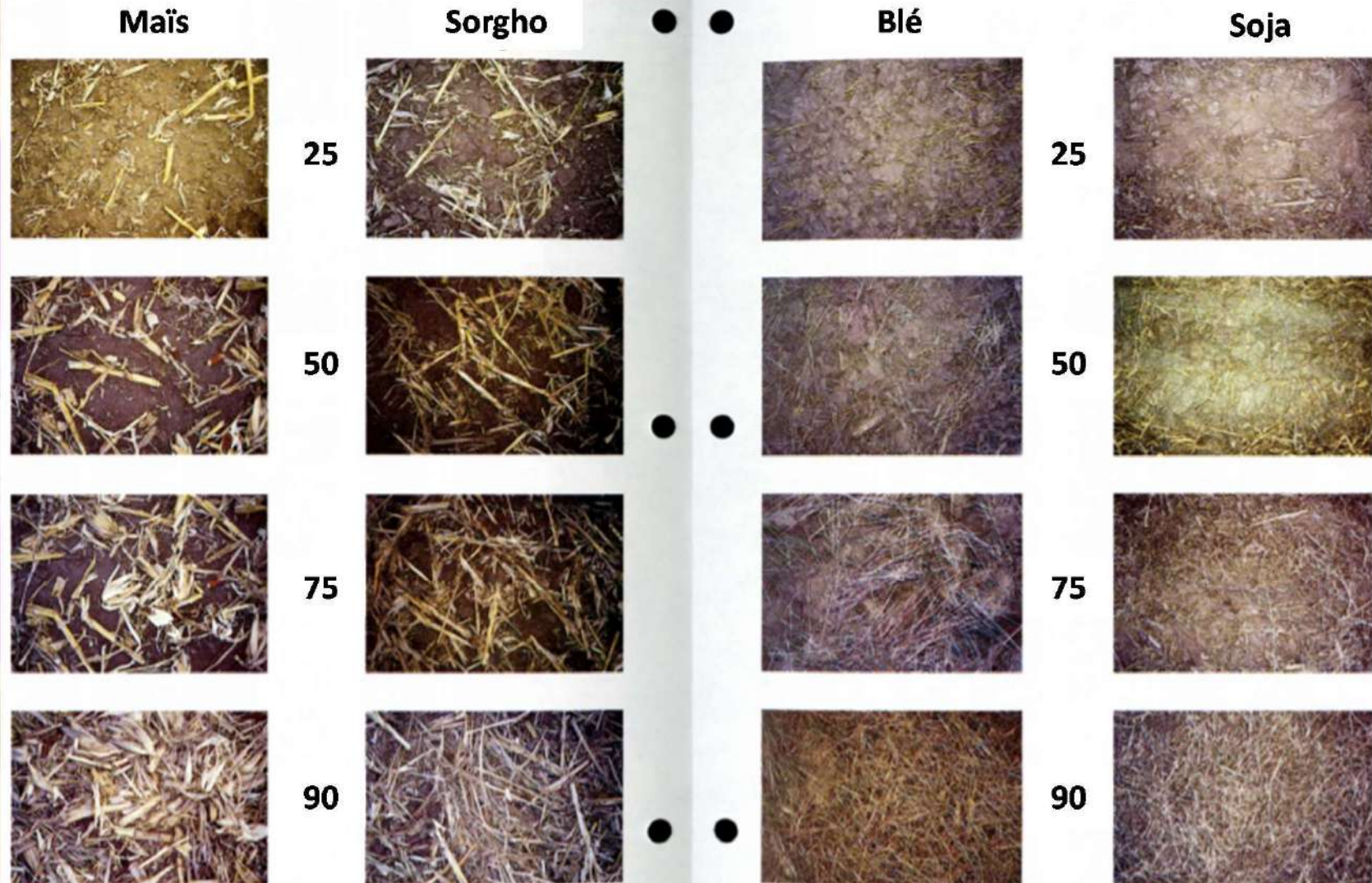
Quantité de résidus (t/ha)	Ruissellement (% précipitations)	Erosion (t/ha)
0	45	12
0,25	40	3
0,5	25	1
1	0,5	0,3
2	0,1	0
4	0	0

Figure 1. Relationship between plant cover and relative runoff. 1, 2, Packer (1951); 3, 4, Marston (1952); 5, Branson and Owen (1970); 6, Elwell and Stoking (1976); 7, Lang (1979); 8, 9, Kainz (1989); 10, 11, Francis and Thornes (1990); 12, Lang (1990); 13, Greene et al. (1994).

Ruissellement & Erosion

1- Réduire l'énergie cinétique des pluies

Photographs for Estimating Percent Residue Cover





Mulching practices for reducing soil water erosion: A review



Massimo Prosdocimi ^{a,*}, Paolo Tarolli ^a, Artemi Cerdà ^b

^a Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry, University of Padova, Agripolis, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro, PD, Italy

^b Soil Erosion and Degradation Research Group, Department of Geography, University of Valencia, Blasco Ibáñez, 28, 46010 Valencia, Spain

Table 4

Relative percentage changes in terms of the soil erosion rate (ER) induced by the mulching (M) application with respect to control (C) plots, as computed for the runoff plot measurement method (RP).

References	ER (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		Reduction (%)	
	C	M		
Bekele and Thomas (1992)	203.50	178.50	− 12.3	
	–	161.50	− 20.6	
	–	149.50	− 26.5	
Albaladejo Montoro et al. (2000)	1.70	0.09	− 94.8	
	Barton et al. (2004)	0.83	0.46	− 44.6
		4.17	0.90	− 78.4
Liu et al. (2012)	7.50	1.37	− 81.7	
	0.94	0.77	− 18.2	
	1.02	0.80	− 21.7	
Díaz-Raviña et al. (2012)	2.04	0.22	− 89.2	
	Fernández and Vega (2014)	5.40	0.50	− 90.7
–		0.70	− 87.0	
Prats et al. (2014)		8.48	0.63	− 92.6
Mwango et al. (2016)	124.30	7.86	− 93.7	
	131.60	7.55	− 93.9	
	183.60	5.08	− 96.1	
	75.60	5.31	− 96.0	
	–	19.22	− 89.5	
	–	19.50	− 89.4	
–	7.57	− 90.0		
–	8.10	− 89.3		

Ruissellement & Erosion

2- Stabiliser les agrégats

► Accroître les teneurs en C organique dans les horizons de surface des sols

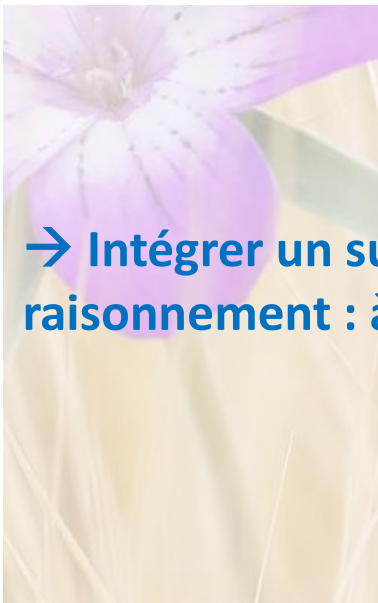
European Journal of Soil Science, June 2007, 58, 722–727

doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00861.x

Effects of organic matter and calcium on soil structural stability

M. N. WUDDIVIRA & G. CAMPS-ROACH

Department of Food Production, Faculty of Science and Agriculture, The University of the West Indies, St Augustine, Trinidad, West Indies



→ Intégrer un suivi du pH dans le raisonnement : à adapter f° type de sol

Table 4 Percentage water-stable aggregates for three soils treated at three levels of organic matter and three of Ca²⁺

Soil type	Organic matter/%	Ca ²⁺ concentration M		
		0	0.05	1
Bejucal	0	60.3	45.8	46.3
	4	58.0	46.4	42.4
	12	49.9	59.1	45.4
Non-Pareil	0	70.7	76.1	70.3
	4	73.4	75.1	68.3
	12	70.6	74.9	80.8
Piarco	0	39.9	47.7	52.2
	4	34.7	42.6	47.0
	12	43.9	53.8	66.3
LSD	4.5			

► le travail du sol comme levier pour accroître la stabilité des agrégats



Technique conventionnelle

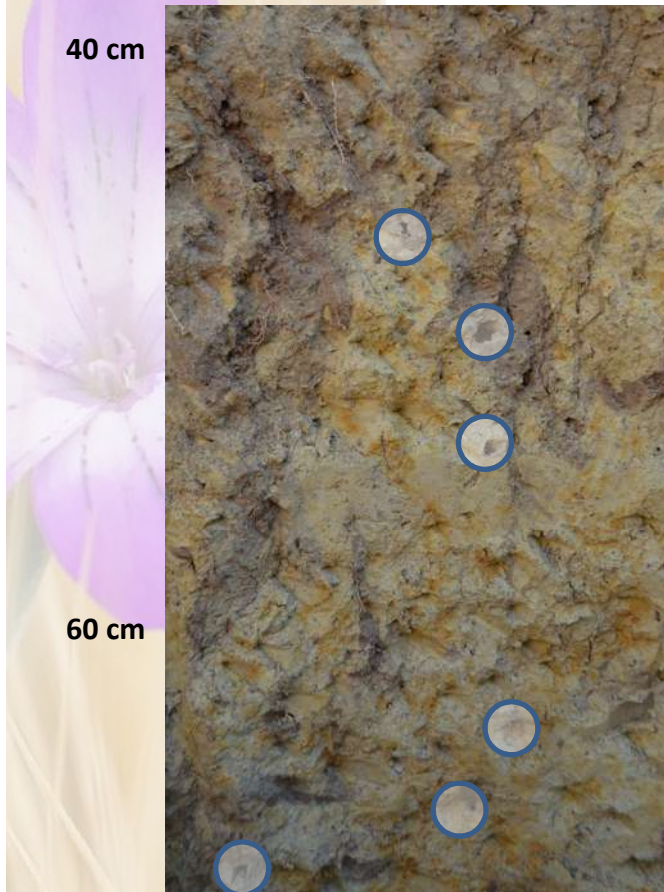


19 juillet 2005
270 mm de pluie

Technique de conservation

3- Accroître les capacités d'infiltration

► Commencer par connaître les intensités et cumul de pluies de la zone : si pluies d'orages à forte intensité mais sur des périodes courtes, la macroporosité joue tout son rôle !



On compte alors sur nos amis ...

→ Ksat (conductivité hydraulique à saturation) dans les galeries de vdt peut varier de 50 à 500 mm/h !



3- Accroître les capacités d'infiltration

► Accroître l'infiltration dès la surface du sol :

Available online at www.sciencedirect.com

 ScienceDirect

Soil & Tillage Research 99 (2008) 4–48

 ELSEVIER

 Soil & Tillage Research
www.elsevier.com/locate/still

Review

Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time:
State of the science

Mark W. Strudley, Timothy R. Green*, James C. Ascough II

USDA-ARS, Agricultural Systems Research Unit, 2150-D Centre Avenue, Suite #200, Fort Collins, CO 80526, USA

Received 17 January 2007; received in revised form 24 December 2007; accepted 16 January 2008

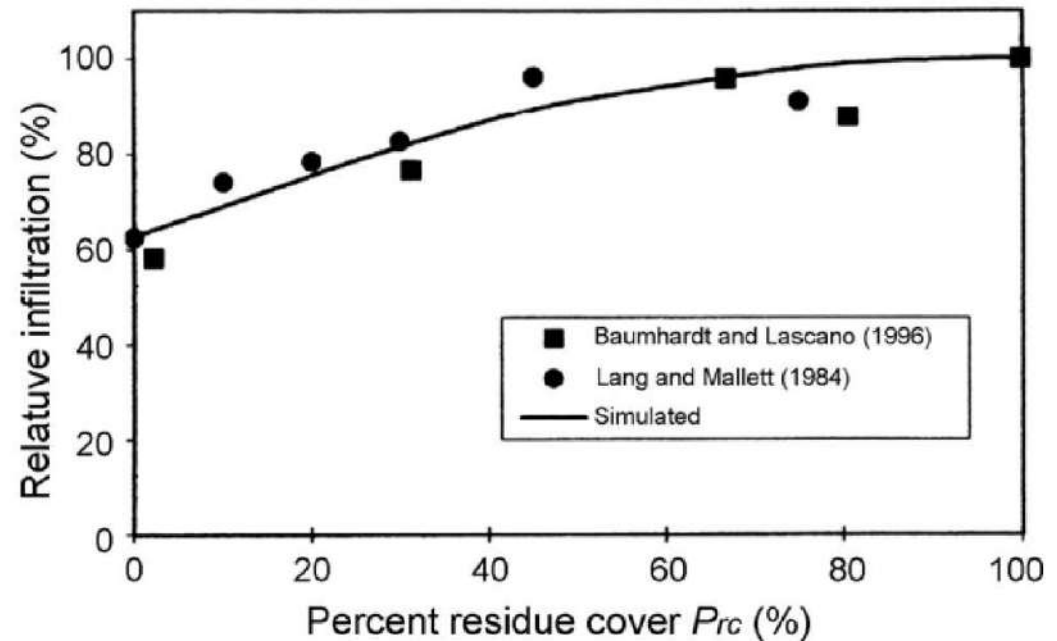


Fig. 10. Comparison of experimental studies and simulation results showing relative infiltration vs. percent residue cover. Taken from Ruan et al. (2001) with permission.

Ruissellement & Erosion

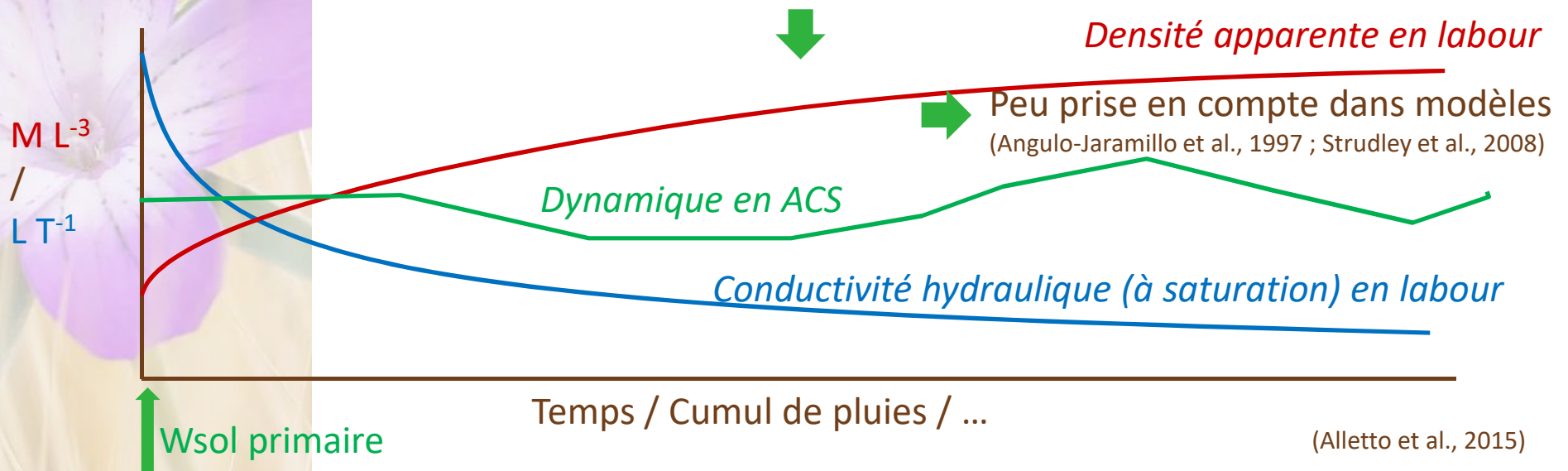
3- Accroître les capacités d'infiltration

☒ Conductivité hydraulique : aptitude du milieu poreux à transmettre l'eau qu'il contient pour une teneur en eau donnée (ou un potentiel matriciel donné).



Forte dynamique temporelle

(Sauer et al. 1990 ; Green et al., 2003 ; Stange et Horn, 2005 ; Strudley et al., 2008)



(Alletto et al., 2015)

Ruissellement & Erosion

3- Accroître les capacités d'infiltration

- Test **érosion** en conditions contrôlées



- Placette 2.7 m²
- Pluviomètres
- Echantillonnage des eaux de ruissellement

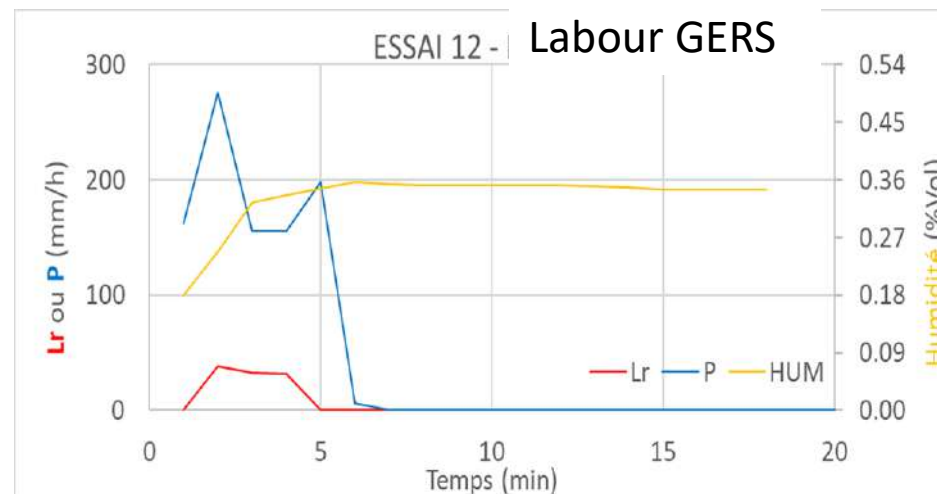
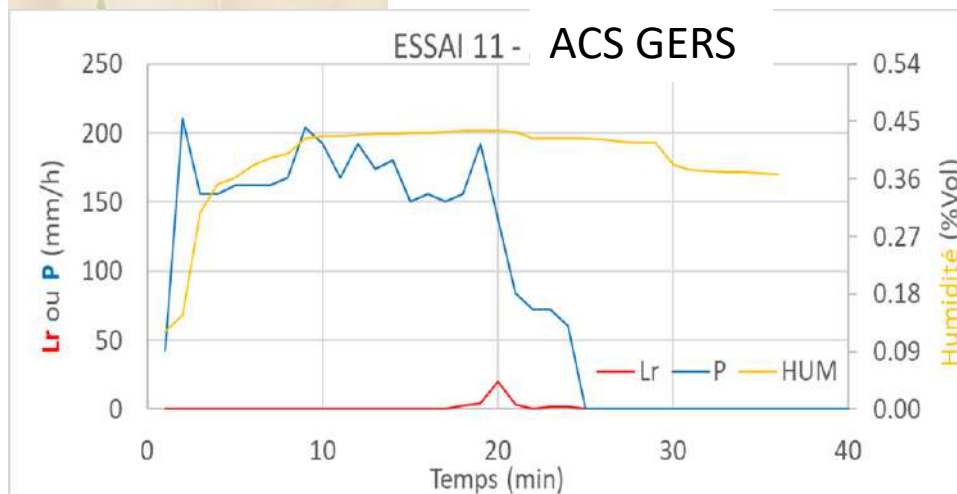


- Matière en suspension (MES) en g/L
- Quantité d'eau ruisselée Lr (lame d'eau ruisselée)

Ruissellement & Erosion



3- Accroître les capacités d'infiltration



→ Des difficultés pour se positionner dans les mêmes conditions expérimentales

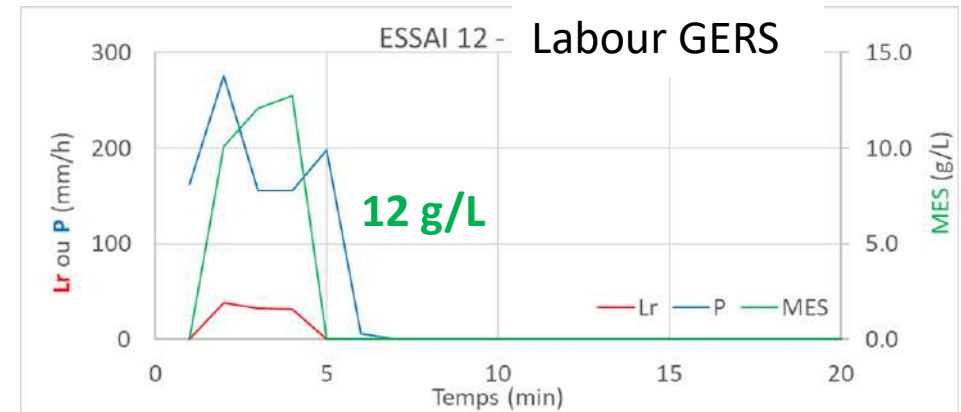
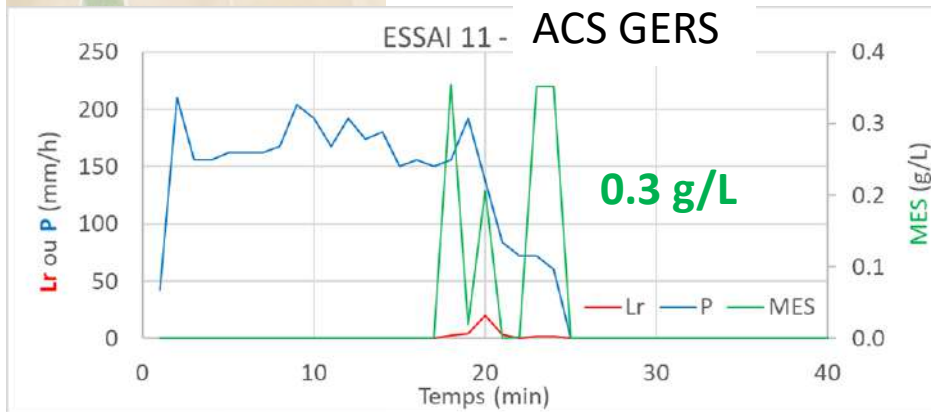
→ Stabilisation à environ 150-200 mm/h de pluies durant 20 min chez ACS GERS alors que sur la parcelle voisine (Labour GERS), l'intensité de pluie n'a pas été régulée convenablement et sur une durée équivalente (au final ≈ 60 mm de pluie ont été appliqués sur ACS GERS contre ≈ 28 mm chez Labour GERS)

→ Pluies ruisselées chez ACS GERS ≈ 3 mm vs. 6,4 mm chez Labour GERS



Ruissellement & Erosion

3- Accroître les capacités d'infiltration



→ Une érosion générée très significativement plus faible en ACS

→ Il faudrait également tenir compte des écoulements hypodermiques également à l'origine d'une érosion





3- Accroître les capacités d'infiltration

Localisation de la fosse ouverte sur la parcelle en agriculture conservation



Localisation de la fosse ouverte sur la parcelle avec labour





3- Accroître les capacités d'infiltration

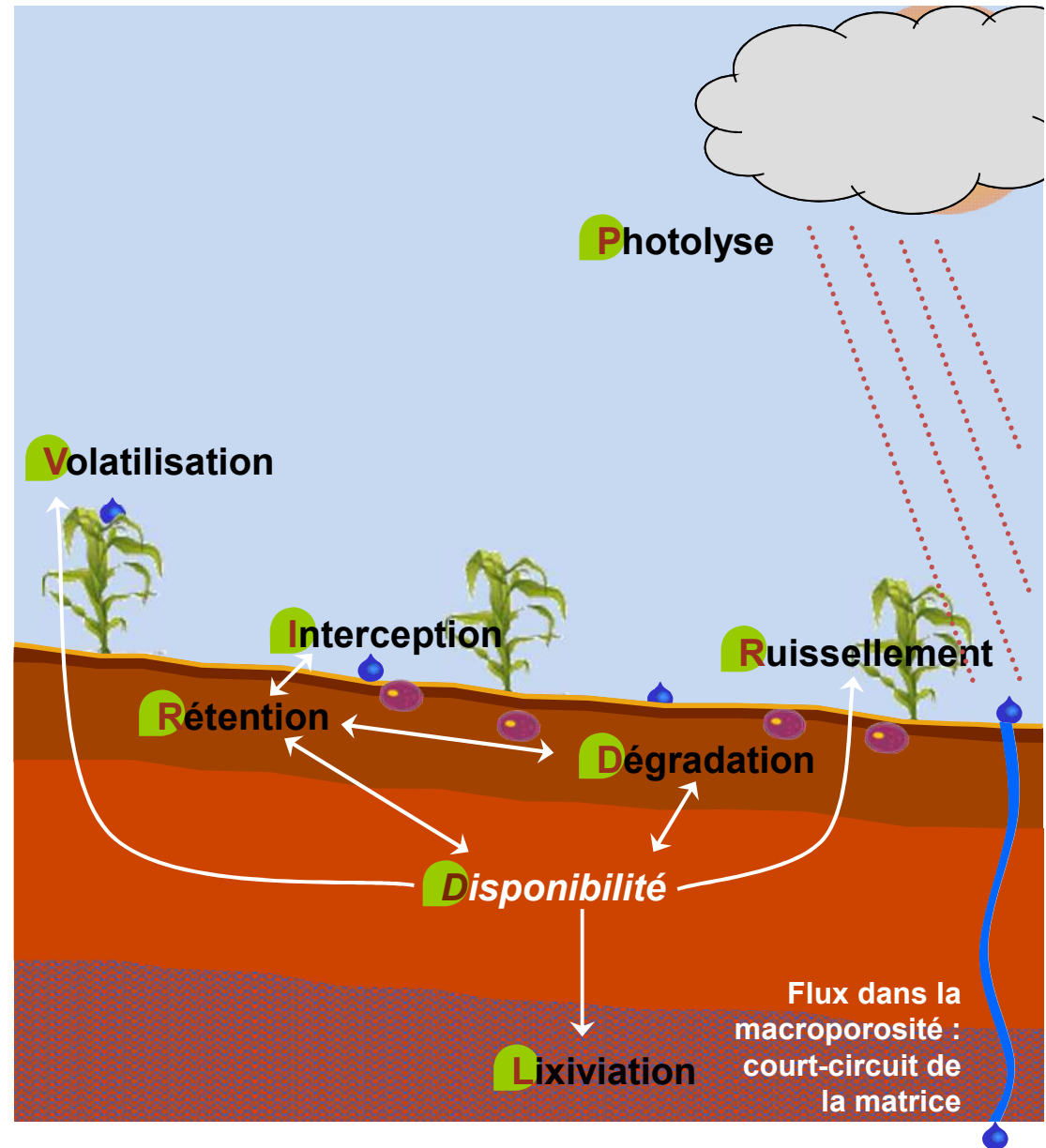
A PRENDRE EN COMPTE SUR L'ENSEMBLE DU PROFIL DE SOL : RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE



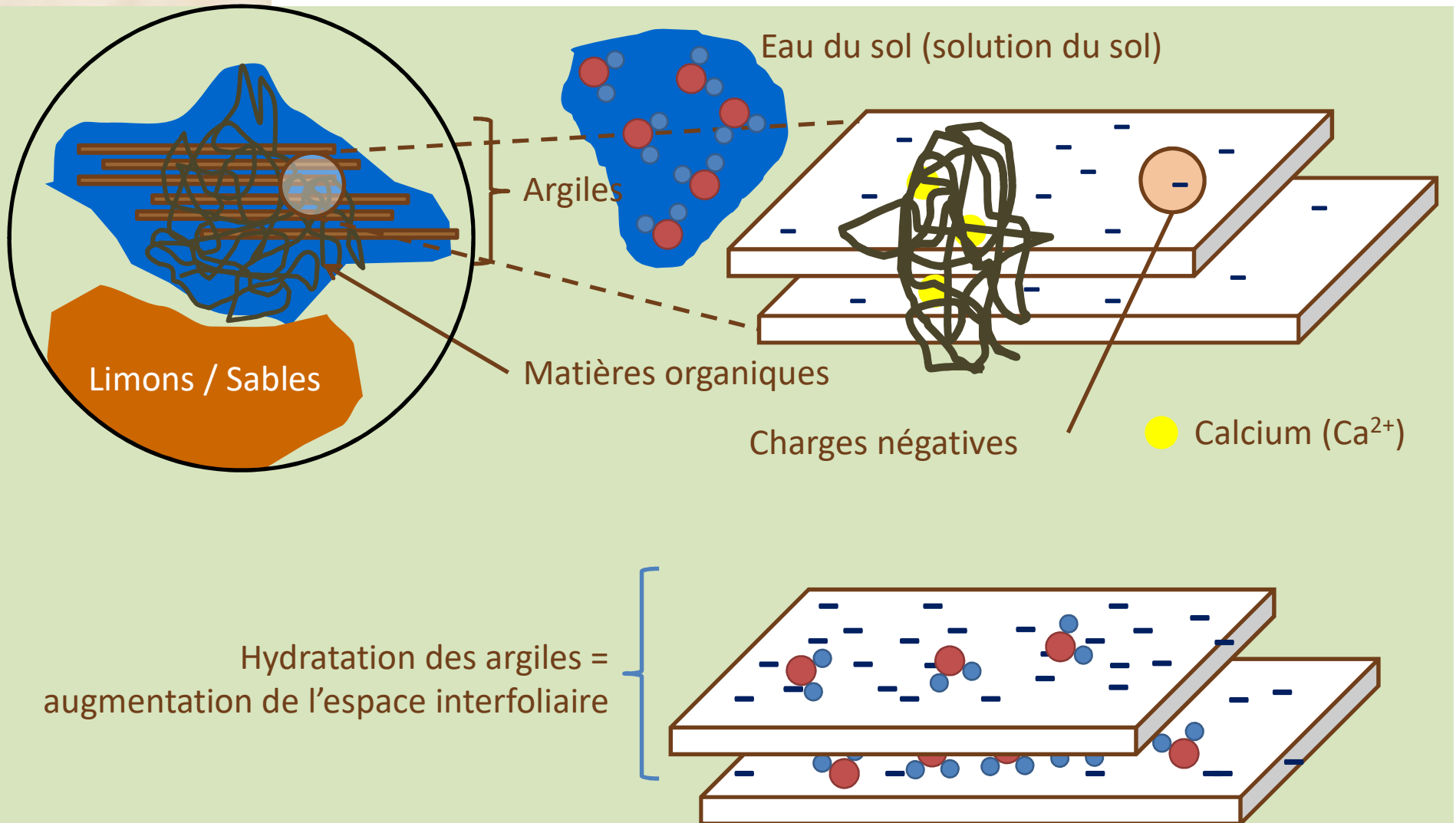
Lixiviation

-variabilité en fonction :

- ▶ propriétés des molécules : Solubilité, Rétention => transport en solution
- ▶ Précipitations : pluies et irrigation
- ▶ pratiques culturales : travail du sol, couverture du sol, ... : formation de galeries (macropores)

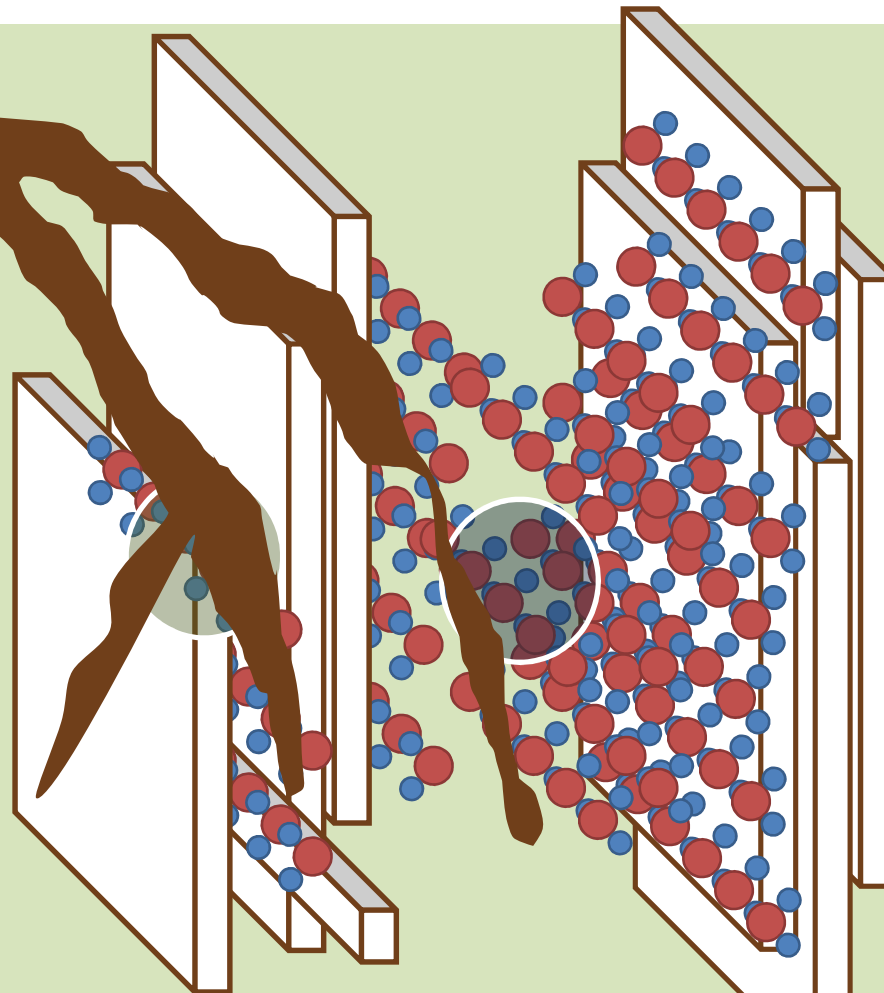


Lixiviation : comment s'active le drainage sur une parcelle ?



Lixiviation : comment s'active le drainage sur une parcelle ?

Dans les pores de petits diamètres, l'attraction exercée par les particules solides reste forte = l'eau est bien retenue



Au cœur du macropore : énergie de liaison faible = l'eau n'est pas retenue

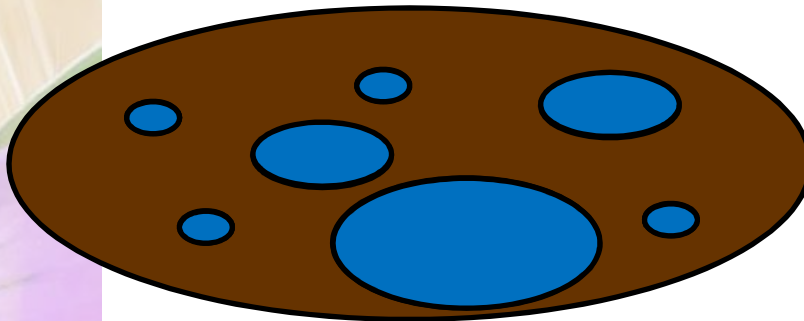
► Potentiel hydrique = état énergétique de l'eau dans le sol

► Explication des remontées capillaires

Lixiviation : comment s'active le drainage sur une parcelle ?

Conséquences :

1- l'eau circule dans un sol en empruntant des pores de taille de porosité croissante :



Si intensité de pluie :

< capacité infiltration pores de taille 1

> capacité infiltration pores de taille 1

< capacité infiltration pores de taille 2

> capacité infiltration pores de taille 2

< capacité infiltration pores de taille 3

**> capacité infiltration pores de taille 3 :
refus d'infiltration**

2- les capacités d'infiltration d'un sol vont directement dépendre de la porosité totale mais aussi de la distribution des différentes gammes de pores et de leur connectivité



Lixiviation : comment s'active le drainage sur une parcelle ?

Idées reçues

« les galeries de vers de terre permettent de faire circuler l'eau »

-> Partiellement vrai : circulation de l'eau lorsque le sol est saturé (ex. après une très forte pluie ou une période de pluie assez longue...)

**« les macropores permettent d'améliorer le réservoir utilisable »
ou « les macropores favorisent les remontées capillaires »**

-> Faux ou de façon très peu significative, par exemple *via* les MO recouvrant les parois des vers..., pas de remontées capillaires

Lixiviation

Effets du travail du sol et de la gestion de la période d'interculture sur le transfert d'herbicides par lixiviation

Année / Pratiques Agricoles	Travail du sol	Culture Intermédiaire
2005	++ en Non-labour	++ avec CI
2006	Pas d'effet	++ avec CI
2007	Pas d'effet	Pas d'effet*
2008	++ en Non-labour	++ avec CI

* Très faible biomasse de couvert végétale en 2007 (< 500 kg MS/ha (Alletto et al., 2012) contre 2 à 4 t MS/ha les autres années)

=> Poursuivre les efforts de caractérisation des CIMS sur les transferts hydriques et de solutés

Conclusions

- ▶ Les processus intervenant dans le devenir environnemental des phytos sont nombreux, complexes et en interrelations fortes !
- ▶ Certaines pratiques peuvent permettre de limiter leurs fuites et favoriser leur dégradation
 - Couverture des sols : Ruissellement, Erosion, Dégradation, Rétention
 - Augmentation des teneurs en MO : Erosion, Dégradation, Rétention
 - Amélioration de l'activité biologique : Dégradation
 - Gestion de l'irrigation : Lixiviation
- ▶ Mais : compte tenu des objectifs de qualité de l'eau (0,1 µg/L ; 0,5 µg/L ; 2 µg/L) il est impératif de réduire les applications

les illustrations de pratiques alternatives mises en œuvre par des agriculteurs prennent tout leur sens !



Merci pour votre attention



**Rencontres
Alternatives
Phytos**



lionel.alletto@occitanie.chambagri.fr

 @LionelAlletto

