

# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



COLLOQUE DE RESTITUTION DES CONCLUSIONS DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE (ESCo)  
CNRS / INRA

## VARIÉTÉS VÉGÉTALES TOLÉRANTES AUX HERBICIDES

Paris, Muséum national d'histoire naturelle

16 novembre 2011



# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## INTRODUCTION

Contexte et enjeux de la demande d'ESCo  
pour les politiques publiques

*Claire Hubert*

Ministère de l'Écologie,  
du développement durable,  
du transport et du logement



# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## PRINCIPES ET MÉTHODES DE L'ESCO

*Claire Sabbagh*

Délégation à l'Expertise,  
à la Prospective et aux Etudes  
Inra



# L'expertise scientifique à l'INRA et au CNRS

- Une mission pour la recherche
- Une charte nationale de l'expertise
- Des principes et une méthode

# L'ESCO : caractéristiques de l'exercice

- Une saisine publique externe
- Un collège pluridisciplinaire, une diversité de points de vue
- Un état des connaissances publiées
- Acquis, incertitudes, lacunes et controverses
- Ni avis ni recommandations

# Les produits de l'expertise scientifique collective

Un rapport  
Une synthèse (français/anglais)  
Un résumé

# Remerciements

Les experts et les deux pilotes

L'équipe ESCo – Anaïs Tibi, Isabelle Savini,  
Eric Marchoux, Dominique Vachez, Marie  
Devillers, Fabienne Girard

Christophe Rocle, Mélanie Vaster

# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## INTRODUCTION

Enjeux et intérêt de la demande d'ESCo  
pour les deux organismes de recherche

*Françoise Gaill*

Directrice de l'Institut Ecologie et  
environnement  
CNRS





# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## PRÉSENTATION DES CONCLUSIONS DE L'ESCO

*Michel Beckert*, INRA

*Yves Dessaux*, CNRS

*Christophe Charlier*, Université de Nice

*Henri Darmency*, INRA

*Claire Richard*, CNRS



# VTH : définitions, objet et périmètre

- Des variétés végétales cultivées tolérantes à un herbicide
  - Espèces de grandes cultures : maïs, soja, coton, colza, tournesol, betterave, blé, riz
  - Tolérantes à l'application d'un herbicide généralement à large spectre
- Une introduction intentionnelle du caractère TH comme tout autre caractère d'intérêt agronomique en amélioration des plantes
  - Exclusion des variétés présentant la capacité propre et générique de leur espèce à tolérer l'application d'un herbicide (ex. tolérance des céréales aux herbicides anti-dicotylédones).
  - Diverses techniques possibles d'introduction du trait dans une variété.

# VTH : définitions, objet et périmètre

- Dans le monde : largement cultivées et étudiées depuis une quinzaine d'années
  - Principalement en Amérique du Nord
  - Des variétés transgéniques tolérantes au RoundUp®
- En Europe : une diffusion plus récente
  - Des variétés issues de sélection de variabilité native, ou induite par mutagenèse
    - **En France** : 3 espèces concernées à très court terme
      - Le maïs : cultivé depuis les années 2000
      - Le tournesol : première culture en 2010, demandes d'inscription en cours
      - Le colza : des demandes d'inscription en cours

# Enjeux et contexte de la demande d'ESCo

- Des bénéfices attendus de ces variétés
  - Un trait agronomique attractif pour l'agriculteur :
    - facilité d'utilisation technique
    - efficacité agronomique du désherbage
    - traitement en post-levée de la culture permettant de l'adapter à la flore adventice effectivement présente dans la parcelle
  - Un intérêt environnemental :
    - Profil éco toxicologique plus favorable de certaines molécules
    - Réduction du nombre de traitements herbicides et des quantités utilisées
- La montée en France d'une contestation sociale autour des VTH issues de mutagenèse

# Questions posées à l'ESCo

- Une nécessaire évaluation, par l'analyse de la littérature scientifique, des effets de l'innovation TH à court et long termes, de la parcelle à l'agroécosystème
- Les interrogations majeures concernent donc les impacts directs et indirects de l'obtention et de l'usage des VTH :
  - **Agronomie** : impact sur l'utilisation des herbicides (dans une logique d'usage des herbicides en agriculture), sur les performances des cultures (rendements, qualité des produits...)
  - **Environnement** : impact sur les organismes non cibles, dispersion du trait de résistance, contamination des milieux
  - **Economie, droit, sociologie** : organisation du travail des agriculteurs, impacts économiques, considérations réglementaires
- Des questions hors périmètre :
  - La toxicologie en santé humaine des herbicides utilisés
  - La question générique des végétaux GM

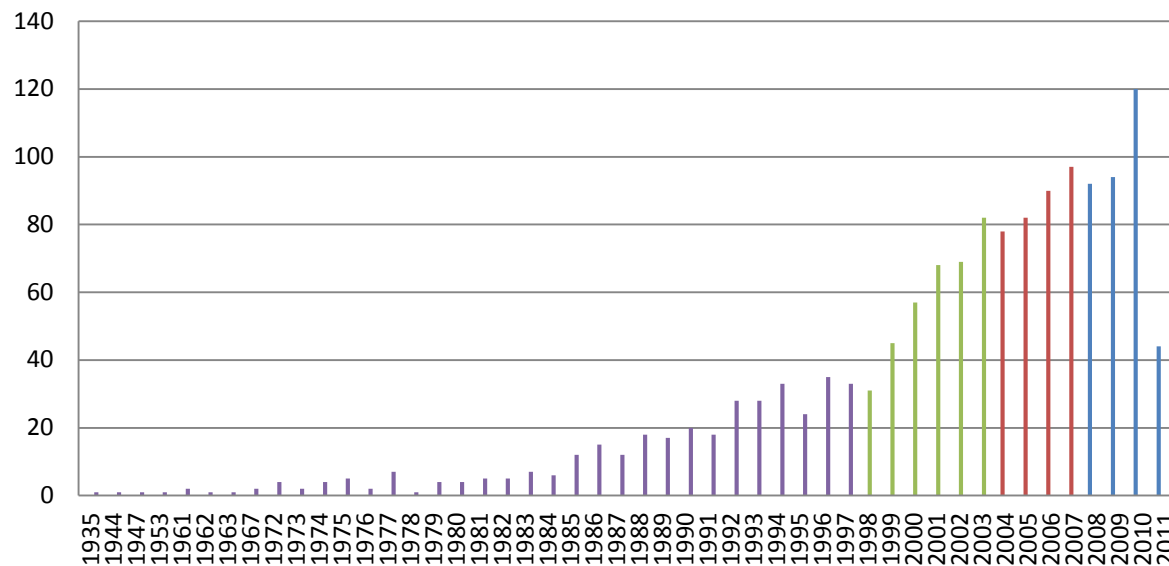
# Le collectif d'experts

## → Pluridisciplinarité et diversité institutionnelle :

Gérard Arnold (CNRS) :	écologie des pollinisateurs
Marc Barbier (INRA) :	sociologie des risques
Michel Beckert (INRA) :	génétique végétale, amélioration des plantes
Christophe Charlier (U. Nice) :	économie agricole et de l'environnement
Nathalie Colbach (INRA) :	agronomie des systèmes de culture, gestion des adventices
François Coléno (INRA) :	sciences de gestion, organisation des territoires agricoles
Henri Darmency (INRA) :	Biologie et génétique des populations d'adventices
Yves Dessaux (CNRS) :	écologie microbienne du sol, biotechnologies
Christian Gauvrit (INRA) :	phytopharmacie, résistances aux herbicides
Christian Huyghe (INRA) :	génétique végétale, amélioration des plantes
Jane Lecomte (U. Paris XI) :	écologie, génétique des populations
Valérie Le Corre (INRA) :	génétique des populations d'adventices, évolution des résistances
Stéphane Lemarié (INRA) :	microéconomie, économie de l'innovation
Thierry Marteu (U. Nice) :	droit de la propriété intellectuelle
Patrick Mazellier (IUT Périgueux) :	chimie environnementale, devenir des micropolluants dans l'eau
Mai-Anh Ngo (CNRS) :	droit agroalimentaire
Francis Quétier (U. Evry) :	génétique végétale, plasticité des génomes
Claire Richard (CNRS) :	photochimie environnementale, dégradation des contaminants organiques

# Environ 1400 références citées

Répartition des références par année et par quartile

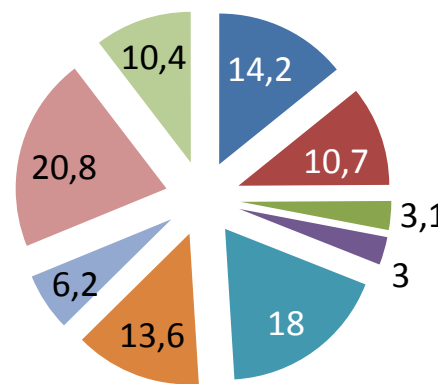


Environ 85% d'articles scientifiques

Plus de la moitié des références ont moins de 10 ans (barres bleues et rouges)

Répartition relativement équilibrée entre les thématiques.

Références majoritairement ciblées OGM et nord-américaines sur certaines thématiques (adoption et consommation d'herbicides)



- Modes d'action herbicides, mécanismes de résistance
- Modes d'obtention de VTH
- Approche agronomique de l'adoption
- Approche économique de l'adoption
- Simplification du travail du sol
- Diffusion du trait TH
- Apparition de résistances chez les adventices
- Impacts des VTH sur la biodiversité
- Contamination chimique de l'environnement

# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- Adoption et expansion des VTH dans le monde
- Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- Principaux points de vigilance et conclusions

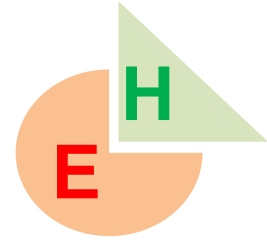


# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- Adoption et expansion des VTH dans le monde
- Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- Principaux points de vigilance et conclusions

# Les modes d'actions herbicides

- Une molécule herbicide pénètre dans les cellules, se lie à une «cible» (enzyme), inhibe son action
- Classement des molécules herbicides selon leur enzyme cible et leur mode d'action (classification HRAC, Herbicide Resistance Action Committee)
  - **Classe A** : Cible : Acetyl coenzyme A carboxylase (ACC)  
cyclohexane-dione , aryloxyphenoxy-propionate... (ex. séthoxydime)
  - **Classe B** : Cible : Acétolactate synthase (ALS)  
sulfonyl-urées, imidazolinones, ... (ex. prosulfuron, imazamox)
  - **Classe G** : Cible : 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS)  
glycines (glyphosate - RoundUp®)
  - ...
- **Notion de sélectivité des herbicides**
  - Herbicides sélectifs actifs contre certains groupes botaniques de végétaux  
Ex. Classes A, B, C
  - Herbicides non sélectifs ou totaux efficaces contre toutes les espèces végétales, adventices et cultivées - Ex. Classes G, H



# Les mécanismes de résistances aux herbicides

- 4 mécanismes de résistance connus :
  - La **modification de la cible** : modification de séquence et structure empêchant la liaison herbicide-enzyme
  - La **surexpression de la cible** : conduit à une dilution artificielle du toxique
  - La **détoxication** : métabolisation des molécules herbicides
  - La **perturbation de la translocation du toxique** : cuticules imperméables, séquestration...
- Des mécanismes identifiés chez les plantes sauvages devenues résistantes à des herbicides.
  - Certains de ces mécanismes (modification de cible et détoxication) mis en œuvre chez des VTH.

# Les principaux modes d'obtention de VTH

- **Exploitation de la variabilité spontanée**
  - Détection de mutants existants dans espèces inter-fertiles
  - Introduction dans une lignée élite par croisements successifs (= introgression)
- **Création de variabilité par mutagenèse**
  - Induction variabilité par traitement physique ou chimique,
  - Détection des mutants
  - Introgression dans une lignée élite
- **Transgenèse**
  - Identification de gènes dans le monde vivant
  - Introduction du gène dans l'espèce cible
  - Introgression dans une lignée élite

# Impacts limités du trait TH sur la production végétale

- Hypothèse d'un métabolisme possiblement perturbé par le caractère TH : caractère génétique en lui-même, méthode d'obtention, herbicide...
- Des comparaisons TH/non-TH difficiles à interpréter :
  - matériel végétal non isogénique
  - des itinéraires de désherbage différents entre TH/non-TH
  - effets liés aux interactions plantes/milieus
- Mesures des effets sur la production végétale
  - Le cas ancien du colza tolérant à l'atrazine : pertes de rendement avérées
  - Des différences de rendement positives ou négatives mais peu marquées
  - Quelques phénomènes particuliers dont les mécanismes sont connus :
    - Soja transgénique : effet du glyphosate sur la nodulation
    - Colza transgénique : inactivation du transgène / virus de la mosaïque du chou

→ Globalement aujourd'hui **peu de différences de rendement entre TH et non-TH** (efforts de sélection) et pas d'effet qualitatif majeur

# Un contexte réglementaire :

## La directive 2001/18

«Organisme génétiquement modifié (OGM)»: un organisme à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle

- **Introgression de mutation spontanée → non OGM**
- **Mutagenèse → OGM**  
technique et produits exclus du champ d'application (annexe 1B)
- **Transgenèse → OGM**  
technique et produits inclus dans le champ d'application  
(= évaluation sanitaire et environnementale spécifique préalable + obligation d'étiquetage)

# Quels modes de protection de ces innovations en France ?

- Exploration de variabilité existante au sein d'espèces :
  - COV (distinction, homogénéité, stabilité) :
    - Exemption en faveur de la recherche, privilège de l'obteneur
    - Pas de privilège l'agriculteur en droit français (loi en discussion)
    - Privilège de l'agriculteur en droit européen
- Création de variabilité nouvelle au sein d'espèces :
  - COV éventuellement accompagné d'un brevet sur le trait ou la technique d'obtention
    - Exemption en faveur de la recherche
    - Pas de privilège systématique de l'obteneur

# Exemples de VTH actuellement cultivées

- Dates de première commercialisation **dans le monde**

- Modes d'obtention : *mutation spontanée* *mutation induite* *transgénèse*

	DUO System (A)	Express Sun (B)	Clearfield (B)	RoundUp Ready (G)	LibertyLink (H)
tournesol			2003		
colza			1995	1996	1995
maïs	2000		1992	1996	1997
blé			2001	2010	
betterave				2005	
soja				1996	2009

- Une diversité de type de VTH « possibles » selon les espèces
- Des variétés tolérantes à des herbicides totaux ou sélectifs
- Des variétés transgéniques généralement tolérantes à un herbicide total
- Récemment, des variétés transgéniques tolérantes à plusieurs classes d'herbicides



# Exemples de VTH actuellement cultivées

- VTH actuellement cultivées **en France** ou en cours d'inscription au Catalogue français
- Modes d'obtention : *mutation spontanée* *mutation induite* *transgénèse*

	DUO System (A)	Express Sun (B)	Clearfield (B)	RoundUp Ready (G)	LibertyLink (H)
tournesol		Cultivé depuis 2010	Cultivé depuis 2010		
colza			Demandes en cours		
maïs	Cultivé depuis années 2000				
blé					
betterave					
soja					

# Technologies d'obtention variétale émergentes, application au cas des VTH

Des limites aux techniques actuellement mises en œuvre : aspect aléatoire de la mutation (spontanée ou induite), ou de l'insertion du transgène

→ Des techniques émergentes dont certaines ont déjà permis la production de VTH au laboratoire :

- La détection de variants de séquences de gènes par TILLING
- La modification ciblée du génome à l'aide d'oligonucléotides ou de méganucléases (recombinaison homologue)

Permet, à un endroit choisi, une modification ponctuelle d'un gène résident ou l'insertion d'un fragment d'ADN exogène

→ Une lignée finale indiscernable d'une lignée obtenue par introgression de mutations, sur la base des traces moléculaires des technologies mises en œuvre

=> Positionnement de ces nouvelles techniques dans la réglementation actuelle ?

- Réflexion au niveau UE (depuis 2007)
- Rapport du JRC pour l'UE (2011)

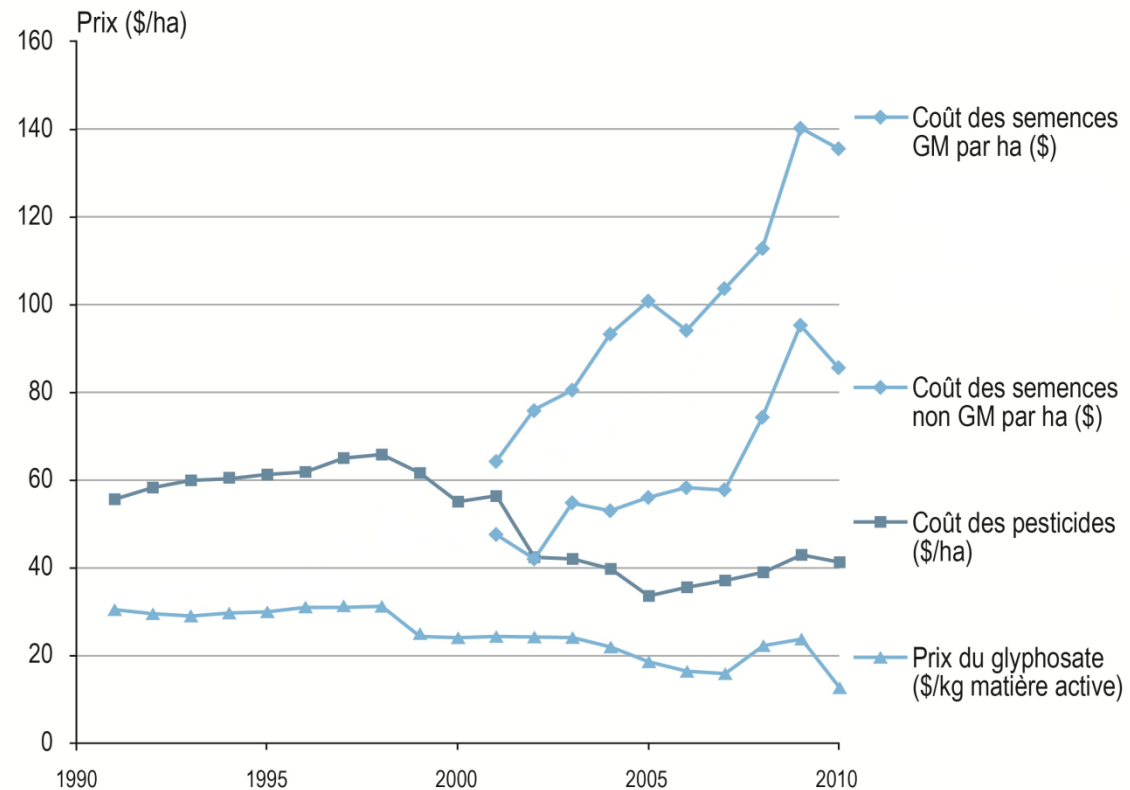
# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- **Adoption et expansion des VTH dans le monde**
- Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- Principaux points de vigilance et conclusions

# Stratégies des firmes sur le marché des VTH

- Un lien de demande entre le marché des semences et celui des herbicides :
  - Les firmes qui développent des VTH = firmes du secteur agrochimique qui possèdent une filiale semencière
  - Possibilités de licences pour augmenter les profits sur les consommations d'herbicides

- Tarification des VTH :
  - surcoût des semences TH par rapport aux non-TH
  - Soja : légère augmentation du poste semence+herbicide sur la période



Evolution des coûts des semences et intrants pour le soja aux Etats-Unis de 1992 à 2010 (Bonny et al. 2011)

# Dynamique d'adoption des VTH

- Une adoption massive à l'échelle mondiale

- Ex. 81% des surfaces mondiales de soja sont des VTH

- Essentiellement des variétés transgéniques tolérantes au glyphosate (RoundUp Ready®)

- Trait TH : trait le plus présent dans les variétés GM

- Rapidité d'adoption des variétés tolérantes à un herbicide total :

- USA : soja, coton et maïs TH

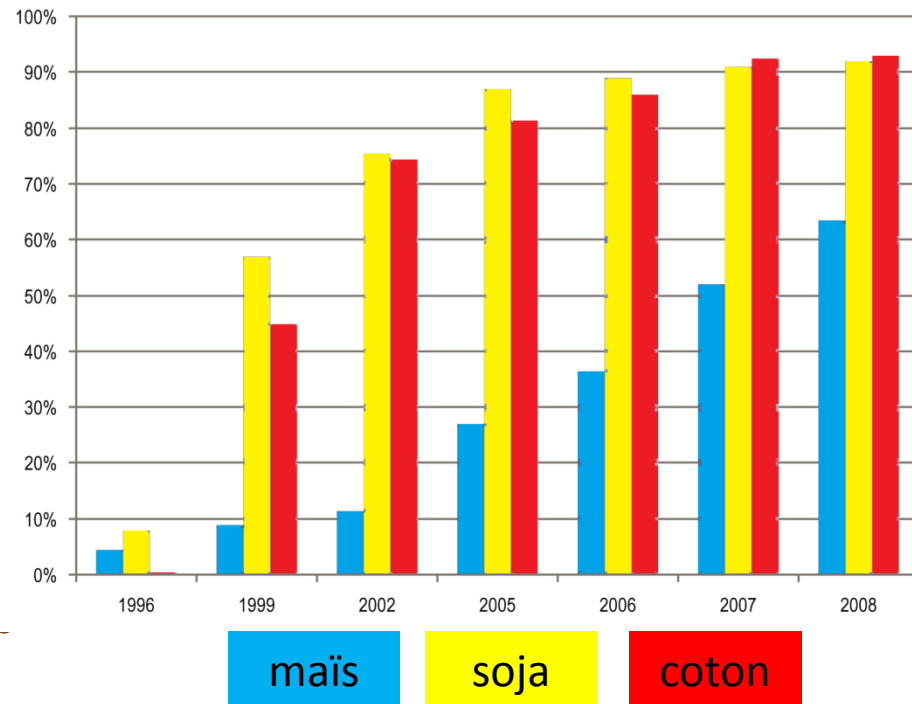
- < 3 Mha en 1996 → 53 Mha en 2008

- Betterave :

- USA : 0% sole en 2007 → 59% en 2008

- 95% en 2010

- valeurs comparables au Canada

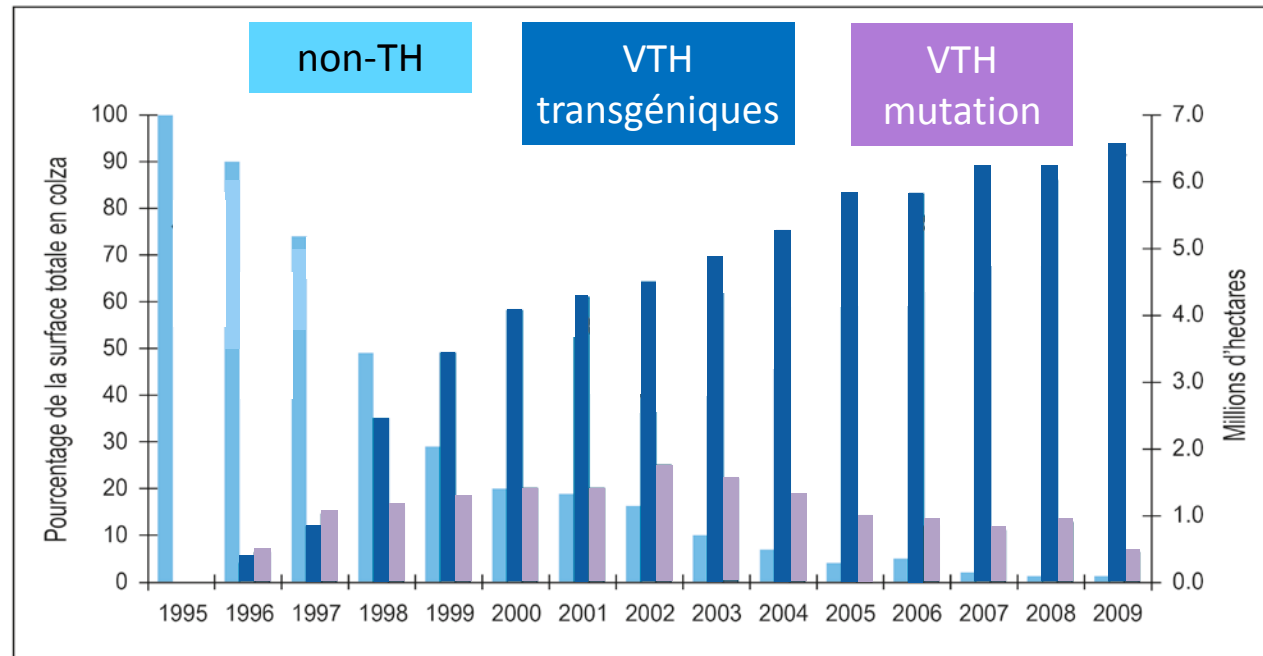


Pourcentage de la sole cultivée en VTH pour le maïs, le soja et le coton, aux Etats-Unis entre 1996 et 2008

# Dynamique d'adoption des VTH

- Diffusion limitée des variétés tolérantes à un herbicide sélectif, issues de sélection de variabilité native ou induite par mutagenèse : environ 2,5% des surfaces VTH en 2007

Cas du colza TH au Canada :  
exemple de « concurrence »  
entre différents types de VTH



- Des valeurs pas toujours faciles à connaître pour l'Europe

Tournesols TH Clearfield® et Express Sun® (données CETIOM) :

- Europe : introduction en 2003 → près de 2 millions ha en 2010.

- France : 35 000 ha en 2010, 80 000 ha en 2011 (11% sole tournesol française)

# Motifs d'adoption des VTH

## Avantages techniques attendus

- **Elargissement du spectre des adventices contrôlées**

- De nouvelles familles botaniques (géranium/colza; Sétaires/Blé...)
- Toutes les familles botaniques (Variétés transgéniques RR<sup>®</sup>, LL<sup>®</sup>)
- Des espèces envahissantes (Ambroisie...)
- Des espèces parasites (Orobanche/Tournesol...)
- Des espèces botaniquement proches des espèces cultivées (tournesol « sauvage », ravenelle et moutarde...)

orobanche



- **Facilité d'utilisation**

- Flexibilité partielle du stade d'application en culture
- Faibles doses/ efficacité molécules actives
- Usage d'une seule molécule

- **Réduction des quantités d'herbicides utilisées**

- Désherbage si nécessaire
- Désherbage localisé de zones infestées
- Evitement de désherbages préventifs (Prélevée)

ambroisie



- **Sécurisation du désherbage**

- Efficacité des traitements

# Apports des travaux économiques dans l'analyse des facteurs d'adoption

Christophe Charlier

*Maître de conférences – Université Nice-Sophia Antipolis*

*Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG)*



# Facteurs économiques d'adoption

- L'analyse économique des facteurs d'adoption des VTH fait écho aux travaux agronomiques sur cette question  
Sur la bases d'enquêtes auprès d'agriculteurs américains adoptants de VTH RR®
- En mettant au centre de l'analyse le profit, une attention particulière est apportée aux rendements et à l'économie de coût :

$$\text{Profit} = \text{Recette totale} - \text{Coût total}$$



Rendements



Économie de coût via une plus grande flexibilité d'utilisation

- Gains de rendements non confirmés pour toutes les variétés et non déterminants dans l'adoption
- Réduction de coût dans la gestion des adventices (prix de l'herbicide associé, flexibilité et économie de temps de travail)
- Frein à l'adoption = prix des semences

# Facteurs économiques d'adoption

- Puis, pour obtenir d'autres résultats, l'analyse s'est démarquée d'une modélisation centrée sur la maximisation du profit
  - Modèle de diffusion technologique
    - pour étudier le lien entre l'adoption de VTH et l'adoption de techniques de travail simplifié du sol
  - Modèle centré sur la maximisation d'une fonction d'utilité
    - Pour prendre en compte d'autres facteurs que les seules variables entrant dans le profit

# Adoption de VTH et travail du sol

Observation d'un couplage entre mise en œuvre de la stratégie TH et simplification du travail du sol

- Pour aller au-delà de la corrélation : modèle à équations simultanées

la diffusion d'une technologie affecte la diffusion de l'autre

- Résultats (cas du coton TH aux USA) :
  - Les développements des deux technologies sont liés
  - L'adoption du coton TH est positivement affectée par l'adoption d'un travail simplifié du sol
  - Elasticités d'adoption (en moyenne) :
    - +1% de coton TH -> + 0,48% de travail simplifié du sol
    - +1% de travail simplifié du sol -> + 0,16% de coton TH

# L'importance du gain de temps

- **Observation de l'USDA (cas du soja TH) :**
  - en moyenne, le revenu des agriculteurs ayant fait le choix de VTH est supérieur au revenu des autres agriculteurs
  - la composante non-agricole (off-farm) de ce revenu est particulièrement sensible dans cette comparaison
- **Hypothèse :**
  - Adoption de VTH → une réduction du temps de travail de supervision
  - développement d'une activité non agricole génératrice d'un revenu supplémentaire
- **Tentative pour donner une valeur monétaire au gain de temps :**
  - Méthodologie : maximisation d'une fonction d'utilité + estimation économétrique du modèle (données USDA)

→ L'adoption du soja TH influence positivement la composante « non-agricole » du revenu des agriculteurs

→ Si la probabilité d'adoption augmente de 10%, le revenu « non-agricole » augmente de 8,4%

# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- Adoption et expansion des VTH dans le monde
- **Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides**
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- Principaux points de vigilance et conclusions

# Innovation TH : effet sur la flore adventice

- L'association lignée végétale / herbicide associé caractérise l'innovation TH
- Effets de la culture de VTH sur la flore adventice :
  - Une dérive de flore
    - Disparition de certaines espèces d'adventices
    - Eventuelle apparition de nouvelles adventices dans les cultures

- Un développement de résistances spontanées chez les adventices
  - Effet de « sélection » en réponse à un biocide
- Un avantage sélectif pour des événements de diffusion du trait TH depuis la VTH vers les plantes environnantes (apparentées sauvages ou autre culture de la même espèce non TH) par croisement.

# Développement de résistances spontanées

- **Etat des lieux à l'échelle mondiale (octobre 2011)**
  - Des populations de plantes sauvages résistantes à des herbicides ont été détectées pour **plus de 200 espèces**, observées **pour tous les modes d'action** d'herbicides
  - Existence aujourd'hui de populations d'adventices présentant des résistances multiples (i.e. à différentes classes d'herbicides).
- **Le phénomène dépend :**
  - de la biologie de l'adventice (mode de reproduction, capacité de multiplication, type de dispersion, longévité des graines...),
  - du nombre de gènes impliqués dans l'apparition de la résistance,
  - de la fréquence d'apparition de la mutation associée,
  - du coût physiologique associé à la mutation,
  - de l'efficacité du désherbage (pression de sélection effectuée par l'herbicide),
  - des pratiques culturales.

# Développement de résistances spontanées

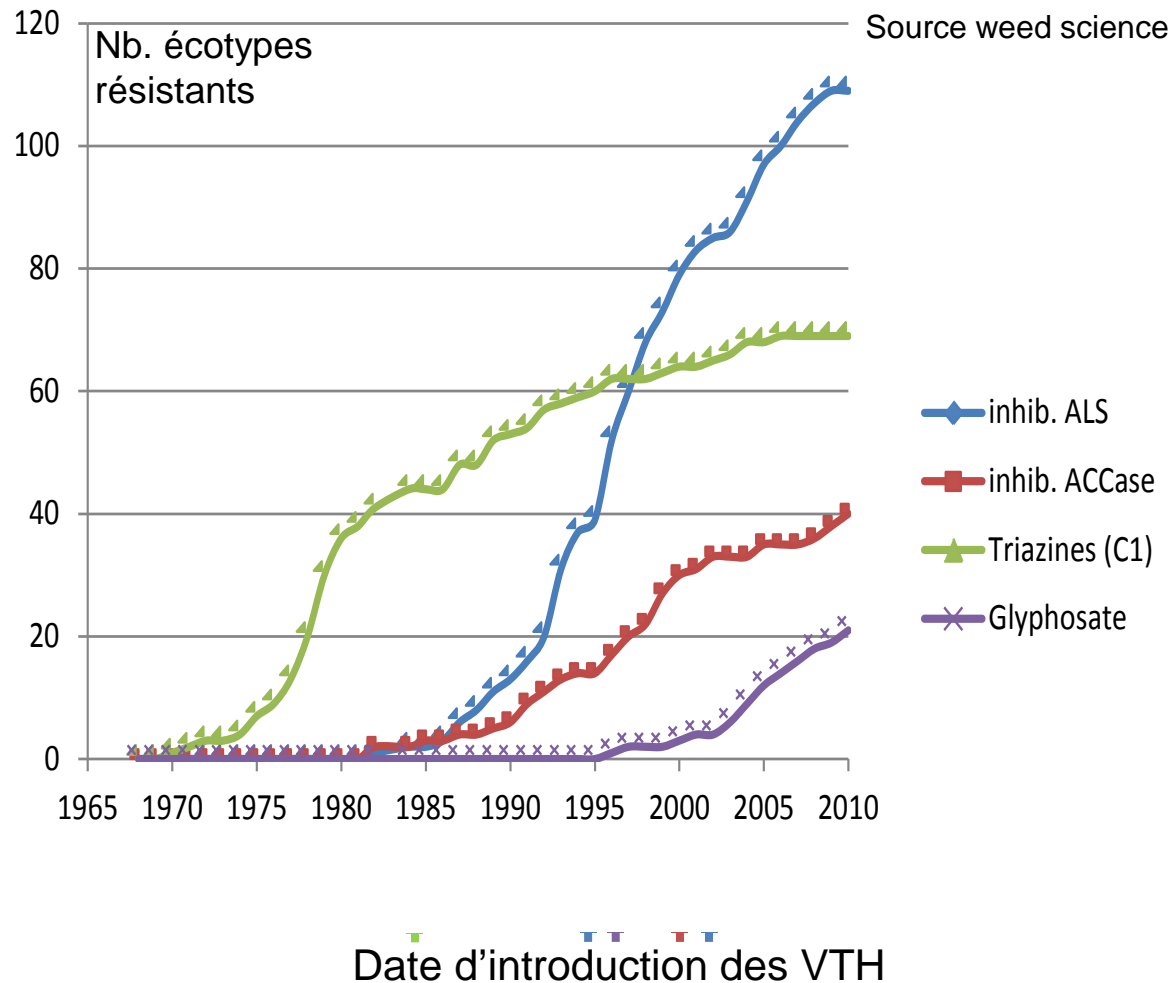
- Dynamique temporelle de la résistance à l'un des quatre principaux modes d'actions herbicides associés aux VTH

- Sauf dans le cas du glyphosate, des résistances apparues avant l'introduction des VTH

- Résistance apparues en lien avec l'utilisation à large échelle de certaines classes d'herbicides sélectifs

- VTH classe B :

- Déjà de nombreuses adventices résistantes
- Une mutation apparaissant « facilement » (usage en amélioration variétale)





# Exemples d'adventices résistantes repérées en France

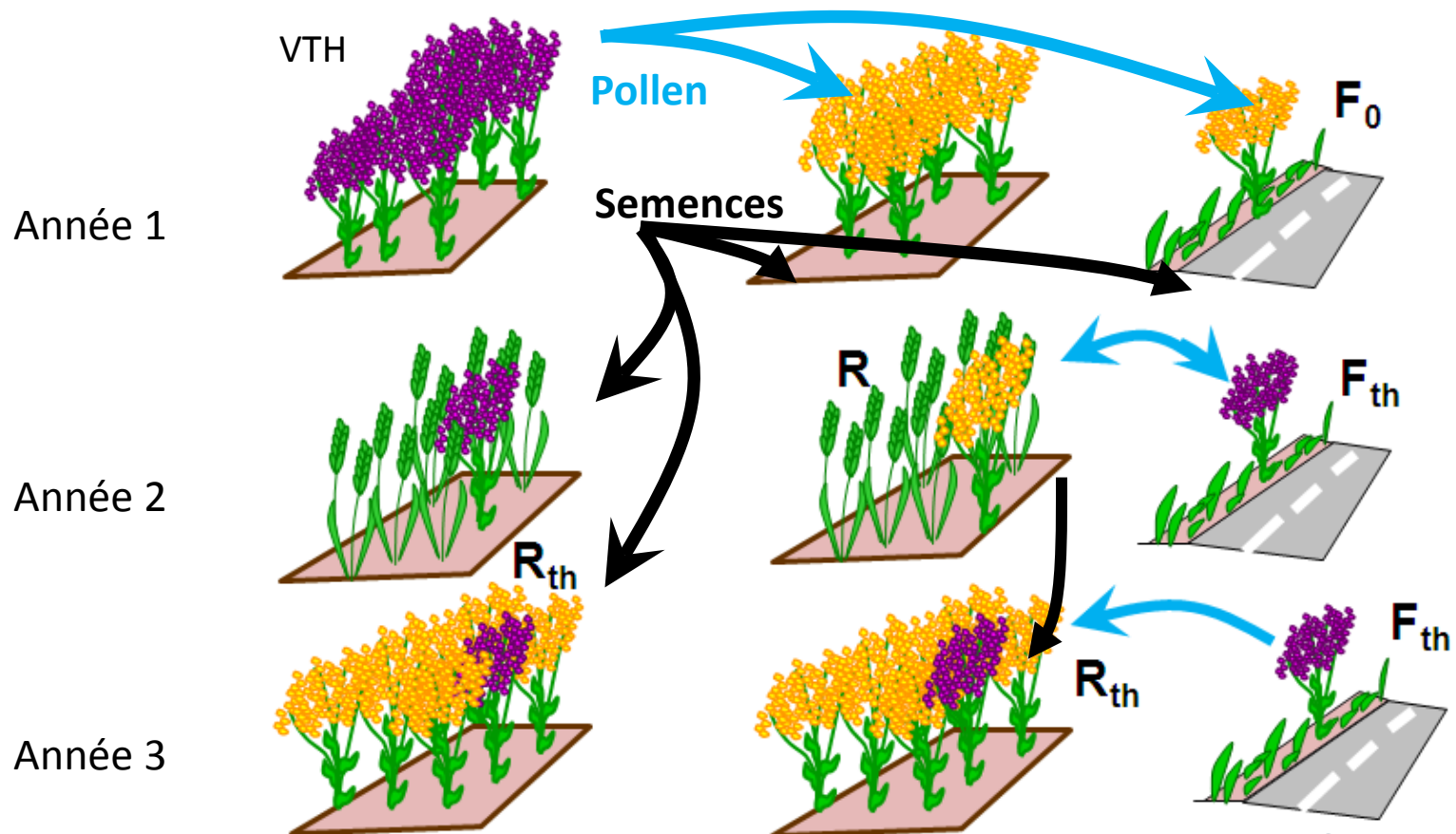
(source weed science)

Nom scientifique de l'espèce	Nom vernaculaire	Résistance aux herbicides Classe	Année de détection
<i>Alopecurus myosuroides</i>	Vulpin des champs	A, B	1993, 1993
<i>Avena fatua</i>	Folle avoine	A	1996
<i>Bromus tectorum</i>	Brome des murs, Brome des toits	C	1981
<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc	C	1978
<i>Lolium multiflorum</i>	Ray-grass d'Italie	A	1993
<i>Lolium rigidum</i>	Ivraie raide	A, B, G	1993, 2005
<i>Poa annua</i>	Pâturin annuel	C	1978
<i>Papaver rhoeas</i>	Coquelicot	B	2007

- Cas de l'ambrosie : pas de résistance en France mais des résistances aux herbicides des classes B, C, et G (y compris résistances multiples) détectées aux USA et au Canada

# Flux de gènes et diffusion du trait TH

- Flux de gènes via le pollen : vers lignées de la même espèce, non TH vers populations férales (même espèce) vers espèces inter-fertiles
- Repousses de graines dispersées issues de la VTH



# Flux de gènes et diffusion du trait TH

- Flux de gènes démontrés
  - Colza / moutardes, navette, ravenelle, roquette
  - Betterave / betteraves adventice et littorale
  - Riz / riz crodo (riz rouge)
  - Blé / égilope
  - Tournesol / tournesol adventice
  - Et aussi : avoines, sorgho, millets, luzerne, chicorées, laitues, carottes, radis, fraises...

# Exemple : Repousses de colza en luzerne



# Exemple : hors-type (cultivé x sauvage) de tournesol



# Flux de gènes chez le colza

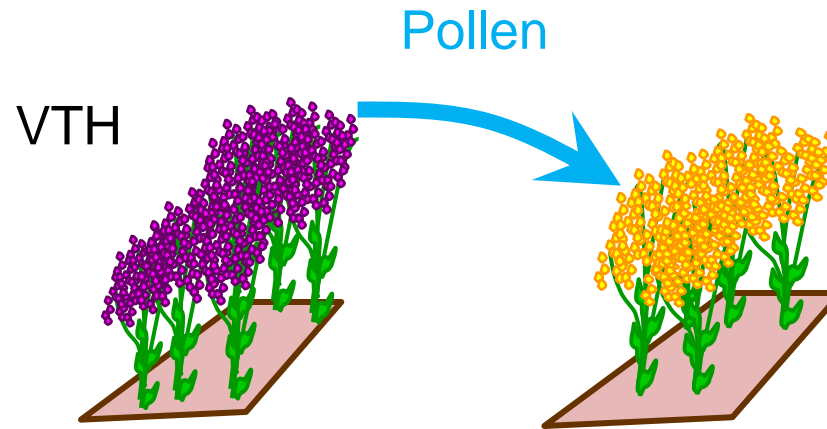
Henri Darmency

*Directeur de Recherches – INRA*

*Département Santé des Plantes et Environnement (SPE)*

# Flux de gènes entre variétés de colza

- Flux en sélection et en production de semences



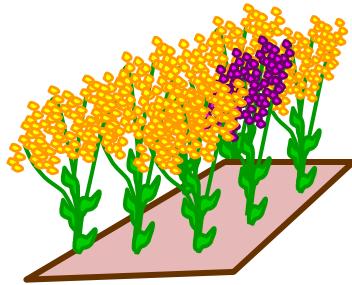
→ Perte d'identité variétale des lots de semences



→ Confirmé à un taux supérieur à 0.3 % sur 1/3 des lots de semences en 2003 au Canada

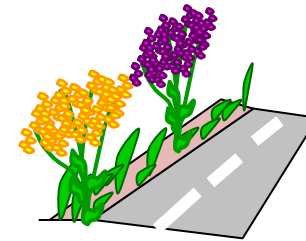
# Flux de gènes entre variétés de colza

- + flux de pollen et de semences dans les champs : conséquences



**Repousses TH dans la récolte**

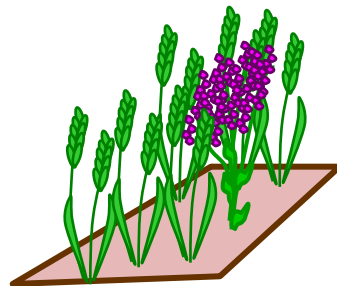
33% des cas 5 ans après expérience en France avec taux supérieur à 0,9%



**Férale TH**

80% des relevés aux USA (0,7% double TH)

**Repousses TH dans les autres cultures**



Difficulté de gestion des repousses dans la rotation

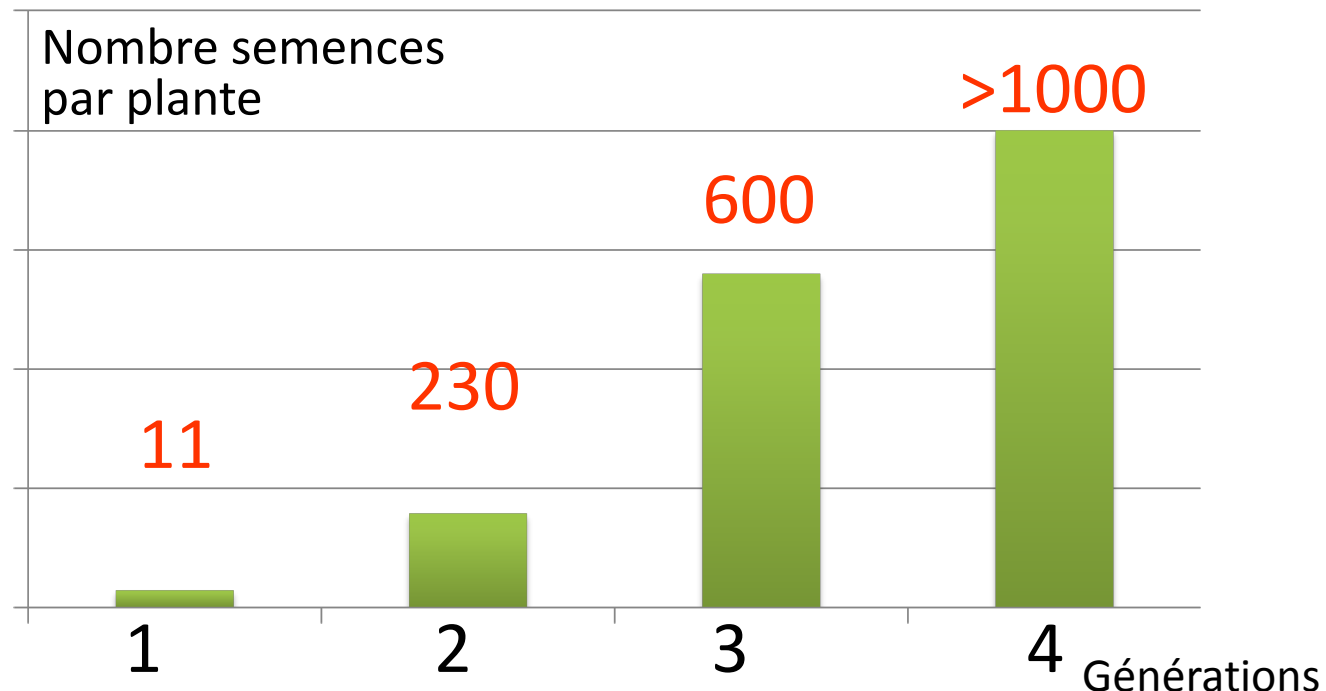


# Flux de gènes TH avec les brassicées sauvages

- Production d'hybrides spontanés par une adventice dans un champ de colza
  - Sanve : 0
  - Ravenelle : 0,01 à 0,0005 %

Reproduction des hybrides colza x ravenelle :

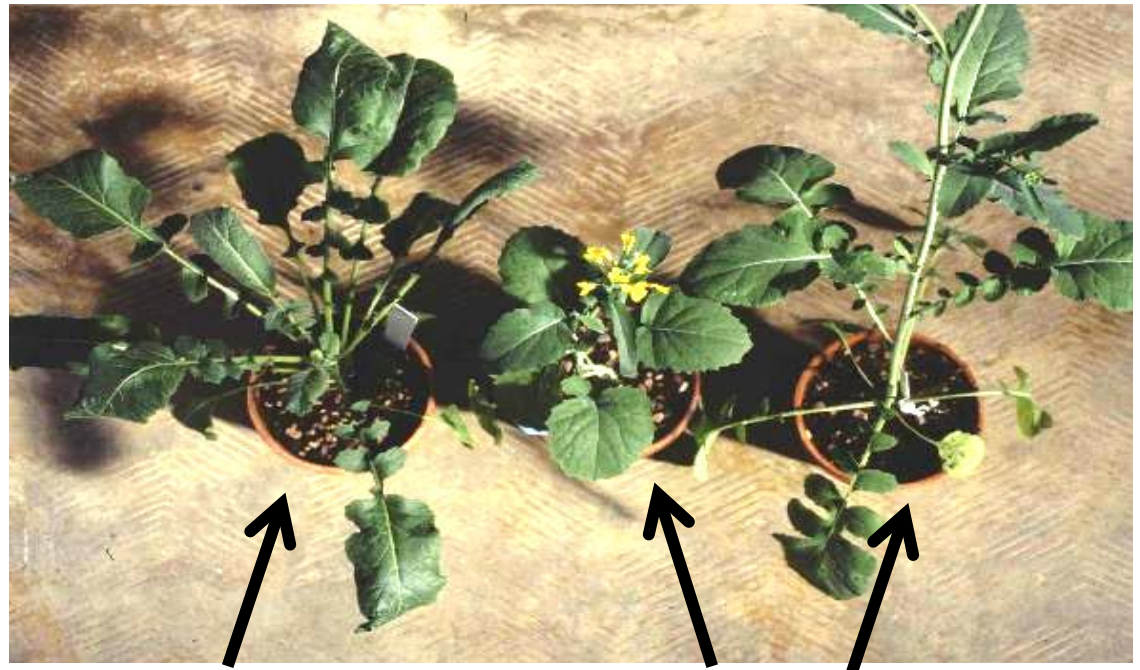
récupération rapide de la fertilité



# Flux de gènes TH avec les brassicées sauvages

- Production d'hybrides spontanés par une adventice dans un champ de colza
  - Sanve : 0
  - Ravenelle : 0,01 à 0,0005 %
  - Roquette : 0.6 %

La reconnaissance des hybrides est parfois difficile



La roquette

Deux hybrides

# Flux de gènes TH avec les brassicées sauvages

- Production d'hybrides spontanés par une adventice dans un champ de colza
    - Sanve : 0
    - Ravenelle : 0,01 à 0,0005 %
    - Roquette : 0,6 %
    - Moutarde noire : possible
    - Navette : jusqu'à 93 %
    - Choux sauvages : possible
- 1 à 17 % dans des populations naturelles au Danemark et Canada

# Conséquences des flux de gènes et de l'apparition d'adventices résistantes en production agricole

- **Concurrence accrue des adventices**
  - D'espèces différentes
  - D'espèces voisines
  - De la même espèce (populations férales)
- **Difficultés de désherbage**
  - Utilisation d'autres molécules éventuellement en combinaison avec l'herbicide auquel la variété cultivée est tolérante
- **Une remise en cause de la pérennité de l'innovation**
  - Une augmentation de l'usage de l'herbicide

# Evolution de la consommation d'herbicides

## Bilan de long terme

- Un enjeu central : compatibilité des VTH avec Ecophyto 2018
- Une évaluation délicate
  - La question du référentiel
    - Des sources différentes
    - Des conditions différentes (années, régions, lignées non isogéniques, etc.)
  - Des méthodes de traitement de données débattues
  - Des biais possibles dont l'adoption des VTH en zone de désherbage difficile

# Evolution de la consommation d'herbicides : l'exemple américain

Henri Darmency

*Directeur de Recherche – INRA*

*Département Santé des Plantes et Environnement (SPE)*

# Evolution de la consommation d'herbicides : l'exemple américain

- Des flores peu sensibles se développent  
→ Augmentation des doses
- Des résistances apparaissent

Conyza résistant dans un champ  
de soja RoundUp Ready®  
(et 5 autres adventices :  
amarantes et ambroisie)



Produced and prepared by Purdue  
University Extension Weed Science

# Evolution de la consommation d'herbicides : l'exemple américain

- Des flores peu sensibles se développent  
→ Augmentation des doses
- Des résistances apparaissent  
→ Retour aux programmes de désherbage avec plusieurs produits

Exemples :

- 2400 g acétochlore + 1000 g atrazine en pré-semis,  
et 800 g glyphosate en végétation

- glyphosate + dicamba + flumetsulam + clopyralide + acétochlore en pré-semis,  
et glyphosate + topramezone en végétation

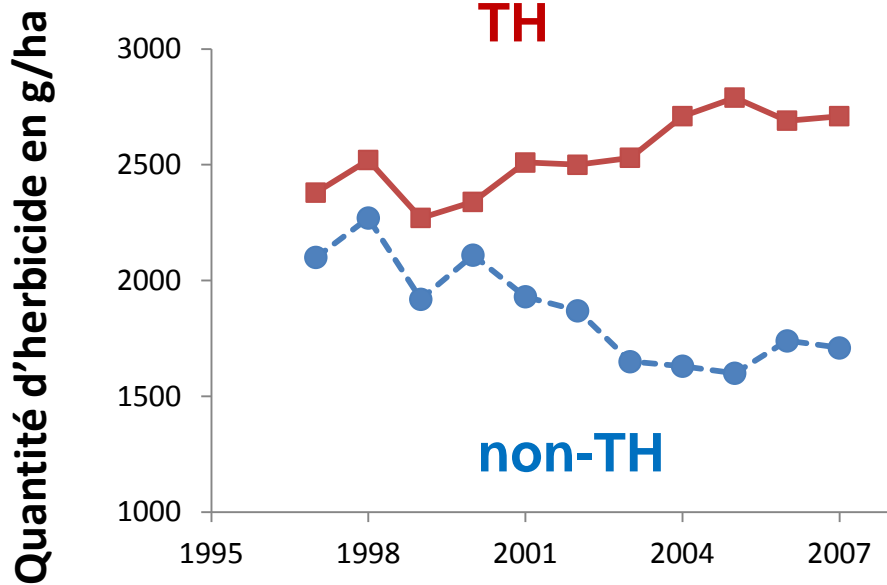


# Evolution de la consommation d'herbicides : l'exemple américain

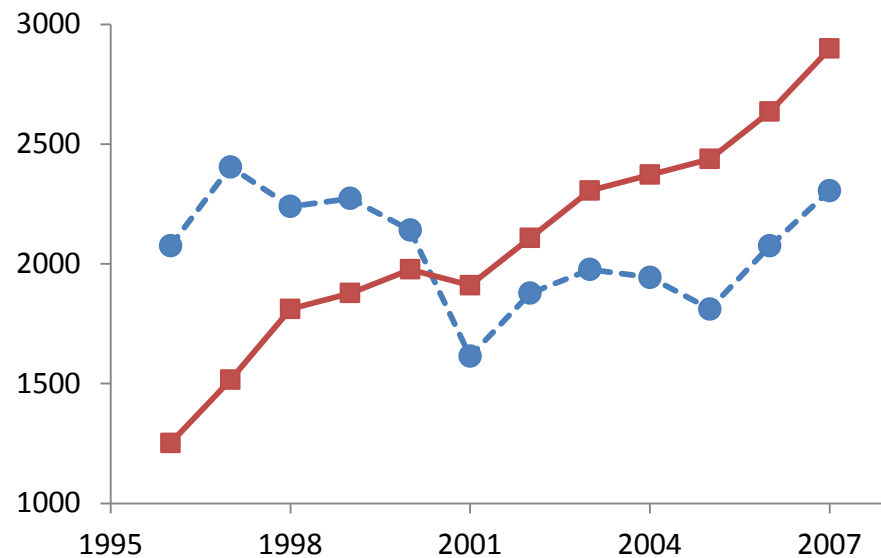
- Des flores peu sensibles se développent
    - Augmentation des doses
  - Des résistances apparaissent
    - Retour aux programmes de désherbage avec plusieurs produits
    - Variétés à double tolérance, donc deux herbicides (glyphosate + glufosinate; glyphosate + dicamba)
- ⇒ Traduction dans l'évolution de la consommation d'herbicides en TH
- Renouvellement des produits « conventionnels » : la référence non-TH utilise moins de matières actives

*Biais possible : les zones non-TH ont moins de problèmes d'infestation d'adventices*

# Consommation d'herbicides (g/ha) pour du coton conventionnel et transgénique aux USA

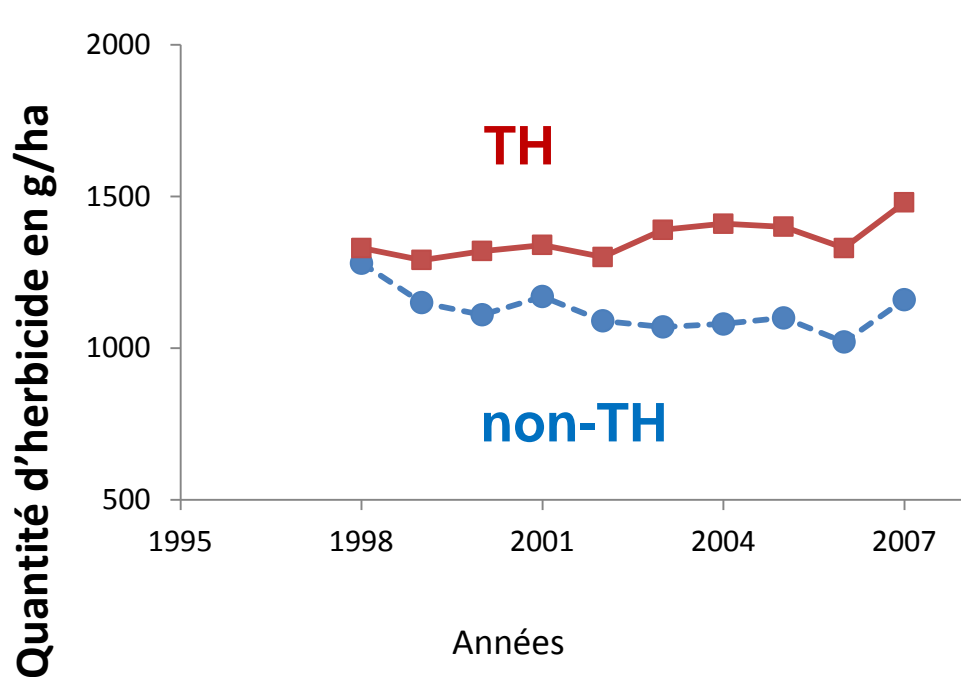


Brookes & Barfoot (2010)

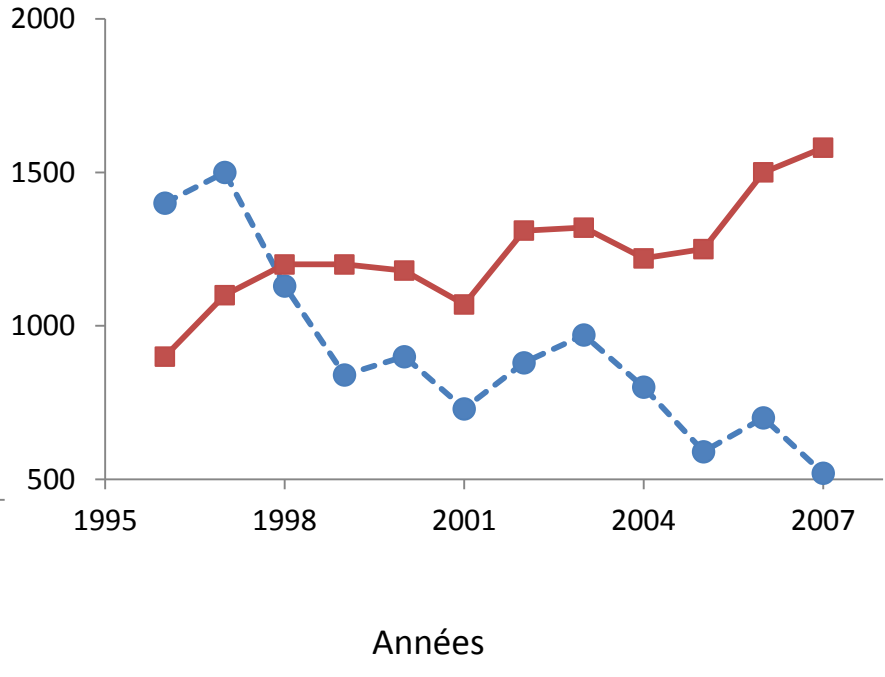


Benbrook (2010)

# Consommation d'herbicides (g/ha) pour du soja conventionnel et transgénique aux USA



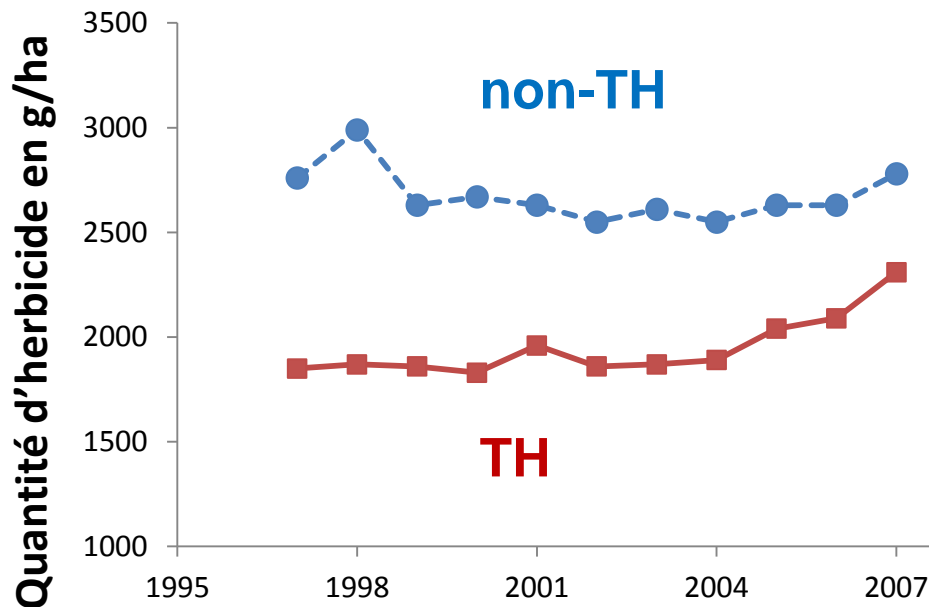
**Brookes & Barfoot (2010)**



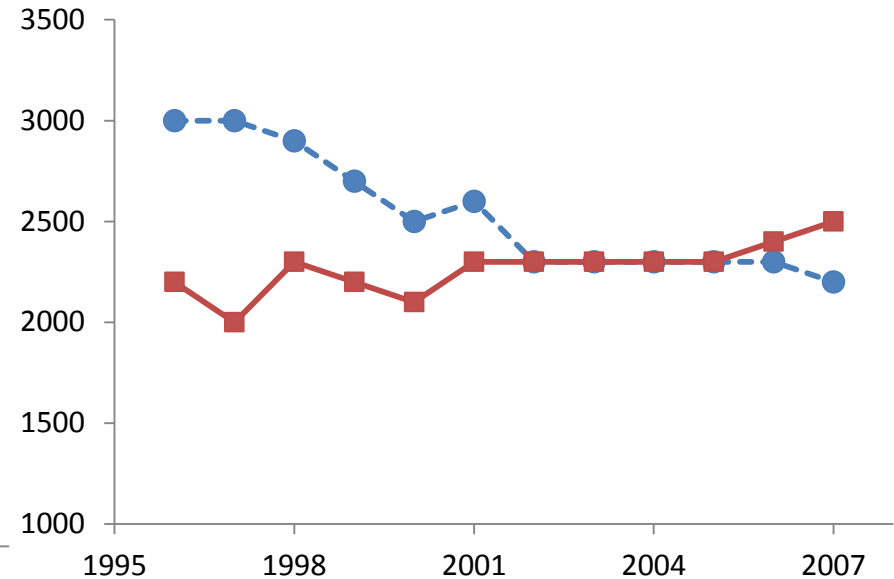
**Benbrook (2010)**

# Consommation d'herbicides (g/ha) pour du maïs conventionnel et transgénique aux USA

➔ Modalités d'utilisation des VTH à revoir dans un objectif de réduction des quantités et des fréquences d'utilisation



Brookes & Barfoot (2010)



Benbrook (2010)

# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- Adoption et expansion des VTH dans le monde
- Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- Principaux points de vigilance et conclusions

# Impacts sur les organismes non-cibles et sur la biodiversité

Evaluation hors système de culture (hors effet de l'herbicide)

- Effet direct des plantes TH en elles-mêmes
  - Peu d'études
  - Quelques travaux sur des pollinisateurs (colza TH GM)
    - Pas de différence observées (nombre de pollinisateurs, stratégie de butinage)
    - Des protocoles discutés (pertinence des indicateurs)
  - Quelques travaux sur les micro-organismes
    - Une diminution du nombre et de la taille des nodosités sur soja

# Impacts sur les organismes non-cibles et sur la biodiversité

## Evaluation en système de culture (y compris effet herbicide)

Bibliographie + données FSE (2000/2003 – UK – 4 VTH GM – 70 sites)

Comparaison VTH (herbicide) / non TH (conventionnel)

- **Effet sur la flore**

- Distinction délicate entre effet de l'herbicide et effet des pratiques associées
- Densités d'adventices en parcelles VTH > Densités en non TH avant application de l'herbicide (lien avec l'effet d'un travail du sol réduit)
- Diversité et l'abondance des espèces diminuent lorsque fréquence d'application des herbicides augmente

- **Effet sur la microflore : des effets sur la viabilité de certains micro-organismes aux doses d'utilisation**

- Taxons modèles (signification biologique?)
- Diminution de populations de bactéries « bénéfiques » (fixateurs libres ou symbiotiques de l'azote, antagonistes de pathogènes)
- Augmentation de populations de pathogènes fongiques

# Impacts sur les organismes non-cibles et sur la biodiversité

Evaluation en système de culture (y compris effet herbicide)

## • Effet sur la faune

### - Une écotoxicité de certains herbicides

- Bromoxynil sur abeilles
- Effets atrazine + S-metolachlor sur batraciens
- Glyphosate sur vers de terre

→ Globalement un effet écotoxique direct faible sur la faune

### - Effets des pratiques culturales associées (travail de sol réduit)

- Un effet difficile à évaluer (synergique ou antagoniste) variable selon les espèces animales

→ Un effet global du désherbage via la réduction du nombre d'adventices :

Une diminution des populations d'insectes herbivores après application de l'herbicide

Un effet sur l'ensemble de la chaîne alimentaire (micro-mammifères et oiseaux)



# Contamination chimique des eaux et des sols

- **Des transferts d'herbicides**
  - Dans l'air
  - Vers le sol et les eaux (substances hydrosolubles - phénomènes d'adsorption)
- **Une dégradation possible**
  - Différents mécanismes (photolyse, hydrolyse, biodégradation)
- **Le devenir des molécules dans l'environnement**
  - Herbicides et métabolites : parmi les molécules les plus fréquemment détectées dans les eaux de surface et souterraines
  - Une évaluation au cas par cas : pas de généralisation aux molécules d'une même classe, même voisines
  - Une prévision du devenir des molécules et de leur persistance possible mais pas toujours en accord avec les observations de terrain (cas du glyphosate et de l'atrazine)
- **Des difficultés méthodologiques non spécifiques aux VTH**
  - Manque et difficulté d'accès aux données (écotoxicologie)
  - Pas de littérature permettant de relier modalités d'utilisation d'herbicides en système TH et devenir de ces herbicides

# Devenir du glyphosate dans le sol et le milieu aquatique

Claire Richard

*Directrice de Recherches – CNRS*

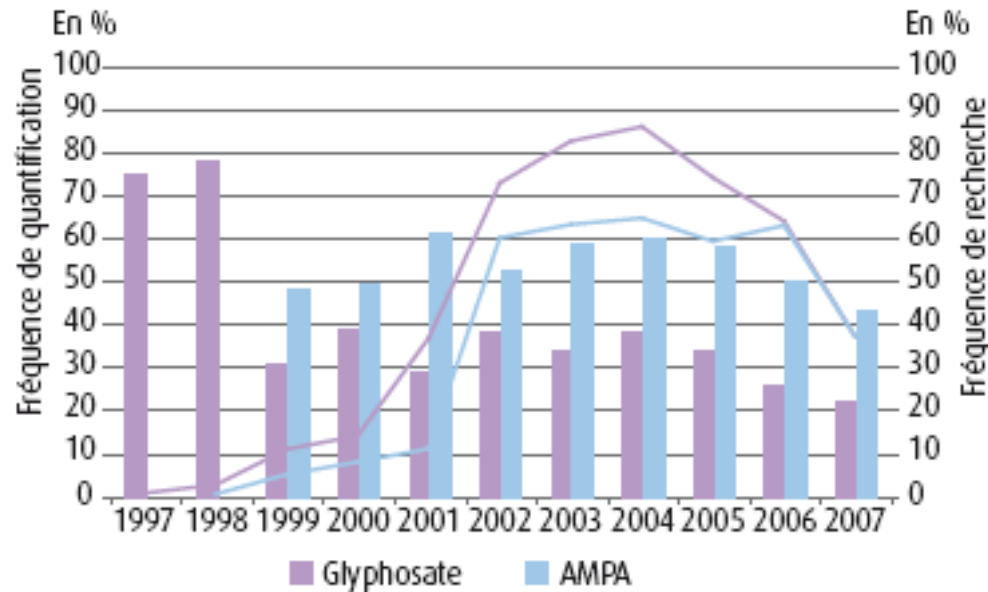
*Laboratoire de photochimie*

# Le glyphosate

- Herbicide total introduit en 1974.
- Herbicide le plus utilisé à l'échelle mondiale depuis 20 ans.
- Hors Europe: sert dans la culture des variétés OGM Roundup Ready®.
- En France: 7000 tonnes vendues en 2010. Désherbage de surfaces agricoles ou non. Non autorisé en association avec une VTH.  
  
→ Cas intéressant : bien qu'annoncé comme peu persistant, retrouvé dans le milieu aquatique.

# Données 2010 du SOeS

- Eaux de surface



L'AMPA est la substance la plus souvent détectée et quantifiée dans les cours d'eau.

Le glyphosate se situe en 3<sup>e</sup> position.

- Eaux souterraines

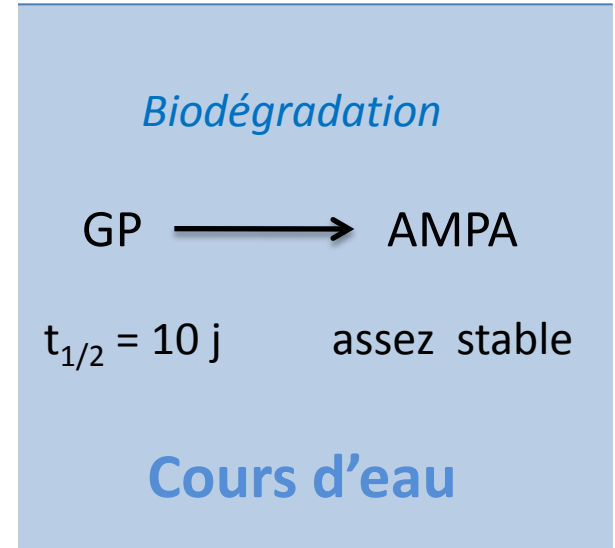
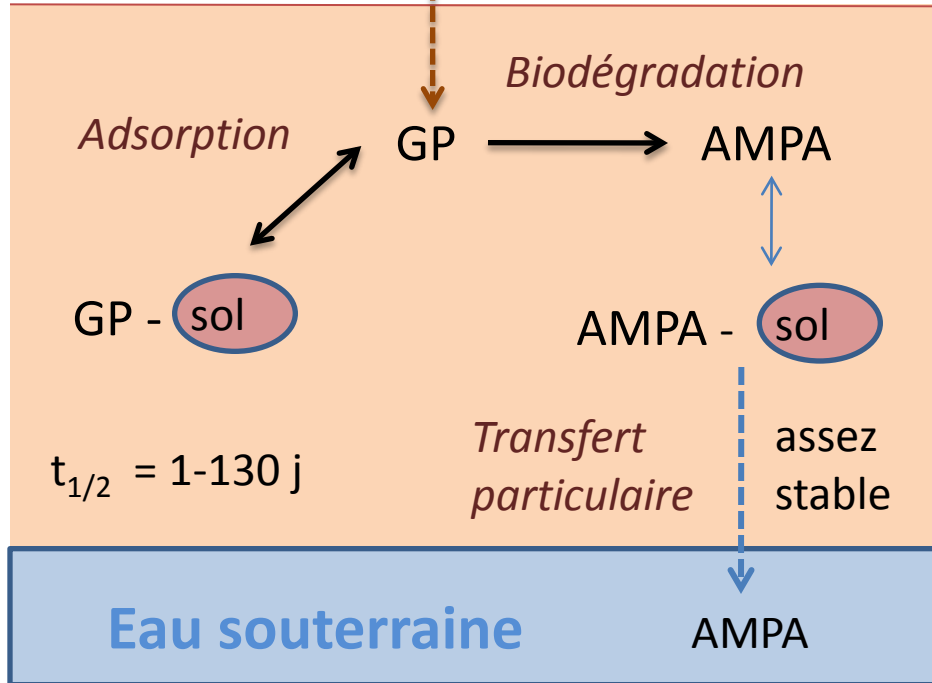
Glyphosate non détecté, AMPA l'est très faiblement.

# Glyphosate

Très soluble

Ruissellement

Transfert dans le sol



AMPA peu biodégradable  
⇒ s'accumule plus que GP

⇒ le devenir d'une molécule est largement conditionné aux caractéristiques du milieu lui-même

⇒ les produits de transformation peuvent s'accumuler même si la molécule parent se dégrade

# Estimation des effets environnementaux des cultures TH

Elle dépend des situations considérées, et des méthodes d'évaluation utilisées :

- **Choix de l'itinéraire de désherbage TH de référence**

Substitution du programme classique par 1 application de glyphosate  
→ diminution de l'IFT à court terme, par rapport aux cultures non-TH

- **Choix des paramètres pris en compte**

Intégration des produits des produits de dégradation

→ effet positif moindre à cause de l'AMPA et de sa persistance.

⇒ l'évaluation du risque environnemental est d'autant plus précise qu'elle intègre l'ensemble de ces paramètres : conditions du milieu, métabolites...

# Bilan des effet des VTH sur l'environnement

- **En conclusion :**

- Des effets limités mais réels sur la biodiversité y compris les pollinisateurs
- Un effet fort de l'efficacité du désherbage : réduction du nombre d'adventices
- Une contamination déjà notable des ressources eaux et sols par les herbicides utilisés en système VTH et leur métabolites

- **Des questions en suspens, des difficultés**

- La difficulté à obtenir certaines données
- La diversité des milieux concernés
- L'étude de l'effet des métabolites
- La question de la pertinence des indicateurs (DL50)
- La question des formulations et des cocktails

Les VTH ne sont qu'un cas particulier d'usage d'herbicide, mais sont susceptibles d'amplifier rapidement l'usage de certaines molécules

# Plan de la présentation

- Modes d'obtention des VTH, VTH actuellement existantes
- Adoption et expansion des VTH dans le monde
- Effets sur la flore adventice, évolution des consommations d'herbicides
- Effets de la culture sur l'environnement : biodiversité, espèces non cibles et compartiments eaux et sols
- **Principaux points de vigilance et conclusions**



# ESCo : Principales conclusions (1)

- **Les VTH : un cas particulier de l'amélioration variétale**  
Etablit un lien de dépendance entre une variété et une molécule herbicide
- **Grille d'analyse pluridisciplinaire de l'ESCo : des motivations d'adoption multiples et imbriquées**
  - Une adoption et expansion très rapide de l'innovation TH,
  - Gains économiques directs non évidents pour l'agriculteur,
  - Gains en termes de mise en œuvre et quantité de travail,
  - Apports initiaux sur réduction de difficultés de désherbage
- **Des phénomènes génériques confirmés :**
  - Apparition et expansion de résistances chez des adventices,
  - Diffusion du trait TH par croisements,
  - Accroissement à terme des quantités d'herbicides utilisées

→ Remise en question de la pérennité de la stratégie TH pour l'utilisateur aux USA.

# ESCo : Principales conclusions (2)

- Les limites de la transposition d'une expérience majoritairement US au contexte Européen :

- cadre réglementaire et social
- cadre agronomique et systèmes de culture
  - USA : rotations très simplifiées, non-labour très développé
  - France : systèmes de culture plus complexes et variés mais en évolution, gamme plus large d'outils de contrôle des adventices

→ Éléments qui conditionnent l'existence d'une offre VTH, sa mise en œuvre, sa pérennité

- Espèces actuellement concernées en France par l'innovation :
  - **tournesol** déjà cultivé, **colza** en cours inscription : tolérance classe B
  - à l'échelle de la rotation, des stratégies de désherbage pouvant ne mettre en jeu qu'une seule classe d'herbicide

→ Point de vigilance sur la compatibilité avec Ecophyto 2018

Evitement ou non des phénomènes génériques, fonction des conditions de mise en œuvre et accompagnement de l'innovation TH.

# Des observations nécessaires et des questions de recherche à poser pour combler des lacunes

- Analyses multicritères et intégratives des systèmes de cultures, cycle de vie
- Comment passer graduellement de l'observation de la parcelle à celle du territoire
- Observatoires de l'évolution à la fois des pratiques culturales et de la flore adventice
- Comment anticiper les effets non intentionnels non évalués dont impacts de la culture VTH sur espèces non cibles

# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



MISE EN PERSPECTIVE DES CONCLUSIONS DE L'ESCO

L'expérience canadienne des impacts des cultures VTH  
sur la gestion des adventices

*Marie-Jo Simard*

Agriculture et agroalimentaire Canada





Agriculture et  
Agroalimentaire Canada

Agriculture and  
Agri-Food Canada



## Cultures tolérantes aux herbicides au Canada

Marie-Josée Simard Ph. D.

Malherbologiste

Centre de R&D sur les sols et les grandes cultures

Québec, QC

Canada

# Introduction-les grandes cultures au Canada



# Les cultivars d'Agriculture Canada

250 variétés  
conventionnelles  
depuis 10 ans

Variété supportée pour l'enregistrement

1

2

Coll. avec compagnie

Lignées libres (14 centres de rech.)  
Appel de proposition de licence  
Divulgarion de matériel génétique

[www.agr.gc.ca/cultivars](http://www.agr.gc.ca/cultivars) 2012

Sélection de la meilleure offre  
*Protection supplémentaire – PBR*  
*Loi sur l'obtention végétale*

Licence

Royautés (\$/tonne ou 3-7% des ventes)

# La réglementation au Canada

L'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA)

## Les Végétaux à Caractères Nouveaux (VCN)

Le caractère est réglementé et non pas la méthode

Caractère nouveau =

1) il est nouveau pour les populations stables cultivées de l'espèce végétale au Canada;

et


2) il peut avoir un impact sur l'environnement

voir: [www.inspection.gc.ca](http://www.inspection.gc.ca)










# Les cultures TH commercialisées au Canada

Glyphosate	Colza, maïs, soja	Variétés RR
Glufosinate	Colza, maïs, soja	Variétés LL
Imidazolinones	Colza, maïs, blé, lentilles	Variétés Smart, Clearfield, CDC imagine
Dicamba	Soja, disponible en 2012 + glyphosate	
2,4-D	Maïs, en cours	
<i>Bromoxynil</i>	<i>Colza-abandonné</i> <i>Herbicide à spectre limité</i>	<i>Navigator</i>
<i>Triazines</i>	<i>Colza-abandonné-</i> <i>Rendements</i>	<i>OAC Triton</i>



*SmartStax*

# Le pourcentage d'hectares TH par culture

Colza	99%	Début: 1995	
Mais	>90% en augmentation		
Soja	>65%		
Blé	6%	Imi – seulement	
Lentilles	50%	Imi – seulement	

# Impacts agronomiques (+)

Les différences de rendement sont souvent liées au cultivar

**Adoption très rapide des cultivateurs**

Fenêtre d'application d'herbicide étendue

Semis plus hâtifs

**Cultures sans labour**

Rangs plus larges dans le soja

Pas de restrictions dues aux résidus dans le sol (gly-glu)



# Impacts agronomiques (+)

Contrôle des adventices problématiques

Ex. moutarde des champs dans le colza

Ex. dicotylédones dans le soya

- ↑ rendement et qualité de la récolte



Réduction de la banque de graines des adventices dans le colza

Contrôle des spontanés (repousses) non résistants (ex. orge dans blé-imi) donc rotation rapide possible



# Impacts agronomiques (-) à court terme

Applications trop tardives...pertes de rendement

Utilisation du même mode d'action...  
absence de rotation:



Présence de plants spontanés (repousses) si même herbicide

- pertes de rendement
- difficultés durant la récolte
- réduction de la qualité de la récolte



**Dérive d'herbicide sur d'autres cultures**



# Impacts agronomiques (-) à plus long terme

Utilisation du même mode d'action..  
absence de rotation des herbicides

Sélection  
**Résistance**  
Glyphosate



Grande herbe à poux  
*Ambrosia trifida*  
*Erigeron canadensis*

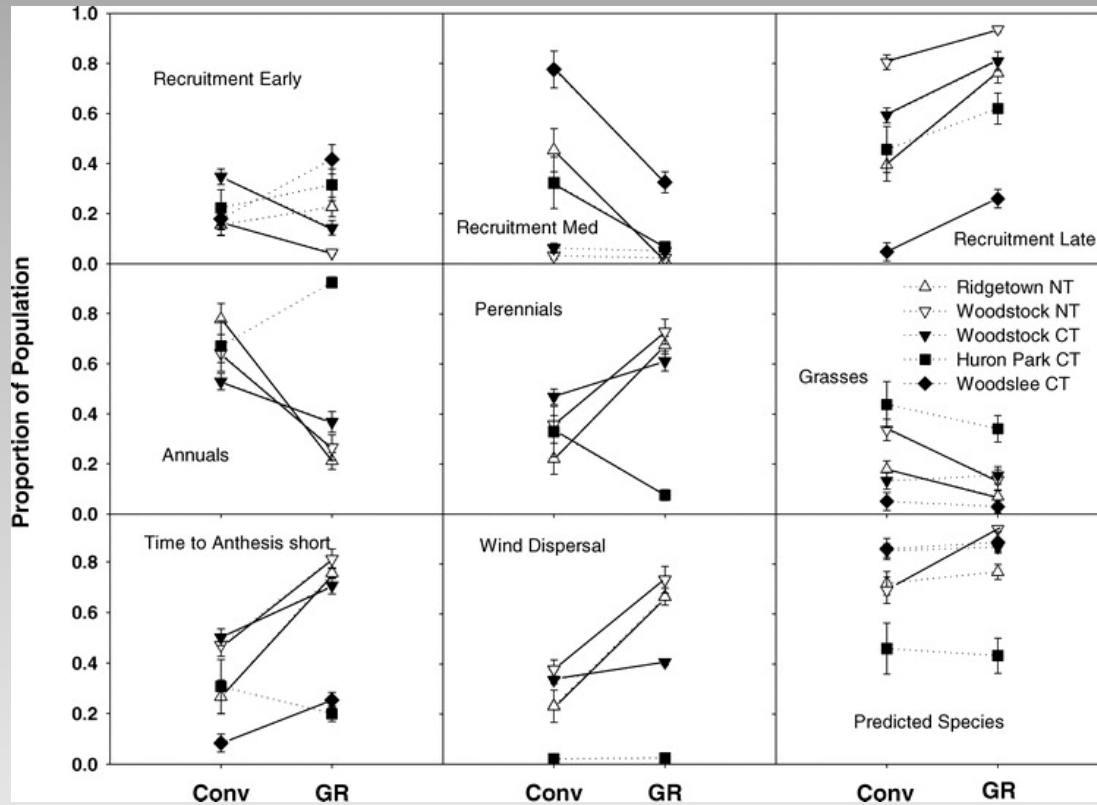
**Perte du produit et retour des autres herbicides**

Utilisation de mélanges d'herbicides (surtout dans le maïs)



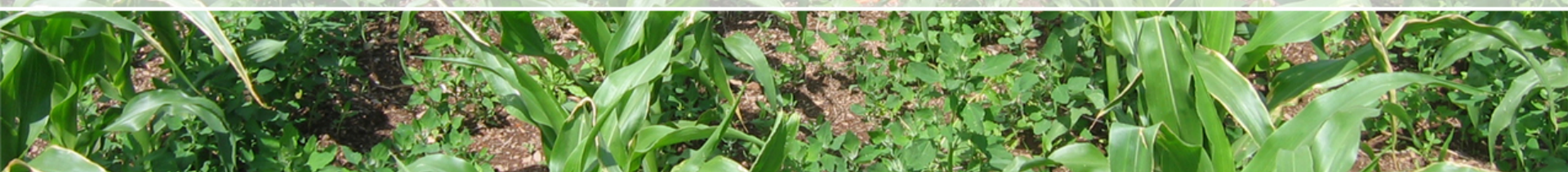
# Impacts agronomiques - composition floristique

-Dérive dans la composition floristique des adventices



ces (sans labour)  
tolérantes

Gulden et al. 2010.  
Weed Science. 58: 278–288. 2010.



# Impacts environnementaux

Réduction de la toxicité et/ou des masses par hectare

Environmental Impact Quotient –

IRPeQ

<http://www.sagepesticides.qc.ca> – MDDEP/INSPQ/MMAPAQ





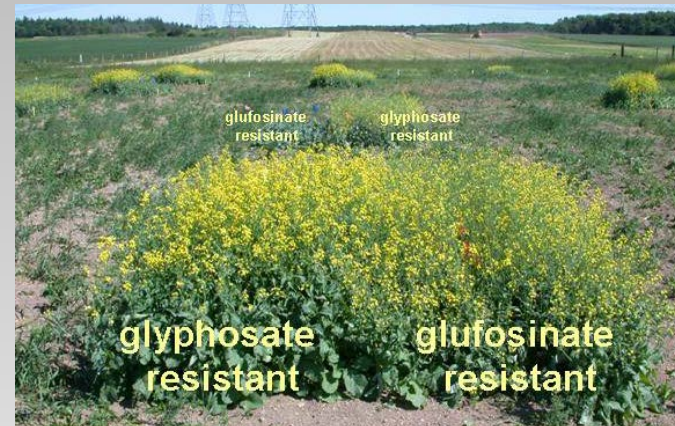
# Impacts environnementaux

La culture elle-même devient envahissante...  
colza spontané et populations le long des routes..



**Les cultures moins domestiquées sont plus à risque**

Contamination entre cultivars  
Effet du synchronisme de  
floraison



Simard et al. 2009.  
Environ. Biosafety Res.

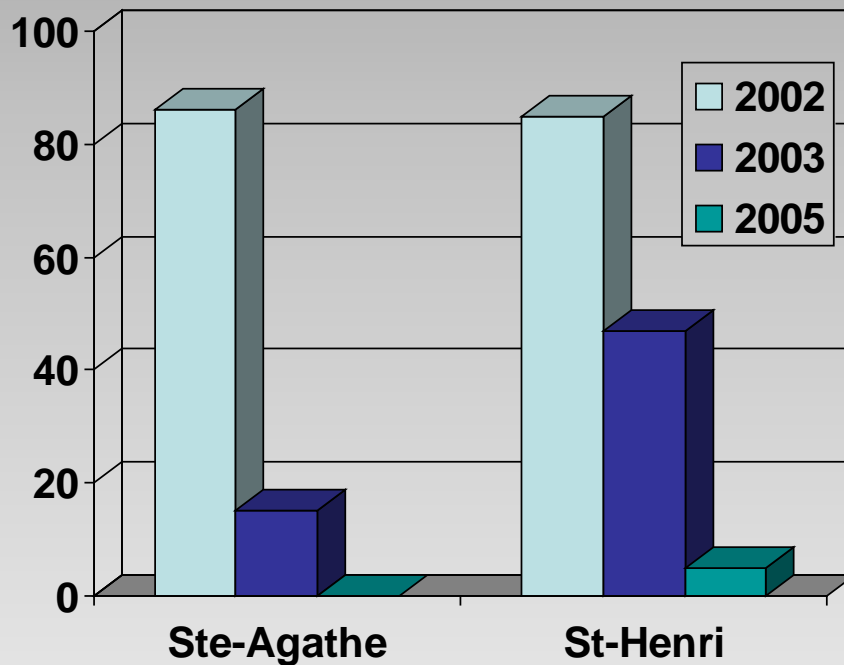


# Impacts environnementaux – colza

Croisement avec les adventices

1.1% à 17.5% grains **hybrides**

**Moyenne: 8.2%**



*Raphanus raphanistrum*



*Brassica rapa*

25 navettes

« *Roundup Ready!* »

Source: Simard et al. 2007 Can. J. Bot.  
Warwick et al. 2007. Mol. Ecol.

# Impacts économiques

## Produits exportés en Europe et en Asie

En 2009, du lin OGM a été détecté en Europe –  
détection du *promoteur*.

Ce lin n'est pourtant plus produit depuis 2001



# Conclusion- retour du soja conventionnel

**Le marché peut renverser/ralentir l'adoption d'OGMs**

Le blé OGM n'a pas été adopté par les agriculteurs canadiens

Le soja (IP) pour l'alimentation humaine exporté en Asie

20-25% des surfaces au Québec et en Ontario

Shurtleff, W. et Aoyagi, A. 2010. History of Soybeans and Soyfoods in Canada (1831-2010).

**Amélioration des cultivars conventionnels destinés à l'alimentation**

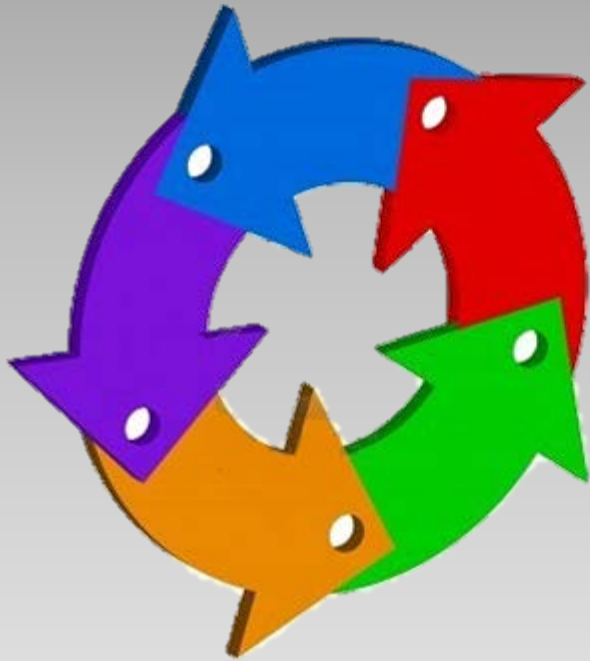


[www.semencesprograin.com](http://www.semencesprograin.com)



# Conclusion- pour assurer la durabilité

**Rotation, rotation, rotation** ...des groupes d'herbicide



Le risque est moindre lorsque les producteurs ne peuvent pas cultiver la culture à chaque année ou que le même groupe d'herbicide ne peut être appliqué.



# Conclusion – pour assurer la durabilité

Les adventices s'adaptent à **toutes** nos méthodes de lutte...  
y compris le désherbage manuel!

Suivi au champ – évaluation du risque  
*Beckie et al. Crop Protection 2010*



# Remerciements

**INRA**

**Anne Légère**

**Susanne Warwick**

**Geneviève Bégin**

**et tous mes étudiant(e)s**





Agriculture et  
Agroalimentaire Canada

Agriculture and  
Agri-Food Canada



Canada

The word "Canada" is written in a large, black, serif font. A small Canadian flag logo is positioned above the letter 'a'.



# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## MISE EN DÉBAT DES CONCLUSIONS : AVANTAGES, LIMITES, MESURES DE GESTION

*René Baratin*, Union Française des Semenciers

*Claudine Joly*, France nature Environnement

*Quentin de la Chapelle*, Réseau Agriculture durable

*Jean-Marc Longuet*, coopérative Nouricia

*Claire Richard*, Centre technique des oléagineux (CETIOM)



# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



LES ENSEIGNEMENTS DE L'ESCO POUR LA RECHERCHE

*Marion Guillou*

Présidente directrice générale de l'Inra



# Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Colloque - 16 novembre 2011



## L'ÉCLAIRAGE DE LA DÉCISION PUBLIQUE

*Pascale Briand*

Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche,  
de la ruralité et de l'aménagement du territoire,  
Directrice générale de l'alimentation

