



**HAL**  
open science

## Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau

. Présidence Du Centre Inra Poitou-Charentes, . Présidence de La Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes

### ► To cite this version:

. Présidence Du Centre Inra Poitou-Charentes, . Présidence de La Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes. Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau. 5. Rencontres régionales Poitou-Charentes de la recherche et du développement, Dec 2014, Rouillé, France. 56 p., 2014. hal-02793056

**HAL Id: hal-02793056**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02793056>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ACTES DU  
COLLOQUE



Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau

5<sup>e</sup> rencontres régionales Poitou-Charentes  
de la recherche et du développement  
Mardi 2 décembre 2014 de 9h à 17h,  
Lycée agricole Xavier Bernard de Venours (Rouillé)





# Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau

## Sommaire

<b>Editorial</b>	3
Luc Servant, Jean-Marc Chabosseau	

<b>Programme</b>	5
------------------	---

<b>Les eaux souterraines de Poitou-Charentes : état des lieux en quantité et en qualité</b>	7
Francis Bichot	

## EAU - QUALITÉ

### Diagnostiquer les risques de fuite de nitrates dans les systèmes

<b>Un modèle opérationnel pour le diagnostic des émissions de nitrate aux champs</b>	15
Virginie Parnaudeau, Raymond Reau	

<b>Ellias : utilisation de Syst’N dans le cadre d’un programme Re-sources</b>	21
Mathieu Guiberteau	

### Eau et produits phytosanitaires

<b>Les sites « qualité des eaux » du Magneraud et de la Jaillière : des dispositifs pour caractériser et quantifier les phénomènes de transferts des produits phytosanitaires sur une parcelle agricole</b>	25
Céline Drillaud	

<b>Associations variétales et variétés économes en intrants : quelles solutions apportent la génétique et les choix variétaux ?</b>	31
Jérôme Enjalbert	

## EAU - QUANTITÉ

### Des plantes qui résistent à la sécheresse

<b>Les besoins en eau des plantes et l’introduction de la génétique</b>	37
Jean-Louis Durand	

<b>Adaptation à la sécheresse du maïs, du tournesol et des prairies</b>	43
Marc Ghesquiere, Claude Welcker, Nicolas Langlade	

### Une irrigation économe et efficiente

<b>Des systèmes irrigués doublement performants à l’échelle de l’exploitation : test et évaluation de systèmes de culture économes en eau et en intrants</b>	49
Sébastien Minette, Bruno Sylvestre	



## Editorial

Ces cinquièmes Rencontres régionales de la recherche et du développement voulues par le Centre Inra et la Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes sont désormais un rendez-vous inscrit dans le paysage régional. La dernière édition a eu lieu le 3 décembre 2013 au lycée agricole de l'Oisellerie et a traité du sol, ressource pour une agriculture durable et performante.

Ce cinquième rendez-vous se tient au lycée agricole Xavier Bernard de Venours qui a vu la première édition de ce cycle de séminaires en 2008. Elle aborde un thème crucial pour l'agriculture en général et tout particulièrement pour notre région : l'eau, sa protection et sa gestion.

**Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau**, est le sujet traité au travers de présentations issues de la recherche et du développement lors de cette journée et débattu avec les participants. Ce sujet pourrait faire l'objet de plusieurs colloques consécutifs tant les travaux sont nombreux. Les interventions sélectionnées abordent différentes facettes de la préservation de la ressource en eau.

L'évaluation des risques est une première étape indispensable pour mesurer l'impact des pratiques et les faire évoluer. Cet aspect est abordé au travers d'un outil élaboré par l'Inra qui évalue les transferts de nitrates dans les eaux à l'échelle du système de culture. Entre les mains d'agronomes de chambres d'agriculture et d'autres organismes de développement, il a vocation à être un précieux outil pédagogique et d'aide à la décision.

Pour ce qui concerne les risques liés aux produits phytosanitaires, les mécanismes de transfert de molécules sont plus complexes. Les connaître doit permettre de mieux orienter les actions dans différents milieux. Les travaux conduits par Arvalis éclairent cette question.

L'amélioration variétale et l'usage de variétés résistantes aux maladies ou à la sécheresse et de mélanges de variétés restent des leviers agro écologiques majeurs. Les acquis et perspectives dans ce domaine sont présentés par différentes équipes de l'Inra.

La mise en œuvre de nouvelles pratiques visant une préservation de la ressource en eau est du ressort de l'agriculteur. Un témoignage d'une opération-test à l'échelle de l'exploitation est présenté en fin de programme, constituant une synthèse des travaux de la recherche, du rôle du technicien et de l'évolution du métier d'agriculteur.

Nous espérons que ces rencontres contribueront aux débats et actions sur les territoires régionaux à « enjeux eau », tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

**Luc SERVANT**

Président de la Chambre régionale d'agriculture  
Poitou-Charentes

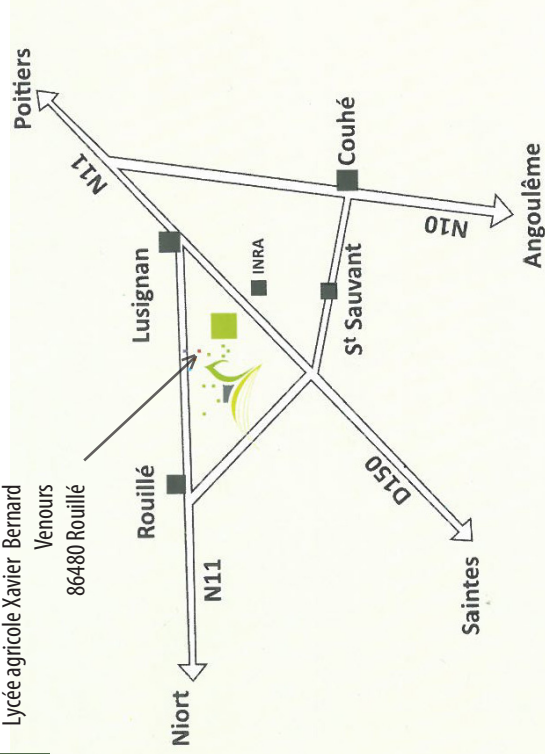
**Jean-Marc CHABOSSEAU**

Président du centre Inra  
Poitou-Charentes



## Lieu

Lycée agricole Xavier Bernard  
Venours  
86480 Rouillé



Enseignants et étudiants en agriculture, techniciens et conseillers agricoles productions végétales et animales, conseillers environnement, agriculteurs, collectivités locales et territoriales, administrations et associations.

## Public

## Inscription

Frais de 20 € TTC, comprenant le repas. Inscription en ligne :

<http://sondages.poitou-charentes.chambagri.fr/limesurvey/index.php/survey/index/sid/932375/lang/fr>

## Comité d'organisation

**Jean-Marc CHABOSSEAU, Jean-Louis DURAND, Armele PÉRENNÈS** (Inra Poitou-Charentes),  
**Lysiane BACHELIER, Jean-Luc FORT** (Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes).

## Contact

Françoise Auzanneau, Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes  
Courriel : [fran.coise.azanneau@poitou-charentes.chambagri.fr](mailto:fran.coise.azanneau@poitou-charentes.chambagri.fr)  
Tél. : 05 49 44 74 86

Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes  
CS 45002 - 86550 Mignaloux-Beauvoir  
Tél. : 05 49 44 74 74  
[www.poitou-charentes.chambagri.fr](http://www.poitou-charentes.chambagri.fr)



## PROGRAMME

Vers une agriculture qui préserve la ressource en eau

5<sup>e</sup> rencontres régionales Poitou-Charentes  
de la recherche et du développement  
Mardi 2 décembre 2014 de 9h à 17h,  
Lycée agricole Xavier Bernard de Venours (Rouillé)



INRA  
SCIENCE & IMPACT



AGRICULTURES  
& TERRITOIRES  
CHAMBRE D'AGRICULTURE  
POITOU-CHARENTES



## Programme

9h

Accueil des participants

9h30 - 10h

Introduction générale

**Denise MÉNARD**, proviseur du lycée agricole Xavier Bernard de Venours  
**Jean-Marc CHABOSSEAU**, président du centre Inra Poitou-Charentes  
**Luc SERVANT**, président de la Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes

10h - 10h30

Etat des lieux régional sur l'eau souterraine en qualité et quantité

Animateur : Luc Servant

Francis BICHOT, BRGM Poitou-Charentes

Echange

10h30 - 11h40

Diagnostiquer les risques de fuite de nitrates dans les systèmes

Animateur : Jean-Luc Fort

- Un modèle opérationnel pour le diagnostic des émissions de nitrate aux champs

Virginie PARNAUDEAU, Inra Rennes  
 Raymond REAU, Inra Grignon

- Témoignage d'un utilisateur de l'outil sur le bassin de la Corbelière

Mathieu GUIBERTEAU, Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres

Débat

11h40 - 12h50

Eau et produits phytosanitaires

Animateur : Philippe BLONDEAU

- Risques de transferts des produits phytosanitaires et leviers d'action en argilo-calcaire et en limons hydromorphes

Céline DRILLAUD, Arvalis

- Mélange de variétés et variétés économes en intrants : quelles solutions apportent la génétique et les choix variétaux ?

Jérôme ENJALBERT, INRA Versailles

Débat

13h - 14h30

Repas

## EAU - QUANTITÉ

Des plantes qui résistent à la sécheresse

14h30 - 15h45

Animateur : Jean-Marc Chabosseau

- Les besoins en eau et l'introduction de la génétique

Jean-Louis DURAND, Inra Lusignan

- Adaptation à la sécheresse du maïs, du tournesol et des prairies

Marc GHESQUIERE, Inra Lusignan, Claude WELCKER, Inra Montpellier et Nicolas LANGLADE, Inra Toulouse

Débat

Une irrigation économe et efficiente

15h45 - 16h45

Animateur : Luc Servant

- Des systèmes irrigués doublement performants à l'échelle de l'exploitation : test et évaluation de systèmes de culture économes en eau et en intrants

Bruno SYLVESTRE, agriculteur en Charente

Sébastien MINETTE, Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes

Débat

16h45 - 17h

Conclusion

Luc SERVANT, président de la Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes.

# Les eaux souterraines de Poitou-Charentes Etat des lieux en quantité et en qualité

Francis BICHOT

Directeur régional du BRGM Poitou-Charentes

Courriel : f.bichot@brgm.fr

## Résumé

Du fait de sa situation géologique sur un seuil entre deux massifs cristallins et deux bassins sédimentaires, la région Poitou-Charentes est naturellement mal dotée en matière de réserves d'eau en été. Les nappes de part et d'autre du seuil du Poitou sont en général peu profondes et très vulnérables aux pollutions de surface. Il en découle un impact important des prélèvements pour l'agriculture sur les débits estivaux des rivières. Si l'on peut en conclure que la ressource est surexploitée au printemps/été, elle n'est pour l'instant pas menacée sur le long terme. Elle se renouvelle d'une année sur l'autre. En revanche les eaux souterraines sont globalement très dégradées qualitativement, en particulier vis-à-vis des nitrates et des pesticides. C'est vraisemblablement là le principal problème, d'autant plus qu'il n'y a pas de solution facile à mettre en œuvre, du moins à moyen terme.

**Mots-clés :** Eau souterraine, Poitou-Charentes, aquifère, prélèvement, irrigation, cours d'eau, qualité des nappes souterraines, nitrates, pesticides.

## 1. Le contexte hydrogéologique général

Située en climat à influence océanique, la région Poitou-Charentes voit tomber chaque année en moyenne 800 mm d'eau. Le milieu souterrain constitue une étape dans le cycle de transit de cette eau vers l'océan. La nature du sous-sol conditionne l'importance et la durée de ces transits souterrains. Il en découle une typologie des systèmes aquifères qui sont, de part et d'autre du seuil du Poitou, en continuité avec le réseau hydrographique superficiel.

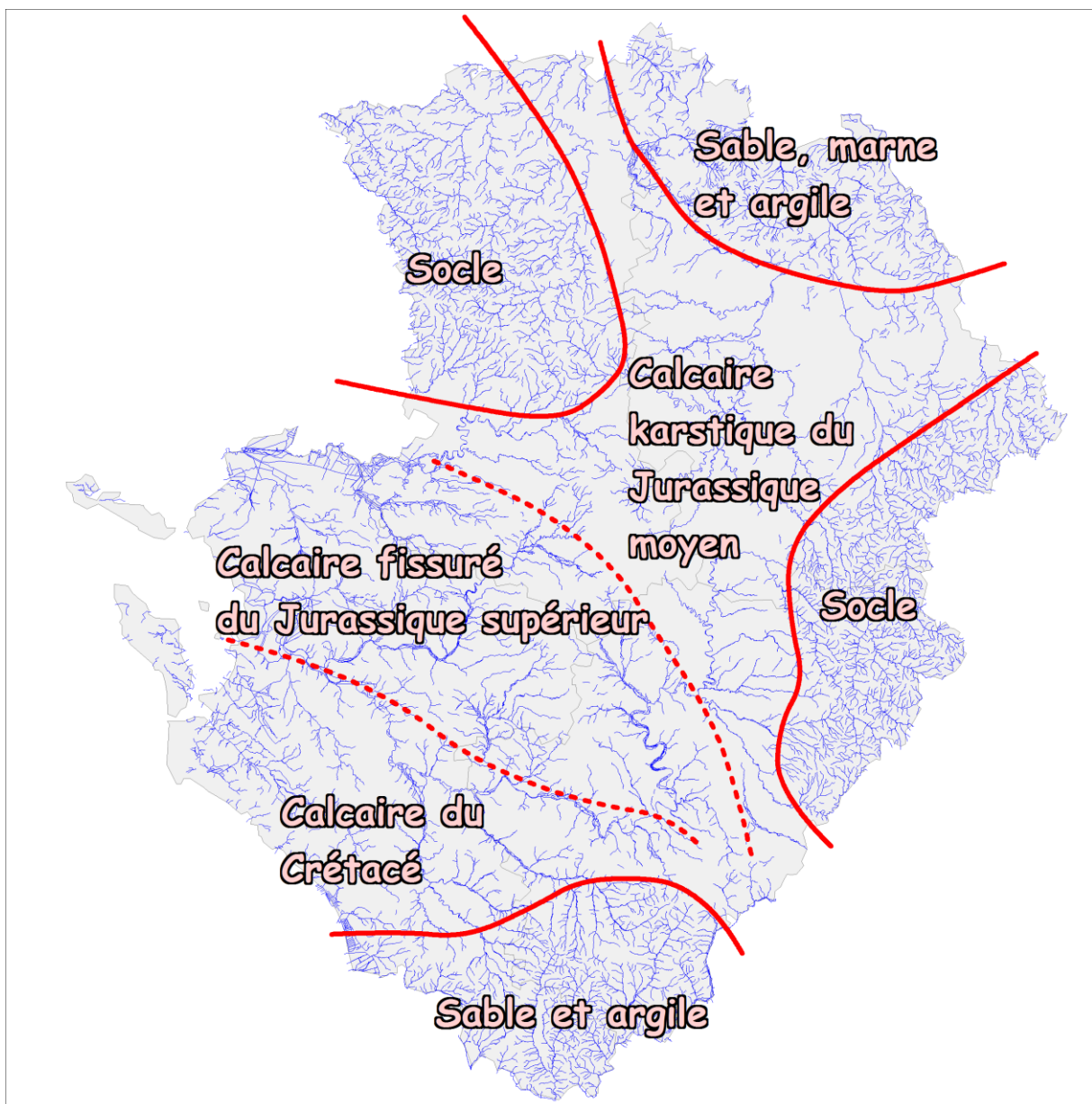
Les eaux souterraines, indispensables à l'homme et à son milieu, constituent d'importantes problématiques à forts enjeux. Exploitées en région Poitou-Charentes par environ 10 000 forages, pour les besoins de l'agriculture, de l'eau potable, de l'industrie ou pour des usages domestiques, elles sont également la principale source d'alimentation des rivières pendant l'été et jouent un rôle prépondérant pour les zones humides et les activités économiques littorales.

La région Poitou-Charentes occupe une situation de seuil géologique entre deux grands massifs anciens (armoricaïn et central) et deux bassins sédimentaires (parisien et aquitain). Cette position particulière implique, de part et d'autre du Seuil du Poitou, des bassins versants hydrographiques de petites dimensions avec des cours d'eau non alimentés par des massifs montagneux comme la plupart des grands bassins versants français. Il en résulte une rareté de la ressource en eau en été. De ce fait, la forte exploitation de ces ressources pour l'irrigation rentre en conflit avec les autres usages des eaux souterraines (alimentation en eau potable) et

des rivières (pêche, tourisme...), d'où une forte implication des pouvoirs publics et des politiques dans la gestion de l'eau qui apparaît comme l'une des premières priorités régionales.

La forte pression agricole engendre une dégradation de la qualité des eaux souterraines, d'où la nécessité de mettre en place des politiques de protection rappelées par les directives européennes.

Les eaux souterraines, qui alimentent les rivières et la mer, ont aussi un impact sur les activités littorales, en particulier l'ostréiculture et la mytiliculture, et alimentent d'autres usages comme la géothermie, avec un potentiel important et peu valorisé en région Poitou-Charentes, et le thermalisme. Notons aussi la forte implication des eaux souterraines dans les phénomènes d'inondation.



**Figure 1 : Relation entre la densité du réseau hydrographique, la nature du sous-sol et le type de nappe souterraine**

## 2. Des eaux souterraines d'une grande variété

La cartographie du réseau hydrographique reflète bien les relations entre les nappes et les rivières (figure 1). Sur le socle granitique ou schisteux, le ruissellement est prépondérant et le réseau est très dense ; il en est de même sur les formations sablo-argileuses du Crétacé supérieur/Tertiaire en Nord-Vienne et du Tertiaire en Sud-Charentes. En revanche, les infiltrations et transferts souterrains sont majoritaires dans les calcaires du Jurassique et du Crétacé supérieur qui forment une grande partie de la région. Le réseau est toutefois un peu plus dense sur les calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé que sur ceux karstiques du Dogger.

### 2.1 Les aquifères de socle

Sur le socle Armoricaïn et du Massif Central, le réseau hydrographique traduit un bon drainage des eaux de pluie. Dans le sous-sol, la frange d'altération et de fracturation contient des nappes en général peu productives et peu profondes (inférieures à 50 m). Ces nappes circulent vers les rivières selon la topographie ; le bassin versant topographique correspond au bassin versant souterrain. Les cours d'eau réagissent rapidement à la pluviosité et les graphes hydrologiques montrent des crues et des décrues rapides avec peu de décalage par rapport aux épisodes pluvieux. Les bassins versants concernés par ce type de substratum sont ceux de la Sèvre-Nantaise et du Thouet (pro-parte), des parties amont de l'Autize, de la Vienne, de la Gartempe, de la Creuse, de la Charente et de certains affluents du Clain.

### 2.2 Les aquifères des calcaires karstiques

Au-dessus du socle, dans les deux bassins sédimentaires, on trouve deux grands systèmes aquifères karstiques : l'Infra-Toarcien (Jurassique inférieur), à la base de l'empilement sédimentaire, et le Dogger (Jurassique moyen). Au Nord-Est d'Angoulême, le karst de la Rochefoucauld, au sein des calcaires du Jurassique moyen et supérieur, constitue l'un des plus importants systèmes karstiques de France. Dans le Cénomaniën et le Turonien-Coniacien des Charentes (Crétacé supérieur) on trouve également ce type d'aquifère.

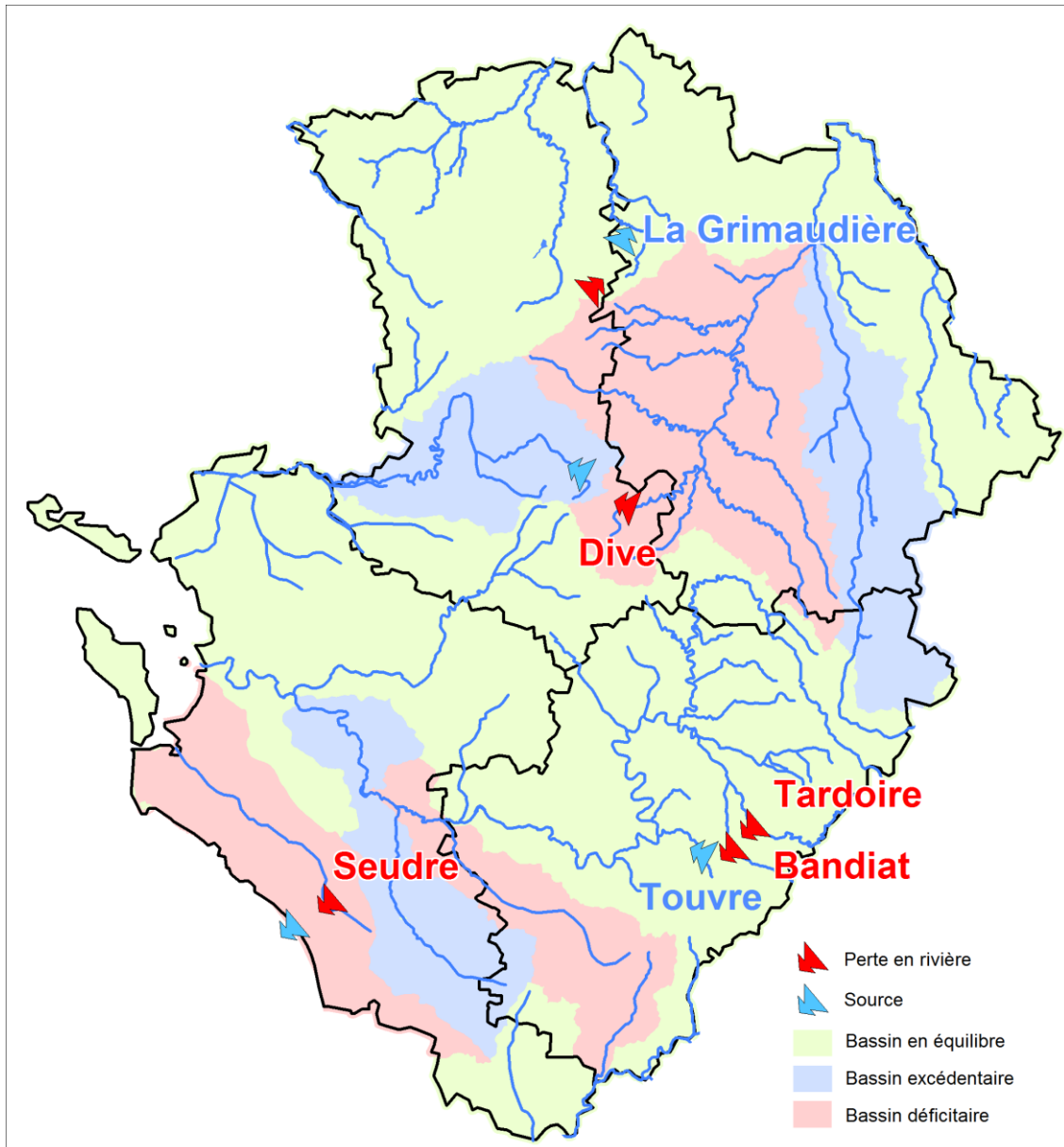
Dans ces zones karstiques, le réseau hydrographique est très peu dense, les circulations d'eau se font en souterrain avec des exutoires parfois très importants comme les Viviers à Niort et la Touvre près d'Angoulême. Les rivières peuvent se perdre complètement dans le karst comme c'est le cas pour la Dive du Sud et la Bouleure vers Lezay (en Deux-Sèvres), la Tardoire et le Bandiat (Est de la Charente), la Seudre près de Gémozac. Les bassins versants topographiques ne correspondent pas forcément aux bassins versants souterrains. Des transferts d'eau sont fréquents d'un bassin topographique à un autre. Ainsi le bassin hydrogéologique du Clain est moins étendu que son bassin topographique au profit de la Vienne et de la Sèvre-Niortaise. Il en découle des bassins versants de cours d'eau déficitaires du fait de la perte d'eau au profit de bassins excédentaires (figure 2).

### 2.3 Les aquifères des calcaires fissurés

Le troisième type de situation hydrogéologique correspond aux aquifères des calcaires fissurés. Le Jurassique supérieur, en général calcaréo-marneux et peu perméable, contient dans ses zones d'affleurement une nappe superficielle circulant dans une frange d'altération et de fissuration. L'épaisseur de cette frange est rarement supérieure à 30 m et sa base est

caractérisée par une couleur gris-bleu, le « banc bleu » des foreurs, qui matérialise l'absence d'eau contrairement à l'aquifère qui présente une couleur plutôt ocre (oxydation).

Les eaux circulent globalement vers la rivière selon la topographie, dans le réseau de fissures et de plans de stratification. Ce réservoir est peu capacitif (faible stock d'eau) mais assez fortement transmissif (perméabilité). Le régime des rivières traduit ces propriétés ; l'été, la nappe s'épuise rapidement, son niveau peut descendre au-dessous de celui de la rivière qui perd alors ses eaux à son profit, ce qui peut entraîner de sévères assecs ; l'hiver, la nappe se remplit rapidement et peut « déborder », d'où une tendance à l'inondation dans les zones basses lors de fortes pluies.



**Figure 2 : Transferts karstiques d'un bassin versant à un autre et bilan global des bassins versants entre la pluie qui tombe sur leur superficie et les débits qui s'écoulent à l'aval.**

Les bassins versants principalement concernés sont la Pallu, les Dives du Nord et du Sud, le Mignon-Courance, le Curé, l'Aume-Couture, l'Antenne, la Boutonne, la Gère et la Devise. Dans ces bassins versants, les prélèvements souvent importants (et peu profonds : les forages font quelques dizaines de mètres de profondeur) viennent aggraver une situation à l'étiage naturellement difficile.

## 2.4 Les aquifères des formations sableuses

Enfin, le dernier type d'aquifère correspond aux réservoirs à matrice sableuse. L'eau est contenue entre les grains de la matrice. Ces réservoirs sont fortement capacitifs mais en revanche peu transmissifs. L'espace inter-granulaire peut en effet emmagasiner beaucoup d'eau (le pourcentage de vide par rapport au plein peut dépasser 20 %), en revanche cette eau circule lentement. Comme d'importants volumes d'eau peuvent être stockés dans un faible volume de réservoir sableux, il faut des apports d'eau importants pour que le niveau de la nappe augmente de manière significative. Les graphes des piézomètres montrent en général des battements annuels faibles entre hautes et basses eaux. Le réseau hydrographique est dense sur un tel substratum. Par ailleurs, le débit des rivières est assez soutenu par ces nappes en période d'étiage. On rencontre principalement ce type de contexte au Nord de la région, dans le Bassin de Paris, sur le Cénomaniens, au Sud, dans le Bassin aquitain, sur les formations sablo-argileuses du Tertiaire. Dans les vallées, les placages alluviaux sont formés par des sables et des graviers plus ou moins argileux qui renferment également ce type de nappe.

## 3. Des eaux vulnérables en quantité comme en qualité

Les relations entre eaux de surface et eaux souterraines entraînent la dégradation de la qualité de la plupart des aquifères. Les teneurs excessives en nitrates et pesticides (pollutions agricoles et urbaines) conduisent à l'abandon de nombreux ouvrages qui exploitent l'eau potable. Un récent inventaire du BRGM comptabilise plus de 410 captages abandonnés dans la région depuis 30 ans.

Le suivi de l'évolution des niveaux de l'eau dans les forages montre que les nappes se rechargent d'une année sur l'autre. Il n'y a pas, en règle générale pour les aquifères de la région, d'évolution sur le long terme, avec une baisse progressive des niveaux, mais des cycles annuels avec une rareté de la ressource en été.

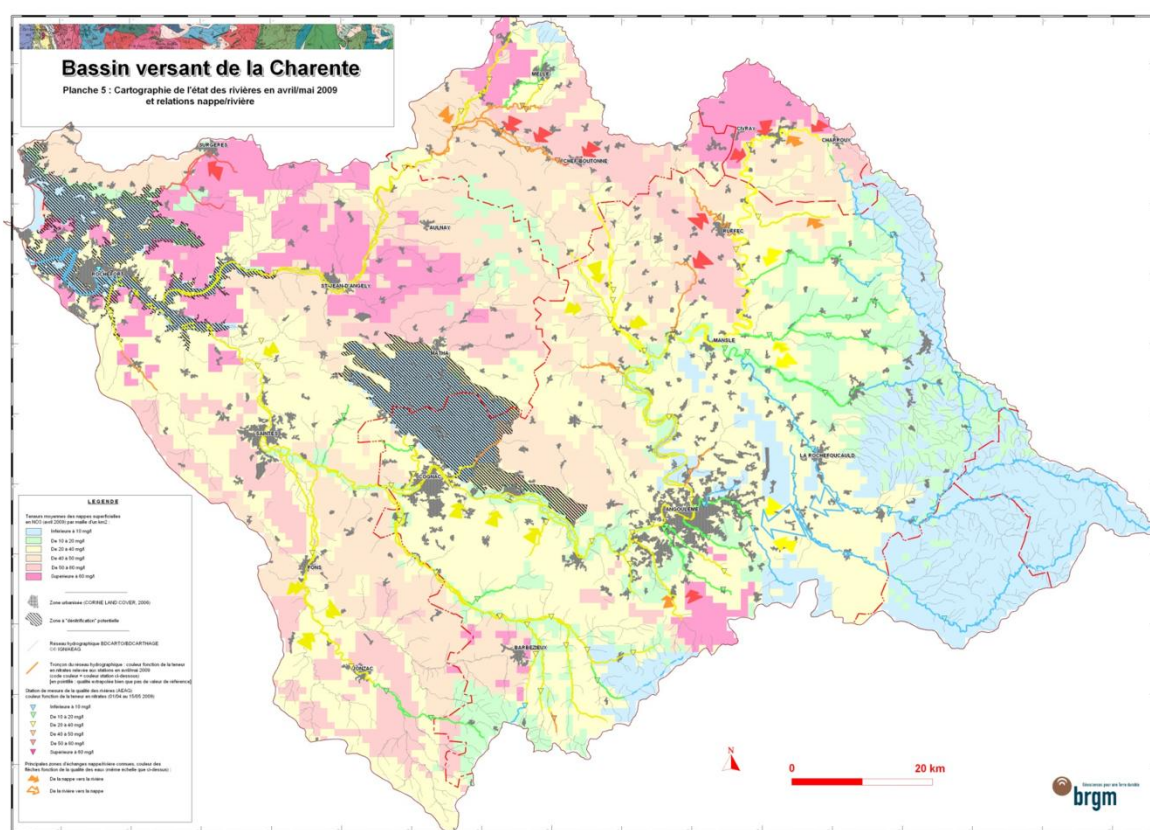
Il existe toutefois dans les parties les plus profondes des deux bassins sédimentaires des nappes captives, protégées de la surface mais en contrepartie plus difficilement renouvelées et leur exploitation peut entraîner des baisses progressives de leur niveau. Ces eaux sont en général anciennes (plusieurs dizaines de milliers d'années) et sont très minéralisées, donc « non-potables », et à température élevée.

### 3.1 La qualité des nappes vis-à-vis des nitrates

En ce qui concerne les eaux souterraines et selon le bilan 2012 du réseau qualité, il apparaît que l'ensemble des nappes libres (première nappe rencontrée en profondeur), sauf quelques exceptions, sont contaminées par les nitrates. Les secteurs géographiques assez bien « préservés » sont situés, en dehors des faciès salés littoraux (impact des eaux marines) et des nappes captives naturellement protégées, surtout dans la partie méridionale des Charentes, peu

agricole. La carte de la figure 3 présente un état des lieux réalisé en avril 2009 sur le bassin de la Charente. Plusieurs zones présentent de fortes teneurs en nitrates (supérieures à la norme pour l'eau potable de 50 mg/l, et ceci depuis plus de 20 ans) dans les eaux souterraines : le Civraisien, le Nord-Boutonne, les bassins de la Gère et de la Devise, le Sud d'Angoulême. En revanche, la partie orientale amont du bassin de la Charente est assez préservée. Il passe toutefois plus de 4 500 tonnes d'azote par an aux sources de la Touvre (Est d'Angoulême).

D'une manière générale, après avoir légèrement diminué entre 2001 et 2005, les teneurs en nitrates ont légèrement augmenté ensuite pour se stabiliser depuis 2007. Ceci s'explique surtout par l'absence de recharge en 2004/2005 (années particulièrement sèches) suivie par la reprise des lessivages au printemps 2006. La nappe du Jurassique supérieur reste la plus contaminée (50 mg/l en moyenne), suivie de la nappe du jurassique moyen (40 mg/l environ) et du Crétacé supérieur (30 mg/l).



**Figure 3 : Etat des lieux des nappes les plus superficielles sur le bassin de la Charente (déborde en 24 et 87) en avril 2009. Comparaison avec l'état des rivières.**

### 3.2 La qualité des nappes vis-à-vis des pesticides

Pour les pesticides, la contamination des eaux souterraines est principalement liée à la présence du groupe d'herbicides des triazines et plus ponctuellement à certaines urées substituées. Les teneurs en atrazine, simazine, terbuthylazine montrent une baisse significative depuis 2003 (année de retrait du marché) alors que celles des métabolites (atrazine déséthyl, atrazine déisopropyl, hydroxy-atrazine) restent relativement stables à l'échelle régionale. D'autres substances, toujours autorisées en 2009, sont détectées de manière plus épisodique, en particulier le métolachlore, l'isoproturon, le chlortoluron. Quant au glyphosate et à son

produit de dégradation directe l'AMPA, ils ne sont pas ou peu retrouvés dans les eaux souterraines alors qu'ils figurent parmi les substances les plus fréquentes dans les eaux de surface.

En ce qui concerne les eaux distribuées pour la consommation humaine, donc après traitement, aucune unité de distribution n'a été desservie en 2010 par une eau contenant plus de 50 mg/l de nitrates, si ce n'est des dépassements occasionnels. Les dépassements des normes en matière de pesticides restent aussi exceptionnels et liés à des dysfonctionnements des dispositifs de traitement.

## 4. Conclusion

En matière de quantité d'eau, il n'y a pas dans la région de problème sur le long terme, la ressource souterraine se renouvelant d'une année sur l'autre, en dehors des années exceptionnelles sans recharge hivernale comme 2004/2005. Mais il n'y a pas non plus de réserves importantes dans les nappes pour alimenter suffisamment les rivières en été, d'où d'importants linéaires de cours d'eau à sec.

Cette situation naturellement déficitaire en été est amplifiée par les prélèvements en particulier pour l'irrigation. Du fait de conflits d'usage entre les prélèvements pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable et le débit des rivières, on ne peut donc pas dire qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource dans certains bassins ; d'où la nécessité d'avoir une gestion rigoureuse et fine de la ressource, basée sur des objectifs en cohérence avec le fonctionnement des bassins versants.

En dehors de la gestion conjoncturelle, il est aussi important d'envisager une gestion « structurelle » de la ressource pour ne pas d'une part amplifier le déficit en eau (suppression de zones humides qui jouent le rôle « d'éponge », suppression de seuils sans mesurer leur impact sur le stock d'eau dans la nappe, drainage des terres...) et d'autre part « améliorer » le cycle de l'eau en conservant des stocks d'eau pour l'été (stockage artificiel, recharge artificielle des nappes, création de zones humides...).

La qualité des eaux, en particulier souterraines, apparaît comme plus problématique que les aspects quantitatifs car les solutions éventuelles sont plus difficiles à mettre en œuvre. La ressource souterraine, globalement peu profonde, est très vulnérable aux pollutions. La qualité des eaux est le plus souvent (très) dégradée posant de gros problèmes à la production d'eau potable, nécessitant soit des mélanges d'eau (comme en Vienne entre la nappe du Dogger et celle de l'Infra-Toarcien protégée), soit des traitements coûteux. Réflexions sur les pratiques, communication vis-à-vis des exploitants agricoles, actions renforcées sur les zones les plus vulnérables... sont autant de pistes à explorer.





# Un modèle opérationnel pour le diagnostic des émissions de nitrate aux champs

Virginie PARNAUDEAU<sup>1</sup>, Raymond REAU<sup>1</sup>, Pascal DUBRULLE<sup>1</sup>,  
Aurélien DUPONT<sup>1</sup>, Blandine ROBERT<sup>1,2</sup>

Affiliation : <sup>1</sup> Inra, Département Environnement et agronomie ; <sup>2</sup> Isara

Courriel : virginie.parnaudeau@rennes.inra.fr

## Résumé

Identifier des systèmes de culture qui émettent peu de nitrate vers l'eau est un enjeu partagé par l'agriculture et la société en général. Afin de développer le diagnostic des pertes d'azote qui permettrait cela, l'outil Syst'N a été conçu au sein du Réseau mixte technologique Fertilisation et environnement pour les animateurs du développement agricole et de l'environnement, impliqués dans la gestion de l'azote. C'est un logiciel incluant un modèle dynamique, qui permet de calculer les flux d'azote dans les parcelles agricoles, à l'échelle pluriannuelle. Les résultats sont les pertes de nitrate et d'azote gazeux générées par les différents champs, en fonction du sol, du système de culture et du climat.

**Mots-clés** : Nitrate, systèmes de culture, eau, diagnostic

## Introduction : enjeux de la gestion de l'azote

La gestion du cycle de l'azote dans les systèmes de production agricole se trouve au cœur d'enjeux d'actualité (environnement, santé, consommation d'énergie), et notamment celui de la qualité de l'eau. Dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, l'utilisation d'engrais azotés de synthèse a permis un accroissement de la production agricole mais a également généré une augmentation des émissions d'azote vers l'environnement (Sutton et al. 2011). Ces émissions d'azote représentent un coût pour la société, et sont aussi une perte directe, et donc un coût économique, pour les exploitations agricoles. Optimiser l'utilisation de l'azote disponible dans les sols en favorisant notamment son recyclage, est devenu un enjeu majeur, à la croisée des enjeux de la production agricole et des préoccupations de la société, dont la qualité de l'eau est emblématique.

Or, pour obtenir de faibles pertes d'azote et de faibles impacts, la seule maîtrise de la fertilisation azotée des cultures, aussi raisonnée soit-elle, est devenue insuffisante. Les diagnostics à l'échelle de chaque culture et de chaque année ne suffisent pas non plus, car la dynamique de l'azote dans les parcelles est dépendante des interactions entre les cultures successives (effet précédent et effet suivant) et certains processus ont lieu sur plusieurs années, comme par exemple la minéralisation des matières organiques apportées à la parcelle.

## 1. Le diagnostic des pertes de nitrate aux champs

Identifier des modes de conduite dans les systèmes générant de faibles pertes d'azote implique de comprendre la dynamique des pertes à l'échelle pluriannuelle, ce qui génère les pertes et d'identifier les leviers d'action possibles, via un diagnostic des pertes. Devant la variabilité des pertes suivant les systèmes de culture, les sols et le climat, et la difficulté d'extrapoler simplement les rares résultats expérimentaux disponibles, des outils de diagnostic ont été demandés par des praticiens impliqués dans la gestion de l'azote et l'environnement comme les animateurs des Chambres d'agriculture, des opérations Fertimieux ou des bassins versants, etc. Face à l'absence d'outils disponibles correspondant à leur cahier des charges, ces praticiens ont utilisé des outils tels que le bilan, la gestion de l'interculture par le Corpen, les grilles de risque Fertimieux, ou une palette de variables simples comme la dose d'azote, le nombre d'apports, le pourcentage de sol nu, en se rendant rapidement compte de l'importance de quantifier plus directement ces pertes pour faciliter et objectiver la hiérarchie des risques entre parcelles, comme pour réaliser des estimations globales à l'échelle d'une rotation ou d'un assolement. De fait, ces outils conduisaient avant tout à réaliser des diagnostics de la pression en azote.

Depuis deux décennies se sont développés des indicateurs plus complexes. Des outils comme l'indicateur  $I_N$  de *Indigo* ou *DEAC* sont parfois utilisés par les praticiens pour estimer les pertes de nitrates dans les systèmes de culture courants. Enfin, il existe différents modèles dynamiques permettant de restituer les flux d'azote dans les parcelles cultivées (Cannavo et al. 2008). Si ces outils permettent d'envisager de passer de diagnostics de pression à des diagnostics d'émissions vers l'eau ou l'air, des améliorations – voire des changements de paradigme – restent nécessaires afin qu'ils puissent être appropriés et utilisés par les praticiens et porteurs d'enjeux (McCown, 2002a, McCown, 2002b). Pour pallier le manque d'outils opérationnels et adaptés à l'échelle pluriannuelle du système de culture, permettant de prédire les fuites d'azote sous différentes formes (nitrate vers les eaux, ammoniac et protoxyde d'azote vers l'atmosphère), le RMT Fertilisation et environnement a donc entrepris de contribuer au diagnostic des pertes d'azote en construisant l'outil Syst'N, dans le cadre du projet Azosystem, qui regroupe l'Inra et huit instituts techniques agricoles (Acta, Arvalis, Cetiom, CTIFL, Idele, Ifip, Itavi, ITB).

## 2. Syst'N, un outil de diagnostic opérationnel et convivial

L'outil Syst'N est un logiciel composé de deux entités :

- une base de données appelée « Pertazote » qui stocke et structure des résultats de pertes d'azote au champ, obtenus par mesure ou par simulation. Cette base n'est pas encore fonctionnelle mais permettra à terme aux usagers d'obtenir des résultats de pertes d'azote dans des systèmes qui les intéressent, par simple requête.
- un simulateur qui calcule les pertes d'azote grâce à un modèle du cycle de l'azote qui simule les flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère à l'échelle spatiale de la parcelle, de façon dynamique, au pas de temps journalier.

L'outil comprend en outre une Interface homme-machine (IHM) conviviale permettant de saisir les données d'entrée (Figure 1). Elle inclut des données par défaut et permet la comparaison de différents systèmes de culture et la prise en compte de la variabilité du climat. Afin de faciliter l'activité des utilisateurs, une base de référence propose une description de

sols régionaux et de systèmes de culture existants. Chaque dossier de simulation décrit le système de culture dans son contexte, *via* une arborescence située dans la partie gauche en haut de l'écran. Il comprend :

- la description du sol,
- l'histoire de la parcelle,
- la succession des cultures,
- l'itinéraire technique de chaque culture, décrit sous la forme d'une suite d'interventions culturales (fertilisation organique et minérale, travail du sol, irrigation, pâture, fauche, culture intermédiaire).



**Figure 1 : Interface de saisie des entrées de Syst'N : écran de description de la fertilisation minérale du colza dans un système de culture.**

Une IHM de sortie permet d'estimer, de comprendre, d'expliquer les pertes de nitrate et de réaliser des diagnostics. L'utilisateur peut visualiser en premier lieu un bilan d'azote moyenné sur l'ensemble de la rotation et exprimé en kg d'azote par hectare et par an, qui est mis en regard des pertes calculées par le simulateur, exprimées dans les mêmes unités. Dans les deux écrans suivants, l'utilisateur visualise les pertes d'azote sous les différentes formes tout au long de la rotation à un grain plus fin : trimestre par trimestre, ou au long de la succession s'il souhaite prendre en compte la variabilité interannuelle.

### 3. Un modèle simulant les pertes d'azote au champ

Le simulateur est ainsi basé sur un modèle dynamique de simulation des flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère, fonctionnant à un pas de temps journalier, et permettant l'enchaînement de plusieurs années culturales. Il calcule les flux d'azote dans le sol et en direction des compartiments « eau » et « air », à partir des données d'entrée décrivant le climat, le sol et le système de culture. Une analyse bibliographique exhaustive a d'abord été réalisée afin de faire l'état de l'art des modèles et des outils disponibles pour estimer les pertes d'azote dans les sols cultivés (Cannavo et al. 2008). Sur cette base, nous avons sélectionné et assemblé des formalismes de modèles existants, utilisables pour une gamme large de systèmes de culture et de situations pédoclimatiques, et cohérents avec les données

d'entrée dont disposent les utilisateurs potentiels (Parnaudeau et al. 2001). Le modèle se compose de modules représentant les grands types de transformations ou de transferts de l'azote dans le système. Ces modules sont fondés sur des concepts et des formalismes issus de la bibliographie internationale, la plupart étant déjà utilisés dans des modèles adaptés aux conditions françaises. Les modules ont été sélectionnés avec l'objectif de conserver un niveau de complexité cohérent entre les différents modules, tout en intégrant des connaissances récentes sur les flux d'azote.

#### 4. Un modèle opérationnel... et ses limites

À ce jour, Syst'N est paramétré pour les grandes cultures suivantes : blé tendre, blé dur, orge, triticale, colza, tournesol, pois, maïs, prairies de graminées, et deux Cipan (Cultures intermédiaires piège à nitrate) : moutarde et ray-gras, ainsi que pour les repousses de colza. Il est en cours de paramétrage pour la betterave, la luzerne et les associations céréales-légumineuses. Afin de tester des rotations plus diversifiées ou des systèmes de cultures innovants, il est maintenant nécessaire de paramétrer de nouvelles cultures et de nouvelles Cipan. Si le modèle semble bien prendre en compte le fonctionnement des sols sans cailloux, certains milieux sont mal pris en compte actuellement : comme les sols caillouteux ; des améliorations pourraient être réalisées sur la base des résultats de travaux de recherche récents. Par ailleurs, le modèle ne prenant en compte que l'eau, l'azote, le rayonnement et la température dans la croissance de la culture, d'autres facteurs qui font obstacle à la croissance des cultures et donc à l'absorption d'azote ne sont pas considérés. On peut citer en exemple les maladies, ravageurs, et adventices, ou une mauvaise implantation des cultures. Il en résulte que le modèle peut surestimer l'azote absorbé et donc sous-estimer la quantité de nitrate restant dans le sol à la récolte, qui peut être lessivé.

#### Perspectives et conclusions

Depuis 2013, Syst'N est utilisé par des usagers « testeurs », travaillant essentiellement dans des aires d'alimentation de captage. Un exemple est rapporté lors du présent colloque dans l'article « Ellias : utilisation de Syst'N dans le cadre d'un programme Re sources » de M. Guiberteau. Une analyse des usages de l'outil est en cours, afin d'améliorer l'outil mais aussi et surtout de réfléchir aux améliorations à apporter à la méthode de diagnostic utilisant Syst'N. En effet, au-delà de la qualité des calculs de pertes d'azote eux-mêmes (voir §4), plusieurs éléments importants nécessitent des travaux supplémentaires pour que le diagnostic soit plus pertinent et mieux approprié par les acteurs du territoire : d'une part la dimension territoriale, à la fois en termes de description des systèmes de culture et des sols, mais aussi d'évaluation des pertes de nitrates (réflexion sur l'agrégation des résultats à l'échelle d'un captage par exemple). Et d'autre part le caractère pédagogique de la méthode, qui doit permettre de montrer l'effet de modifications de systèmes qui font sens pour les agriculteurs.

## Bibliographie

Cannavo P., Recous S., Parnaudeau V., Reau R. 2008. Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy* 97, 131-174.

McCown R.L. 2002a. Locating agricultural decision support systems in the troubled past and socio-technical complexity of 'models for management. *Agricultural systems* 74, 179-220.

McCown R.L. 2002b. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agricultural systems* 74, 179-220.

Parnaudeau, V., Reau, R., Dubrulle, P., et al. 2011. Designing a DSS to reduce nitrogen losses in cropping systems. Nitro Europe Conference: Nitrogen & Global Change, Edinburgh, UK.

Sutton et al. 2011. The European Nitrogen Assessment - Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, UK, 664 p.



# Ellias<sup>1</sup>

## Utilisation de Syst’N dans le cadre d’un programme Re-sources

Mathieu GUIBERTEAU

Chambre d’Agriculture des Deux-Sèvres

Courriel : mathieu.guiberteau@deux-sevres.chambagri.fr

### Résumé

En Deux-Sèvres, de nombreux captages d’eau potable ont été classés prioritaires Grenelle et bénéficient de programmes d’actions volontaires Re-sources pour l’amélioration de la qualité d’eau.

La Chambre d’agriculture des Deux-Sèvres est fortement impliquée depuis 2005 dans ces actions notamment sur le bassin versant de la Corbelière.

Dans le cadre d’un second programme de 5 ans, la Chambre d’agriculture a proposé au Sertad<sup>2</sup> d’intégrer une action d’étude sur la caractérisation des transferts de nitrates. Cette action dénommée Ellias a plusieurs objectifs :

- mettre en place un réseau de fermes référentes ;
- affiner la connaissance des niveaux de perte d’azote ; identifier les pratiques agricoles les plus contributives et les périodes les plus à risques ;
- modéliser les modifications de pratiques les plus efficaces pour limiter les transferts et proposer des solutions pour les limiter ;
- créer une dynamique avec les organismes de conseil et les agriculteurs.

Dès le départ, l’outil Syst’N a été identifié pour répondre aux problématiques de l’étude.

**Mots-clés :** Lixiviation nitrates – modélisation – Syst’N

### 1. Contexte de l’étude

Le captage de la Corbelière réalisé en eau superficielle dans la Sèvre Niortaise, présente un dépassement ponctuel des 50 mg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par litre avec une moyenne aux alentours de 45 mg/l.

Le milieu est très réactif à la pluviométrie, puisque le débit de la rivière et la teneur en nitrates évolue en moins d’une semaine après une pluie conséquente. Le lien est fort entre les pertes d’azote annuelles sous cultures et les flux de nitrates dans les eaux.

L’étude est menée sur un sous bassin prioritaire "le Pamproux" qui représente près de la moitié des apports d’eau avec un niveau de nitrates dépassant systématiquement les 60 mg/l.

---

<sup>1</sup> Ellias : Evaluer et limiter la lixiviation d’azote des agrosystèmes vers les eaux

<sup>2</sup> Sertad : Syndicat d’eau maître d’ouvrage des actions des programmes Re-sources sur le captage de la Corbelière



## 1.1 Un réseau de terrain

La démarche a été construite autour d'un réseau de fermes référentes (20 au total à la fin des 5 ans). D'une part pour collecter des itinéraires techniques, d'autre part pour créer une dynamique avec les agriculteurs et les organismes de conseil. Ces fermes sont identifiées pour être représentatives des différents agrosystèmes présents sur la zone d'étude. Un agrosystème étant défini par un système de culture (rotations et ITK) associé à un type de sol. Nous considérons ici que l'aspect climat est à peu près homogène et représenté par les données météo de la station Inra de Lusignan (est de la zone d'étude).

Pour chaque ferme, 2 à 5 situations ont été décrites avec pour chacune d'entre elle une parcelle sur laquelle un suivi technique est mis en place. Dans le cadre de ce suivi des mesures de reliquats azotés seront réalisés à trois périodes de l'année : Post récolte / entrée hiver / sortie hiver. Les données de ces mesures *in situ* seront comparées aux données de simulation.

## 1.2 Quelle utilisation de Syst'N ?

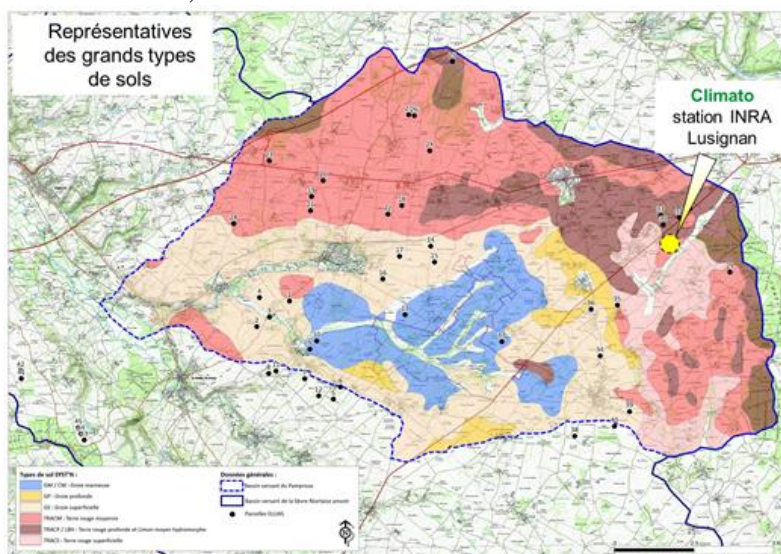
L'outil Syst'N sera utilisé au court de plusieurs phases :

- Phase 1 : simulation des pertes sur les agrosystèmes étudiés et comparaison avec des données observées.
- Phase 2 : Extrapolation à d'autres situations climatiques (au-delà des 5 ans).
- Phase 3 : Modélisation des changements de pratiques ou de systèmes.
- Phase 4 : Extrapolation à l'ensemble du bassin du Pamproux.
- Phase 5 : Comparaison des flux calculés avec les flux mesurés à l'exutoire.

## 2. Ellias : le déroulement

### 2.1 Création du réseau de fermes

L'action a débuté au printemps 2014 avec la mise en place du réseau de fermes : 12 exploitations ont été identifiées, soit 45 situations.



Trois nouvelles fermes seront intégrées chaque année en année 2 à 4. Le réseau sera composé en final de 60 à 80 situations. Les ITK<sup>3</sup> collectés sur 5 à 7 ans seront actualisés chaque année. Une analyse de sol a été réalisée sur les parcelles correspondant aux situations afin de définir le premier horizon de sol dans Syst'N. Les premières mesures de reliquats post récolte ont été réalisées début août 2014 puis un reliquat entrée hiver début novembre.

## 2.2 Premières simulations et premières problématiques

Une première simulation a été réalisée sur un système assez simple de monoculture de maïs irrigué sur "terre de groie". Le 1<sup>er</sup> horizon de 15 cm ayant été calé avec une analyse de sol, les horizons sous-jacents ont été paramétrés en fonction de la bibliographie sur les sols de même type.



Figure 2 : Simulation sur monoculture de maïs irrigué

Ce type de sol, identifié comme superficiel, a engendré plusieurs problématiques quant à sa caractérisation dans Syst'N.

Le premier facteur est le **taux de cailloux** par horizon. Le pourcentage de cailloux joue sur le volume de sol (et la rapidité de percolation) et donc sur la capacité de la plante à absorber l'azote et la disponibilité de l'eau : deux facteurs limitants de la croissance. De ce fait, un taux de cailloux trop important limite fortement la croissance du maïs (caractérisé notamment par son absorption d'azote) ce qui n'est pas le cas dans la réalité (rendements homogènes autour de 130 à 140 qx/ha).

De ce fait, plusieurs questions se posent :

- Quelle charge en cailloux définir dans chaque horizon ? (proportion de matériaux d'altération de la roche)
- Quelle propriété des cailloux (rétention eau) ?

Avec une question liée : Quelle profondeur d'obstacle à l'enracinement ?

---

<sup>3</sup> ITK : Itinéraire technique

Ces groies superficielles ont une teneur en argile du premier horizon variant entre 32% et 45%. Les horizons sous-jacents ont donc été caractérisés avec des teneurs en argile identiques voire supérieures. Les premiers résultats de simulation ont caractérisé un fort ruissellement, ce qui est rarement observé en réalité sur ces sols très filtrants. Syst'N se basant sur le triangle de texture pour caractériser notamment la variable Infil (infiltrabilité du sol), il s'est avéré qu'il y avait un effet de seuil à 36 % d'argile qui joue beaucoup sur cette variable.

Enfin, dans notre situation, les apports azotés sont réalisés sous forme d'urée non enfouie. Or les premiers résultats nous ont montré un niveau très important de perte de NH<sub>3</sub> par volatilisation. Dans Syst'N, l'urée n'a un coefficient d'efficacité que de 0.8. Si on apporte 200 kg il en est comptabilisé 160 kg. Ensuite 50% sont inclus dans le N du sol (80 kg) et 50% et mis à part comme potentiellement volatilisable. Cette perte atteint jusqu'à 80 kg par ha sur une semaine. La faible proportion d'azote restant dans le sol (40% de l'apport) engendre une limitation de croissance du maïs.

### 3. Perspectives, conclusion

Ces premières simulations nous ont montré que le paramétrage des données d'entrée est plus délicat qu'il n'y paraît, surtout en situation de sol à faible réserve utile. Il sera nécessaire d'affiner les paramétrages de chaque situation afin de s'assurer de ne pas partir sur des résultats biaisés qui seraient trop éloignés de la réalité.

Il est de ce fait nécessaire de reprogrammer l'action en privilégiant un temps conséquent au calage de tous les sols. Il pourra être envisagé de mettre en place un groupe d'experts et pourquoi pas de réaliser des fosses pédologiques en sol superficiel.

Il sera également plus judicieux de travailler par groupe de situations et d'analyser les résultats avant de passer à un autre groupe de situations.

Les premiers résultats de simulation seront mis en parallèle avec les premiers résultats de reliquats azotés.

Il pourra également être envisagé de mettre en place des essais sans fertilisation azotée sur certaines situations afin de caractériser un peu mieux les apports par minéralisation de l'azote du sol.

En conclusion, Syst'N est un outil "simple à utiliser", très convivial en termes d'interface de saisie et de visualisation des résultats. Cependant il nécessite des calages précis de nombreux paramètres de départ pour ne pas partir sur des résultats de simulation éloignés de la réalité.

### Bibliographie

*Cam.C., Chesseron.C., Ourzik.A.*, 1996, Carte des sols du département de la Vienne. Chambre d'agriculture de la Vienne.

*Cam.C., Fort J.L., Guiberteau M., Peloquin T., Blanchard L., Lopez D.*, 2011, Guide des sols pour l'amélioration de la qualité de l'eau – Projet Sol et Eau bassin versant du Pamproux.

*Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P.*, 2012, Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques* 21, 59-70

*Dussouillez C., Broadhurst M.*, Evaluation des flux d'azote à l'échelle du bassin versant de la Loue et modélisation des transferts. Design project Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Rapport. Chambre d'agriculture du Doubs.

*Fournel M.*, 2014, Intégration de l'outil Syst'N à la démarche BAC des captages de Lauduchy et de la Croix rouge à Briennon sur Armançon. Mémoire de fin d'étude Ingénieur Agrosup Dijon à la Chambre d'agriculture de l'Yonne.

# Les sites « qualité des eaux » du Magneraud et de la Jaillière : des dispositifs pour caractériser et quantifier les phénomènes de transferts des produits phytosanitaires sur une parcelle agricole

Céline DRILLAUD, ingénieur régional Poitou-Charentes

Anne-Monique Bodilis, Alain Dutertre, Jonathan Marks Perreau, Benoît Real - Arvalis - Institut du végétal

Arvalis, Institut du végétal, Station du Magneraud – 17 700 Saint Pierre d'Amilly  
Courriel : c.drillaud@arvalisinstitutduvegetal.fr

## Résumé

Les travaux de recherche sur la qualité de l'eau conduits sur les stations d'Arvalis – Institut du végétal du Magneraud (17) et de la Jaillière (44), permettent d'évaluer l'impact des pratiques culturales sur la qualité de l'eau. Ces dispositifs expérimentaux originaux permettent de mesurer les transferts d'eau dans deux milieux de sol différent, de comprendre les phénomènes et de caractériser les risques de transfert des produits phytosanitaires par infiltration, drainage et ruissellement et de dégager des solutions opérationnelles qui sont désormais déclinées sur le terrain dans différents outils de diagnostic et de préconisations adaptées.

## 1. Le dispositif « cases lysimétriques » du Magneraud et ses principaux résultats

Le dispositif « Pratiques culturales et qualité des eaux » conduit sur la station expérimentale Arvalis du Magneraud (Charente-Maritime), est implanté dans des terres de groie (argilo-calcaires caillouteux superficiels, développés à la surface de calcaires durs de l'étage géologique jurassique). Le dispositif se compose de 14 lysimètres ou cases lysimétriques, « ouverts », sans parois verticales et sans remaniement du sol qui permettent de mesurer les quantités d'eau percolées à travers le sol. L'eau collectée dite eau de percolation ou d'infiltration à la base d'une colonne de sol de 1 mètre d'épaisseur est recueillie. Elle est mesurée et échantillonnée en période d'excédent pluviométrique. Chaque lysimètre est intégré dans des parcelles de 60 m<sup>2</sup> cultivées avec du matériel agricole. Sur ce site, les eaux de percolation rejoignent une nappe souterraine située à environ 15 m de profondeur.

### 1.1 Certaines substances actives présentent des risques pour la qualité des eaux souterraines

Depuis 2000, 42 substances actives (SA) différentes dont 4 métabolites ont été recherchées dans les échantillons d'eau suite à des applications de produits phytosanitaires réalisées dans des conditions agricoles (soit près de 7000 analyses élémentaires). Sur ces 42 substances actives recherchées, 13 n'ont jamais été quantifiées. Pour les autres, les quantités transférées sont relativement faibles au regard des quantités appliquées. 3 SA sont fréquemment quantifiées et peuvent présenter des risques de transferts importants : la bentazone, le glyphosate et l'isoproturon.

## 1.2 Bentazone : une substance active à risque en terre de groie

Dans les argilo-calcaires du Magneraud, la bentazone est bien plus mobile que les autres SA utilisées. Les applications de bentazone au printemps peuvent engendrer des transferts importants avec des pics de concentration lors des écoulements après application notamment au cours de printemps humide. Des transferts peuvent également avoir lieu au cours de l'automne ou de l'hiver suivant l'application mais à des concentrations bien plus faibles.

## 1.3 Le glyphosate se dégrade mal en argilo-calcaire

Cette substance active dépasse très fréquemment le seuil de 0.1 µg/l dans les eaux de percolation du site du Magneraud et peut être quantifiée très longtemps après son application. Son métabolite, l'AMPA, est quant à lui peu transféré. Ainsi, le glyphosate se dégrade mal dans les groies du Magneraud. Plusieurs hypothèses sont en cours d'évaluation : complexification de cet herbicide anionique sur les carbonates du sol, ce qui le rend indisponible pour la dégradation microbienne ou fixation sur les ions métalliques du sol : cuivre, zinc, fer. Les transferts de cet herbicide sont, en tendance (mais non significativement) plus élevés lors des applications de fin d'été (où des fentes de retrait constituent des voies préférentielles de transfert en profondeur).

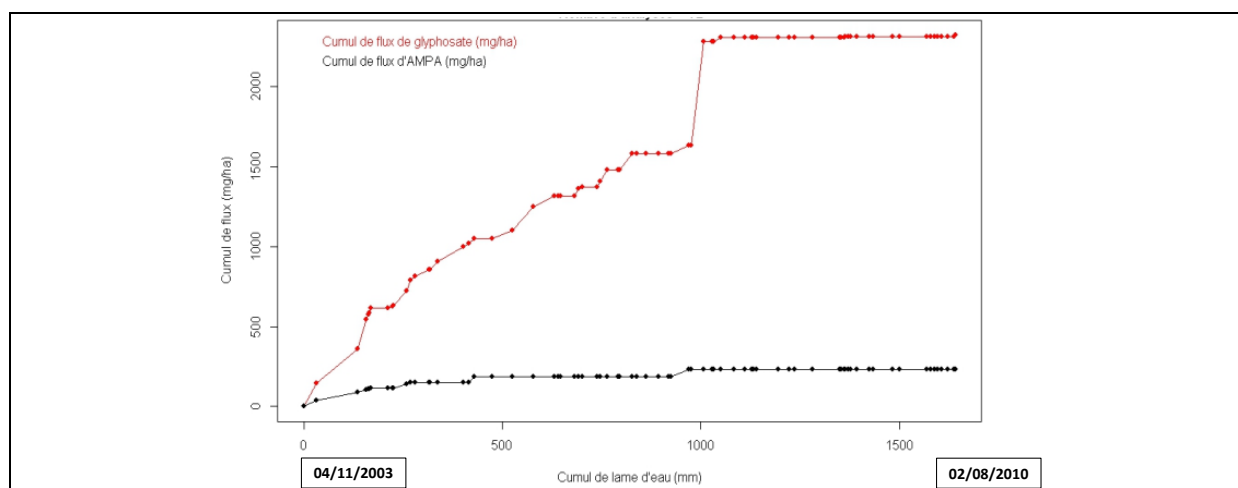


Figure 1 : Flux cumulé de glyphosate et d'AMPA suite une application le 06/10/2003 à 1080 g/ha - Analyses effectuées entre le 04/11/2003 et le 02/08/2010. Site du Magneraud

## 1.4 Des comportements différents en fonction du sol

Les résultats montrent que les mécanismes de transferts des produits phytosanitaires sont très dépendants du type de sol. Lors d'applications sur un sol saturé, les quantités d'isoproturon transférées sont beaucoup plus faibles en infiltration rapide (en argilo calcaire) qu'en drainage (sur sol limono-argileux hydromorphe) avec une dynamique de transfert différente. Autre exemple avec le diflufénicanil : alors qu'il est plus fréquemment quantifié sur les sols drainés, cet herbicide n'est presque jamais quantifié dans les eaux de percolations du Magneraud. Ce constat peut s'expliquer par les taux de matière organique et d'argile élevés dans les groies du Magneraud et le fait que l'infiltration de l'eau en hiver est lente au Magneraud.

## 1.5 Conclusions du dispositif des cases lysimétriques

La bentazone est la substance active qui transfère le plus dans les eaux de percolation des parcelles agricoles du Magneraud. L'utilisation de cet herbicide présente des risques environnementaux qu'il conviendra de raisonner tout particulièrement dans ces sols filtrants. Pour l'isoproturon, il est préférable d'appliquer cet herbicide très tôt en automne avant que la réserve utile des argilo-calcaires ne soit reconstituée. Les résultats acquis au Magneraud concernant le glyphosate montrent qu'il présente des risques de transfert importants dans les argilo-calcaires. Il conviendra de raisonner au mieux l'usage de cet herbicide dans ce type de sol et de recourir autant que possible aux méthodes alternatives et de substitution du glyphosate.

## 2. Le dispositif d'expérimentation de la Jaillière et ses principaux résultats

Le dispositif de l'expérimentation « Pratiques culturales et qualité des eaux » de la station expérimentale Arvalis de La Jaillière (Loire-Atlantique) est en sols de limons hydromorphes sur schistes, drainés ou non. Ce dispositif permet de mesurer les transferts d'eau et de solutés par drainage et par ruissellement et d'étudier l'effet des pratiques culturales sur le transfert des produits phytopharmaceutiques, afin de servir de base à la mise au point de techniques permettant de réduire les facteurs de risque de pollution des eaux superficielles. Le site comprend 11 parcelles instrumentées d'une superficie de 0,5 à 1 ha dont on collecte séparément les eaux de drainage et de ruissellement. Les débits des écoulements sont mesurés au pas de temps horaire. Pour une meilleure compréhension des transferts, un nombre important de variables explicatives ont été créées et analysées (relatives à l'hydrologie, à l'état hydrique du sol, à la pluviosité, aux pratiques culturales...). L'acquisition d'un grand nombre de données sur les transferts sur sols limono-argileux hydromorphes permet de conforter, par des analyses statistiques, l'analyse qualitative du comportement des produits étudiés et de préciser les conditions qui réduisent leurs transferts.

### 2.1 Les quantités de produits phytosanitaires susceptibles de quitter une parcelle sont très faibles

De 1994 à 2010, 80 substances actives (SA) dont 4 métabolites ont été suivies soit 13 884 analyses élémentaires dans les eaux de drainage et de ruissellement. Les quantités de produits susceptibles de quitter une parcelle sont très faibles au regard des quantités appliquées (quelques mg à quelques g/ha) mais peuvent ponctuellement provoquer des pics de concentration, préjudiciables à la production d'eau potable ou aux écosystèmes aquatiques. Sur les 80 SA suivies, 21 n'ont pas pu être quantifiées, une vingtaine seulement va au-delà du seuil de 2 µg/l à ne pas dépasser dans les eaux brutes destinées à la production d'eau potable. Ces dépassements surviennent à des fréquences en majorité inférieures à 10 % du seuil de 2 µg/l (contexte eau superficielle).

## 2.2 En milieu hydromorphe, les transferts sont plus importants en parcelle non drainée qu'en parcelle drainée

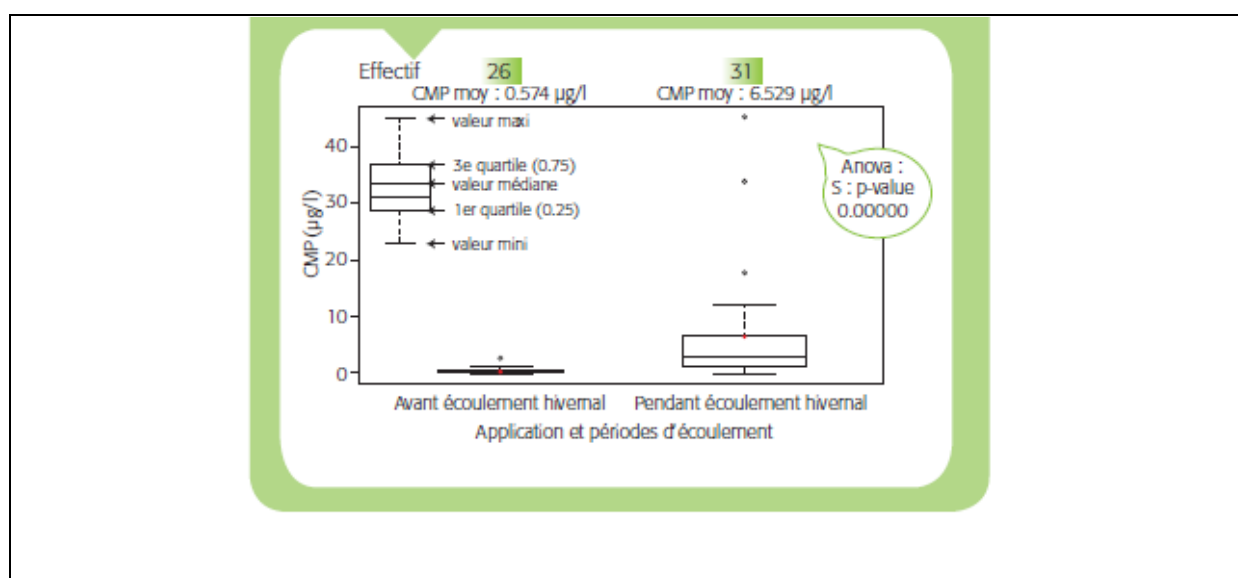
En parcelle non drainée, l'eau excédentaire s'évacue par ruissellement. Malgré des volumes écoulés plus faibles qu'en drainage, cette eau est plus chargée en matières en suspension, composées de particules de sol et de colloïdes organiques sur lesquels se fixent préférentiellement les résidus de produits phytosanitaires. Ce transport de MES par le ruissellement est la cause du transfert des produits phytosanitaires par les eaux circulant sur le sol.

## 2.3 Travail du sol : un impact différent selon la période d'application

Les transferts par drainage de produits mobiles appliqués à l'automne sont en tendance plus élevés en non labour qu'en labour (cas de l'isoproturon et du diflufenicanil par exemple). Ce phénomène peut s'expliquer par la présence de circuits préférentiels (fissures de sol, galeries de vers de terre non détruits par le travail du sol...) permettant des écoulements rapides vers les drains. En revanche, pour les produits appliqués au printemps, après saison de drainage, et susceptibles d'être encore transférés à l'automne qui suit, les transferts sont en tendance moins importants en non labour. Cela pourrait s'expliquer par une biodégradation plus rapide en sol non labouré du fait d'une concentration de la matière organique et de l'activité biologique dans l'horizon de surface.

## 2.4 Pour limiter les risques, appliquer les produits sensibles au transfert avant ou après la saison de drainage

Une application sur sol saturé en eau augmente la vitesse et le volume des transferts. Les SA appliquées en période d'écoulement (hiver) sont plus exposées au transfert que celles appliquées au printemps, hors saison de drainage. Ainsi, des traitements d'automne, sur un sol non saturé en eau, entraînent moins de transferts que ceux de février, en pleine saison de drainage.



**Figure 2 : Concentrations moyennes pondérées (CMP\*) en isoproturon relevées dans les eaux de drainage et de ruissellement des parcelles drainées selon la période d'application – Site de La Jaillière**

La réduction de dose, lorsqu'elle est possible, permet de réduire les transferts de certaines substances actives. L'intérêt de cette technique est d'autant plus marqué que les autres conditions sont réunies : absence de pluie les jours suivant le traitement, sol non saturé en eau. Opter pour un produit moins mobile lorsque c'est possible techniquement et économiquement. Le remplacement d'une molécule mobile par une autre moins mobile limite les transferts (figure 3). Dans cet exemple, l'utilisation du prosulfocarbe qui a un coefficient d'adsorption sur le complexe argilo-humique presque 14 fois plus élevé que celui de l'isoproturon, conduit à un flux dans les eaux de drainage environ 5 fois plus faible.

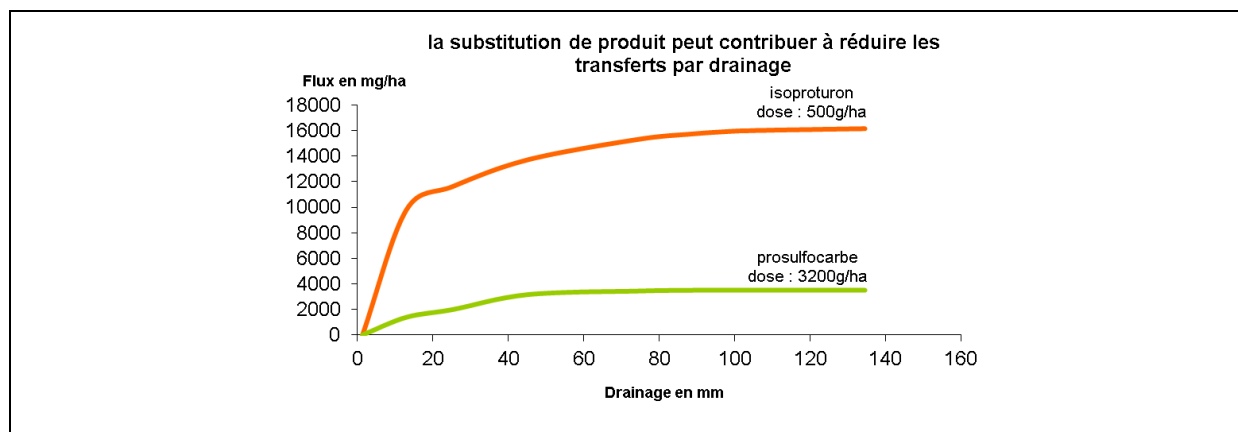


Figure 3 : Effet de la substitution de molécule sur les transferts par drainage – Site de La Jaillière

## 2.5 Installer des bandes enherbées pour piéger et épurer les eaux de ruissellement

En présence de ruissellement par refus d'infiltration (croûte de battance, tassement en surface...), les écoulements à la surface du sol peuvent être efficacement captés et épurés par l'installation d'une zone tampon. Plusieurs années d'expérimentation à la Jaillière et dans d'autres sites en France, ont mis en évidence l'efficacité des dispositifs enherbés pour ralentir et filtrer les eaux de ruissellement.

## 2.6 Perspectives, conclusion

L'objectif de ces études est avant tout de comprendre les mécanismes de transfert des produits phytosanitaires pour élaborer des stratégies de protection des plantes qui satisfassent les exigences de productions et de qualité, tout en préservant la qualité des eaux. L'analyse des données recueillies sur ces deux dispositifs confirme bien que ces transferts sont fortement liés au contexte pédo-climatique, et permet de faire des recommandations spécifiques et adaptées à chaque milieu pour améliorer la qualité des eaux. Par exemple, le décalage des dates d'application en dehors des périodes d'écoulement est pour certaines substances actives un fort levier pour diminuer les transferts sur les sols limono-argileux hydromorphes de l'Ouest de la France.

Arvalis - Institut du végétal dispose d'autres sites d'expérimentation « Pratiques culturales et qualité des eaux » situés dans des contextes pédoclimatiques différents. La diversité des



transferts mesurés, pour les mêmes substances sur des milieux différents, montre qu'il faut poursuivre ces études pour acquérir les connaissances indispensables à une préconisation pertinente à l'échelle régionale en fonction des types de sol et du climat. L'agrégation des connaissances acquises sur ces sites, traduites en règles de décision, enrichies de notre expertise et reposant sur les principes du Corpen, conduit à la formalisation de préconisations adaptées visant à réduire les impacts sur la ressource. Les solutions évoquées précédemment pour limiter les transferts renvoient aussi aux bonnes pratiques agricoles, au raisonnement des périodes d'application, à l'aménagement des parcelles et du paysage qui ont montré, à l'échelle de bassin versant, leur efficacité pour réduire la contamination des eaux.

# Associations variétales et variétés économes en intrants : quelles solutions apportent la génétique et les choix variétaux ?

Jérôme ENJALBERT

Inra, UMR de Génétique végétale, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette

Courriel : enjalbert@moulon.inra.fr

## Résumé

L'agriculture française est confrontée à la double contrainte de maintenir, voire augmenter ses productions, tout en transformant ses systèmes de production pour minimiser leur impact environnemental. La diversification des cultures est un des leviers clés identifiés pour permettre cette transition, et elle se décline à différentes échelles spatiales et temporelles dans le paysage agricole. Les associations variétales, qui maximisent la diversité à l'échelle de la parcelle et à l'intérieur d'une espèce cultivée, sont très rapidement mobilisables, et ont fait l'objet de nombreuses études par le passé. Sur la base de quelques exemples historiques chez les céréales, l'intérêt des associations variétales pour contrôler les maladies ou les adventices, ou encore augmenter l'efficacité d'utilisation de la lumière, de l'eau ou de l'azote sera discuté. L'adoption plus large des associations variétales en France soulève différentes questions scientifiques, mais doit surtout répondre aux principales contraintes présentes dans la filière blé.

**Mots-clés :** Associations variétales, mélanges, bas intrants, résistance aux maladies, compétition, facilitation, services écosystémiques

## 1. Les associations variétales, un élément dans la gestion de la biodiversité dans les agrosystèmes

Au cours du siècle dernier, l'agriculture a connu dans les pays développés un fort gain de productivité grâce à l'homogénéisation et l'utilisation intensive d'intrants. Ce modèle est remis en cause par les changements globaux et le besoin de s'orienter vers une agriculture plus durable. La diversification des cultures est un des leviers clés identifiés pour permettre une transition vers des systèmes de production plus respectueux de l'environnement. Cette diversification se réfléchit au niveau international, comme à une échelle la plus locale, de la diversité des espèces cultivées, à leur répartition sur les bassins de production. Elle se décline aussi à une échelle locale, l'exploitation agricole, ou la parcelle, avec l'implantation de cultures mixtes ou d'associations variétales. C'est à cette échelle que les changements les plus rapides peuvent être envisagés. Les associations variétales, qui maximisent la diversité à l'échelle de la parcelle et à l'intérieur d'une espèce cultivée, sont très rapidement mobilisables, et elles ont fait l'objet de nombreuses études par le passé, ainsi que de quelques succès historiques. D'abord étudiés par les phytopathologistes, ces associations variétales peuvent présenter d'autres avantages pour des systèmes de culture à bas niveaux d'intrants. Ces avantages sont abordés ci-après, en prenant exemple sur les céréales.

## 2. Les associations variétales pour contrôler les maladies

Étudiées essentiellement sous l'angle du contrôle des maladies, les associations variétales ont connu quelques succès par le passé, chez différentes céréales, mais aussi chez d'autres espèces (fruitiers notamment).

### 2.1. Quelques exemples historiques

L'un des exemples célèbres d'association variétale concerne l'orge, en ex-RDA. Face à l'intensité croissante des attaques d'oïdium observée dans les années 80 (jusqu'à 50 % d'incidence), le gouvernement d'Allemagne de l'Est a alors fortement incité la culture de variétés associées d'orge de printemps à l'échelle nationale. Plus de 90 % de la surface cultivée en orge ont ainsi été semés en associations variétales, et l'incidence de l'oïdium chuta au-dessous de 10 % (Mundt 2002). Cette diversification permet une réduction de l'utilisation de fongicides, alors qu'au même moment aucun changement de pression parasitaire n'était observé dans les pays voisins (qui n'avaient pas adopté une telle pratique). Un autre exemple spectaculaire concerne le riz en Chine, dans les années 2000. Dans la province du Yunnan, des milliers d'agriculteurs ont coopéré pour contrôler une maladie dominante localement : la pyriculariose. Si les variétés de riz blanc possèdent une bonne résistance génétique, les variétés traditionnelles de riz gluant, à forte valeur gustative et commerciale, sont elles très sensibles. L'association des deux variétés, grâce au repiquage alterné de rangs de riz gluant dans des parcelles à dominante de riz blanc, a permis de pratiquement éliminer les traitements fongicides, la sévérité de la maladie sur riz gluant passant à moins de 1 % (Zhu et al. 2000).



**Figure 1 : Repiquage en rang alterné de riz blanc (variété hybride courte et résistante à la pyriculariose) et de riz gluant (variété traditionnelle haute et sensible). Zhu et al. 2000.**

### 2.2. Effets de la diversité génétique intra-variétale sur le contrôle des épidémies

L'origine du contrôle des épidémies de certains agents pathogènes (champignons et bactéries phytopathogènes) par les associations variétales a été finement étudiée. La résistance se manifeste lorsque le mélange comporte une fréquence suffisante de variétés résistantes, du fait de trois mécanismes principaux (Finckh et al. 2000) :

- **L'effet de dilution** : les plantes sensibles sont en plus faible densité dans la parcelle, ce qui limite l'efficacité de propagation de la maladie ;
- **L'effet de barrière** : les plantes résistantes font écran et piègent les spores lors de leur dispersion, protégeant ainsi les plantes sensibles ;
- **L'effet de prémunition** : contrairement à une parcelle mono-variétale, qui ne va laisser se développer que les souches aptes à attaquer la variété, un mélange variétal héberge une plus grande diversité de souches, certaines ne se développant que sur quelques constituants du mélange. Lorsqu'une souche attaque une plante, et que cette variété possède les gènes de résistance qui lui correspondent (souche non virulente), alors la plante déclenche différentes réactions de défense, qui la protégeront des attaques ultérieures de souches virulentes, pour lesquelles elle ne possède pas de gènes de résistance spécifique.

Pour bénéficier de ces différents effets, il est important que la fréquence des plantes sensibles ne soit pas trop élevée, de l'ordre de 1/3 à 1/4 (Pope et al. 2004). Si les associations variétales peuvent avoir une forte efficacité dans le contrôle d'agents pathogènes dont l'explosion épidémique nécessite de nombreux cycles de multiplication dans la saison (rouilles oïdiums...), d'autres maladies ne sont que faiblement affectées par cette diversité génétique.

L'assemblage variétal permet également de construire un peuplement ayant une tolérance élevée à un plus grand nombre de maladies. Il est effectivement difficile de sélectionner sur de nombreux critères simultanément, et il est donc rare de trouver des variétés multi-résistantes. L'assemblage de variétés ayant des spectres de résistance complémentaires permet donc de compenser les défauts de certaines composantes, et ainsi autoriser des baisses significatives de traitements phytosanitaires.

L'Inra, et notamment l'équipe Bioger de C. de Vallavieille-Pope, a étudié ces différents mécanismes chez le blé par différentes approches expérimentales, et a également mis en place des évaluations chez les agriculteurs. Ces essais ont montré l'intérêt des associations variétales pour le contrôle des maladies, mais ont également révélé les effets positifs de cette diversité intra-parcellaire sur la qualité du grain, ou la stabilité du rendement (de Vallavieille-Pope et al. 2004).

### 3. Intérêt des associations variétales pour limiter l'usage d'autres intrants

#### 3.1. Contrôle des adventices

Chez les céréales, l'aptitude d'une variété à contrôler les adventices est très variable, ce qui s'explique à la fois par la précocité de développement et l'architecture aérienne et racinaire, qui déterminent l'aptitude à la compétition d'une plante avec ses voisines. Plus une plante colonise rapidement l'espace autour d'elle, plus elle nuit au développement de ses concurrentes. Un autre mécanisme important est l'émission au niveau des racines de molécules qui inhibent la croissance d'autres espèces (allélopathie), propriété également variable en fonction des variétés (Lammerts van Bueren et al. 2011).

Une étude récente a montré que les associations variétales d'orge contrôlaient plus efficacement les populations d'adventices, du fait d'un effet de complémentarité entre variétés (Schöb et al. 2014), alors que chez le blé il a également été proposé d'assembler des variétés ayant des aptitudes à la compétition différente, pour maîtriser les adventices (Kaut et al. 2009). Une méta-analyse centrée sur le blé et l'orge a confirmé l'importance de la diversité pour l'aptitude au contrôle des adventices pour expliquer la performance des associations variétales (Kiaer et al. 2009).

### 3.2. Utilisation de l'eau et de l'azote

L'intérêt des associations variétales pour mieux valoriser l'eau et différents nutriments du sol n'a pas fait l'objet d'étude à ce jour, bien qu'il soit évoqué pour expliquer certaines performances de mélange. Les difficultés d'exploration sont ici simplement liées à la nature souterraine des processus : l'étude des développements et architectures racinaires requiert des protocoles lourds et coûteux. Pourtant il est probable qu'une complémentarité des architectures racinaires soit possible, certaines variétés ayant des racines plongeantes, d'autres plus horizontales (racines plagiotropes/orthotropes), explorant ainsi des horizons différents. Une autre complémentarité pourrait provenir des interactions racines/micro-organismes (mycorhizes, bactéries), essentielles pour l'efficacité racinaire. Les variétés présentent une grande variabilité dans leur capacité à interagir/mobiliser les communautés du sol (Hetrick et al. 1993), et des interactions positives dans un réseau racinaire multi-variétal pourraient être envisagées.

### 3.3. Perspectives, conclusion

Au delà du contrôle des maladies, il est important de mieux explorer l'intérêt des associations variétales, notamment pour le contrôle des adventices et plus généralement l'efficacité d'utilisation de la lumière, de l'eau, et des nutriments. Malgré l'absence quasi complète de conseil agricole sur ces pratiques, de nombreux agriculteurs utilisent actuellement des associations variétales, pour réduire leur utilisation d'intrants ou pour limiter les risques d'accident de culture. Pour mieux évaluer les avantages potentiels des associations variétales, le projet Wheatamix ([www6.inra.fr/wheatamix](http://www6.inra.fr/wheatamix)) analyse un ensemble de services écosystémiques, et explore également les voies d'intégration de ces pratiques dans la filière blé française.

## Bibliographie

De Vallavieille-Pope C., Mille B., Belhadj Fraj M., Meynard JM. 2004. Intérêt des associations de variétés de blé pour diminuer les fongicides ; conséquence sur la filière. *Le Sélectionneur Français* 54 : 45–56.

Finckh M., Gacek E., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C., et al. 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* 20: 813–37.

Hetrick B., Wilson G., Cox T. 1993. Mycorrhizal Dependence of Modern Wheat Cultivars and Ancestors - a Synthesis. *Can J Bot-Rev Can Bot.* 71:512–528.1.

Kaut AHEE., Mason HE., Navabi A., O'Donovan JT., Spaner D. 2009. Performance and stability of performance of spring wheat variety mixtures in organic and conventional management systems in western Canada. *Journal of Agricultural Science*. 147:141-153.

Kiær LP., Skovgaard IM., Østergård H. 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. *Field Crops Research* 114 : 361–73.

Lammerts van Bueren ET., Jones SS., Tamm L., Murphy KM., Myers JR., Leifert C., et al. 2011. The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. *Wageningen Journal of Life Sciences* 58:193–205.

Mundt CC. 2002 Multiline Cultivars and Cultivar Mixtures for Disease Management. *Annual Review of Phytopathology* 40:381–410.

Schöb C., Kerle S., Karley AJ., Morcillo L., Pakeman RJ., Newton AC., et al. 2014. Intraspecific genetic diversity and composition modify species-level diversity-productivity relationships. *New Phytologist*, doi: 10.1111/nph.13043.



# Les besoins en eau des plantes et l'introduction de la génétique

Jean-Louis DURAND

Inra, Unité de recherches pluridisciplinaire sur la prairie et les plantes fourragères,  
86600 Lusignan.

Courriel : jean-louis.durand@lusignan.inra.fr

## Résumé

La sécheresse s'impose comme l'une de limitations de la production agricole les plus difficiles à combattre. Chez les espèces qui s'y exposent, le recours à l'irrigation reste, quand elle est possible, la méthode la plus efficace. Cependant, un travail constant en amélioration des plantes depuis près d'un siècle a permis des gains non négligeables en jouant sur plusieurs caractères de la plante concourant à l'élaboration du rendement. La recherche progresse sur tous les fronts en coordonnant l'exploitation raisonnée et systématique de l'ensemble des ressources génétiques avec l'analyse toujours plus fine de la physiologie des variations génétiques de la résistance à la sécheresse.

**Mots Clefs** : Réserve utile, racines, potentiel hydrique, surface foliaire, transpiration, conductance stomatique.

## 1. Introduction

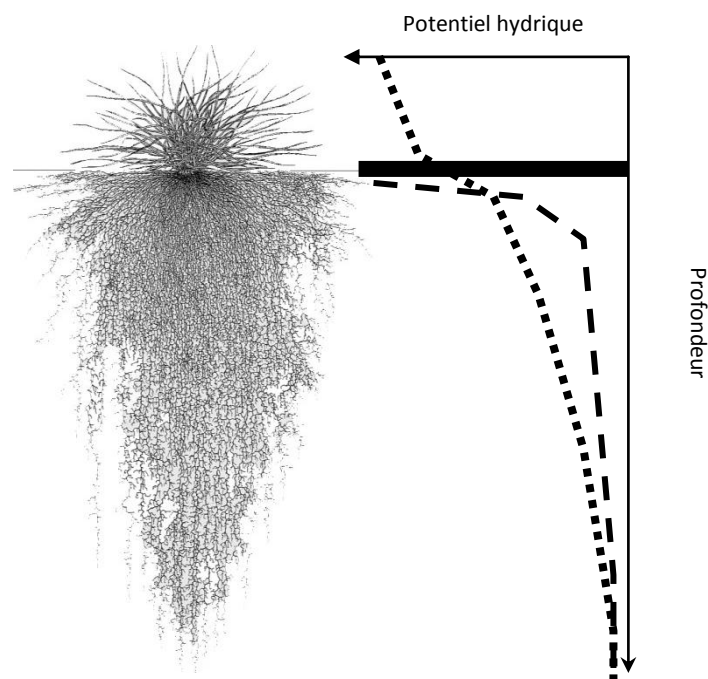
La sécheresse réduit fortement voire drastiquement la production de nombreuses cultures du Poitou-Charentes, à commencer bien entendu par les cultures d'été. Or, la plupart des cultures connaissent des périodes de déficit hydrique par rapport aux besoins de la plante, sur tout ou partie de leur cycle cultural. La situation ne fait que se détériorer avec le changement climatique (Levrault et al. 2010). Depuis très longtemps l'on cherche à améliorer la productivité de ces cultures à travers deux axes parfois complémentaires : l'irrigation (et la fertilisation) et l'amélioration génétique. En général et jusqu'à une période récente, l'irrigation visait à satisfaire le mieux possible les besoins de la plante. Ceux-ci sont déterminés par sa phénologie, le développement de sa surface foliaire d'une part et le climat d'autre part (rayonnement solaire, température et humidité de l'air et vent) d'autre part. Les calculs d'évapotranspiration potentielle (ET), absolument essentiels pour chiffrer les besoins et conduire les pratiques, sont désormais classiques et ne font plus guère l'objet de questions sinon secondairement sur l'épineux problème de la part évaporation du sol dans l'Evapotranspiration Réelle (ETR). Les calculs de doses d'irrigation dépendent alors du système d'irrigation, de l'état de développement de la culture et, secondairement, du type de sol. Plus récemment, il s'est avéré que certaines économies d'eau pouvaient être réalisées au détriment de la production de biomasse avec un moindre impact sur le rendement. Cette « irrigation déficitaire » a fait l'objet de recherches en arboriculture mais aussi sur les céréales. « Quand et combien apporter l'eau ? » sont ainsi les deux principales questions résolues depuis la fin du siècle dernier mais qui ne concernent qu'au plus 10 % des surfaces agricoles.

Parallèlement, et pour l'ensemble des surfaces, l'amélioration génétique de la production potentielle a permis l'accroissement régulier des rendements dans la région, progrès génétique



actuellement constant depuis les années 60 chez l'ensemble des cultures, y compris fourragères. Chez les céréales, ce progrès s'est toutefois accompagné d'un accroissement quasiment proportionnel des besoins en eau de la plante puisqu'il a principalement consisté à augmenter la durée de fonctionnement du couvert végétal. Cela s'est fait en gagnant sur la vitesse d'implantation au début et en retardant la sénescence des feuilles à la fin du cycle. C'est notamment sur les durées respectives des cycles végétatif et reproducteur que l'on a joué pour rendre la culture résistante à la sécheresse. L'amélioration a encore assez peu touché les phases sensibles de la production que constituent les périodes de floraison. Pour cela, il convient d'entrer davantage dans les détails de l'élaboration du rendement. C'est le rôle des travaux d'écophysiologie des cultures, de mieux en mieux intégrés à la recherche en génétique. Je développerai rapidement ce que ces travaux nous disent des besoins en eau aux différentes phases du cycle de production en général, et des conséquences de la variation de certains caractères sur le rendement en sec.

## 2. L'eau et la plante dans le champ cultivé



**Figure 1.** Représentation d'une plante de fétuque élevée sur un sol et du niveau de contrainte hydrique dans le sol (pointillés) et dans la plante (tirets). L'eau circule du sol vers la plante, de la zone la plus humide vers la plus sèche. D'après Durand, 2007.

### 2.1. Variabilité génétique de la réserve utile

La vie des plantes cultivées et leur niveau de production dépendent étroitement de la satisfaction du besoin de transpiration. Ce besoin est satisfait par l'eau du sol que collectent les racines à différentes profondeurs. Il est trop fréquent de ne voir dans la question de la réserve utile qu'une propriété physique du sol. Il n'en est rien. Si en effet, la texture et la structure du sol sont des propriétés physiques essentielles d'ailleurs bien connues, la réserve en eau de la plante dépend aussi et principalement de la pluviométrie et de la densité des racines, de leur étendue en profondeur tout spécialement. Sur ce dernier point, il existe une grande variabilité inter- et intra-spécifique de formes et de vitesse d'exploration du profil

cultural. Une racine pousse dans le sol à une vitesse à peine inférieure à la vitesse d'allongement d'une feuille et la réserve utile augmente sous la culture à mesure que ses besoins croissent. La variabilité génétique de la croissance racinaire entraîne ainsi des différences nettes en termes de réserve hydrique mais aussi de dynamique. Au moment où la sécheresse s'installe, la croissance des racines est généralement freinée (quoique de façon moins prononcée que celle des feuilles) et il existe aussi une certaine variabilité génétique dans la capacité des plantes à entretenir un système racinaire profond durant la sécheresse. Dans tous les cas, la position de la période sèche par rapport au cycle cultural est plus importante que l'intensité du stress lui-même (Vadez et al. 2014). Des phases sensibles sont repérées depuis longtemps chez les céréales (Robelin et Morizet, 1983), tandis que les sécheresses au début de la mise en place du feuillage sont bien connues pour affecter davantage les rendements que les sécheresses subies durant les fins de cycle.

## 2.2. Variabilité génétique de la transpiration

La transpiration dépend au premier ordre de la surface foliaire. Au point que parmi les plantes, les mieux adaptées sont celles qui développent de petites surfaces foliaires. Mais ces plantes sont par conséquent peu productives. En sorte que ce type d'adaptation est peu recherché en agriculture, sauf lorsque l'on cultive des plantes qui concentrent leur production sur les périodes non soumises à la sécheresse (par exemple les fourragères méditerranéennes). Dans les autres cas, les plantes résistantes sont celles qui optimisent la perte en eau par rapport au gain en matière sèche. La conductance stomatique joue alors un rôle important pour réduire la contrainte dans les tissus photosynthétiques. Il s'agit alors pour les régulations de résoudre le compromis entre l'ouverture des stomates qui provoque la soif (transpiration excessive) et leur fermeture qui engendre la faim (assimilation chlorophyllienne insuffisante).

## 2.3. Variabilité génétique de croissance nette sous stress

En cas de sécheresse, et quels que soient les progrès réalisés pour optimiser et affiner ces régulations qui maximisent l'offre (enracinement) et/ou minimisent les pertes (conductance stomatique), la plante subit de toute façon une altération de son état hydrique qui réduit immédiatement sa croissance. Or, on observe également de fortes variations génétiques dans la façon dont la plante réagit au même état hydrique.

Tout d'abord, la production de nouveaux tissus sous contrainte hydrique est variable génétiquement. Ainsi, toujours chez les graminées, on observe que la vitesse d'allongement des feuilles de ray-grass anglais se prolonge pour des états hydriques bien plus dégradés que chez la fétuque élevée ou le ray-grass d'Italie. De même le maïs offre-t-il une plage de variation importante à cet égard (Cf. exposé suivant). De plus, ces potentialités d'expansion cellulaire sous contrainte hydrique concernent les soies des fleurs, ce qui est à la base d'une variabilité génétique non négligeable de la résistance de la fertilité sous contrainte hydrique.

Par ailleurs, la mortalité des tissus sous l'effet de la sécheresse peut varier considérablement d'une espèce et surtout d'un génotype à l'autre. Par exemple, la sénescence des feuilles chez les ray-grass anglais est bien plus accélérée que chez les fétuques élevées. Toutes choses égales par ailleurs, certaines variétés conservent donc plus longtemps que d'autres des surfaces foliaires efficaces pour la photosynthèse. Les variantes *Staygreen* qui gardent leurs feuilles vertes et efficaces bien plus longtemps ont été décrites chez de nombreuses espèces de graminées (maïs, sorghos, graminées fourragères...). Au plan physiologique, le maintien de

surfaces opérationnelles fait parfois appel à des régulations osmotiques qui permettent aux feuilles de rester turgescentes alors que leur teneur en eau diminue.

### 3. Les méthodes de sélection pour la production estivale

Outre les méthodes de sélection classiques, deux voies sont explorées pour tenter d'accélérer le progrès génétique. D'une part, on cherche de plus en plus à réduire l'erreur liée à des comparaisons de performances faites entre des situations de sécheresses aux intensités trop différentes. Il s'agit de mieux caractériser la contrainte hydrique, soit directement, soit par des mesures de température de plante par exemple. Dans ce dernier cas, on utilise le fait qu'une



**Figure 2. Comparaison des enracinements de la variété de riz IR64 avec la même variété dans laquelle le gène DRO1- NL s'exprime davantage.**

plante qui sur un même terrain transpire davantage qu'une autre présentera des feuilles plus fraîches. Celles-ci émettent alors un rayonnement infrarouge différent, ce qui permet de les classer selon leur intensité transpiratoire et donc de rapporter leurs productivités respectives à l'accès à la ressource qu'elles ont. Aussi utiles que soient ces méthodes, croisées avec les méthodes modernes d'identification des génotypes au niveau de l'ADN, pour classer les plantes selon leurs performances en milieu sec, il restera encore à déterminer si ce meilleur état hydrique est lié à un système racinaire plus profond et plus efficace ou bien à une régulation stomatique (sur les feuilles) plus intense.

C'est pourquoi d'autre part, on procède à l'analyse de plus en plus fine des déterminants physiologiques des caractères d'adaptation jusqu'aux niveaux moléculaires. Des centaines de gènes pouvant intervenir dans la résistance à la sécheresse ont déjà été identifiés. De nombreuses expériences ont montré que la variation de l'expression de certains de ces gènes provoque des phénotypes différents sous contrainte hydrique. Par exemple selon une publication récente (Uga et al. 2013), la surexpression d'un seul de ces gènes chez le riz a provoqué une croissance racinaire nettement plus profonde, par réorientation de l'axe de croissance de la racine, augmentant ainsi la réserve hydrique. Toutefois, il y a encore loin des champs expérimentaux aux champs cultivés et la recherche doit aller beaucoup plus loin pour pleinement tirer parti de ces récentes avancées à l'échelle de la cellule ou de la molécule.

### 4. Conclusion

L'amélioration des plantes cultivées pour la production en conditions sèches a essentiellement visé le rendement. Les exemples développés dans l'exposé de MM. Ghesquière, Langlade et Welcker apporteront des exemples de ces progrès dont dépend pour une bonne part le succès de l'intensification écologique que demande l'agriculture pour faire face aux attentes de la population.

## Bibliographie

Durand JL. 2007. Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques. *Fourrages* 190, 181-195.

Robelin M., Morizet J. 1983. L'eau. Répondre aux besoins ou adapter les cultivars. *Agromais*, 20 : p 28.

Vadez V., Kholova J., Medina S., Kakker A., Anderberg H. 2014. Transpiration efficiency: new insights into an old story. *Journal of Experimental Botany*. doi:10.1093/jxb/eru040

Uga Y., Sugimoto K., Ogawa S., Rane J., Ishitani M., Hara N., Kitomi Y., Inukai Y., Ono K., Kanno N., Inoue H., Takehisa H., Motoyama R., Nagamura Y., Wu J., Matsumoto T., Takai T., Okuno K., Masahiro Yano M. 2013. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics* 45,1097–1102.



# **Adaptation à la sécheresse du maïs, du tournesol et des prairies**

**Marc GHESQUIERE<sup>1</sup>, Claude WELCKER<sup>2</sup> et Nicolas LANGLADE<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Inra/Unité de recherche pluridisciplinaire prairies et plantes fourragères 86600 Lusignan ; <sup>2</sup>Inra/Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux, 2 place Viala, 34060 Montpellier ; <sup>3</sup>Inra/Laboratoire des interactions plantes-microorganismes, UMR441, 31326 Castanet-Tolosan

Courriel : Marc.Ghesquiere@lusignan.inra.fr

## **Résumé**

La sélection de variétés à la fois productives et tolérantes à la sécheresse est le moyen privilégié pour adapter les cultures dans un contexte de ressources en eau de plus en plus contraint. Des exemples empruntés aux espèces les plus concernées, soit parce qu'elles sont cultivées en été, maïs et tournesol, soit parce qu'elles traversent inévitablement des périodes sèches, les prairies, montrent que les phénomènes physiologiques entraînés par le manque d'eau sont tous partagés par ces espèces. En revanche, ce sont les combinaisons des caractères mis en jeu qui sont originales entre espèces, au sein desquelles il s'agit alors de sélectionner les meilleurs compromis possibles pour une zone de culture et des pratiques données. Depuis qu'elle existe, l'amélioration des plantes réalise un progrès régulier de la productivité des variétés en conditions sèches ; son efficacité entre espèces dépend surtout de caractéristiques biologiques qui ne sont pas directement dépendantes des ressources en eau mais plutôt de la maîtrise du régime de reproduction et du type de variétés qui en découle. Maïs et tournesol sont ainsi des espèces-modèles pour identifier les gènes et marqueurs moléculaires associés à la réponse au déficit hydrique et rendre plus efficace la sélection, ceci dans un cadre de variétés hybrides réalisant une identité génétique parfaite entre individus de la culture. Si cette approche reste un enjeu général en amélioration des plantes, les espèces fourragères et leurs variétés « synthétiques » constituent un autre champ de recherches pour évaluer en quoi la variabilité génétique de la prairie peut être aussi un levier d'action pour maintenir la productivité sous un climat de plus en plus variable.

**Mots-clés :** Déficit hydrique, Progrès génétique, Sélection, Variété synthétique, Hybride

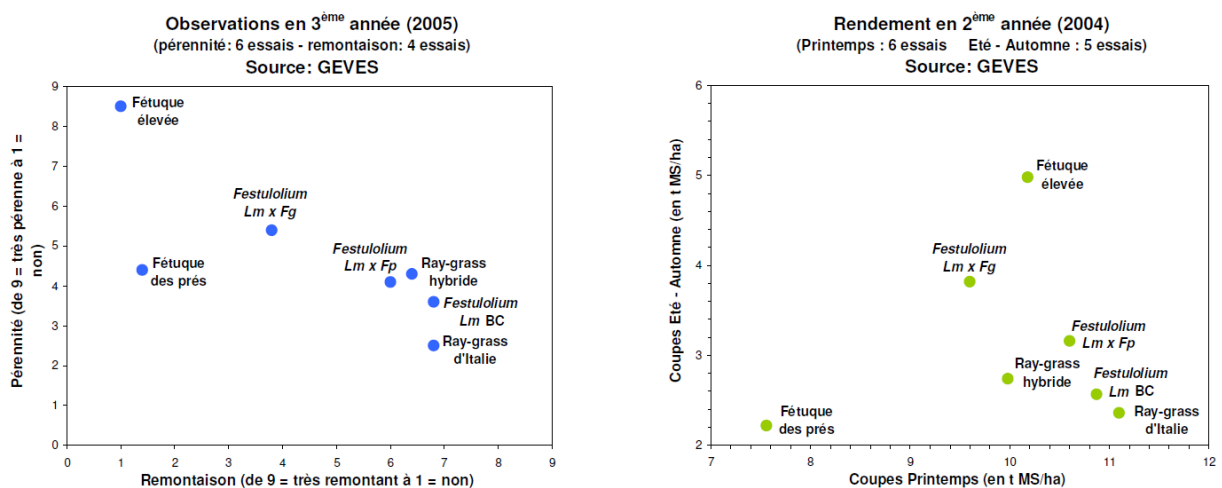
## **1. Adaptation des espèces**

L'alimentation en eau n'est que rarement optimum au cours de la vie des plantes alors qu'elles en ont un besoin vital. Avec les variations annuelles de température, mais souvent associées à celles des précipitations, et les caractéristiques physiques des sols, la ressource en eau utilisable par les plantes est ainsi un puissant mécanisme de distribution des espèces. A cette échelle, la diversité des espèces est remarquable au sens où l'évolution a retenu presque autant de compromis pour ajuster finement croissance et consommation d'eau que de contextes de disponibilité en eau à la surface de la planète.

Toutefois, la croissance détermine aussi directement la compétition entre plantes dans milieu donné. Cela explique que lorsque le déficit hydrique devient régulièrement sévère, abaissant

simultanément le niveau de productivité permis par le milieu et celui de la compétition, ce sont les mécanismes d'évitement qui sont les plus activement sélectionnés aux dépens de la dimension du système aérien et/ou de l'accumulation des produits de la photosynthèse dans des organes de réserves. Chez les espèces herbacées pérennes, l'évolution vers des écotypes réduisant leur potentiel de productivité ou raccourcissant leur cycle reproducteur jusqu'à devenir annuel, est caractéristique du milieu méditerranéen (Poirier et al 2011). C'est ce même mécanisme d'évitement qui est exploité chez les espèces cultivées par le choix des variétés les plus précoces pour les régions sèches et sans irrigation.

Pour autant, ces réponses de nature adaptative ne sont intéressantes en agriculture que pour des sécheresses sévères et notamment dans le cas d'espèces pérennes où toute consommation d'eau inadéquate peut devenir rapidement préjudiciable à la survie de la culture. Distribuée principalement entre espèces, la variabilité génétique de la réponse à la sécheresse peut néanmoins être exploitée par hybridation entre des espèces ayant développé des stratégies complémentaires et à condition qu'elles aient préservé suffisamment de compatibilité en croisement. C'est le cas de la fétuque et du ray-grass chez les espèces fourragères où profondeur d'enracinement et contrôle stomatique, respectivement, permettent de déplacer au travers de variétés de *Festulolium*, les points d'équilibre entre productivité et pérennité atteints par chaque espèce parentale indépendamment au cours de son évolution (Figure 1).



**Figure 1 :** Caractérisation de *Festulolium* parmi leurs espèces parentales pour des critères VATE d'inscription au catalogue français des variétés fourragères. *Lm x Fp* et *Lm x Fg* : *Festulolium* issus d'hybrides entre ray-grass d'Italie et fétuque des prés ou *Festuca glaucescens* (resp.) ; *F. glaucescens* est une espèce tétraploïde apparentée à la fétuque élevée mais non cultivée ; *Lm BC* : *Festulolium* issu de rétrocroisement d'hybrides *Lm x Fp* dans le ray-grass d'Italie (Ghesquière 2003, 2007).

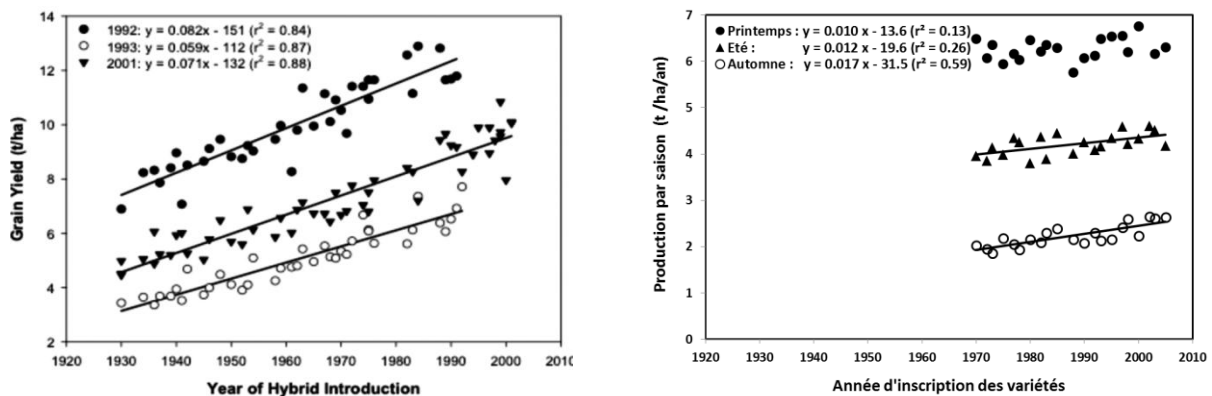
Les variétés de *Festulolium* ne réalisent pas, ou du moins pas encore, de fortes transgressions ni pour tous les caractères par rapport à leurs espèces parentales – la recombinaison génétique, interspécifique ici, est loin d'avoir été totalement exploitée chez ces variétés encore très récentes – mais l'exemple montre que l'hybridation interspécifique peut être une solution pour sélectionner de nouveaux compromis d'utilisation de l'eau et maintenir, voire étendre, une production fourragère pour des régions où la sécheresse en été devient, ou va devenir, de plus en plus variable.

Pour des situations de sécheresse plus modérée, c'est au niveau intraspécifique que se concentrent, et depuis longtemps, les efforts de l'amélioration. Pour cela, de très nombreuses

descendances sont produites et évaluées chaque année dans de grands réseaux d'essais et une large variation de conditions climatiques. La sélection sur la productivité peut être alors réalisée sur la performance moyenne ou celle obtenue spécifiquement dans les localisations les plus limitantes ; la valeur des variétés incluant aussi des critères de résistance à des maladies et ravageurs ou de valeur alimentaire et technologique, c'est une sélection sur de multiples objectifs à la fois qui est pratiquée à chaque cycle, éventuellement au travers d'index prenant en compte l'héritabilité propre de chaque critère ou composante et leur corrélation génétique, entre eux et avec les objectifs d'amélioration.

## 2. Sélection de variétés

La comparaison dans les mêmes essais de variétés inscrites sur plusieurs dizaines d'années permet d'évaluer *a posteriori* le progrès génétique accompli et l'efficacité de la sélection pour un même objectif entre des espèces aussi différentes que maïs et ray-grass (Figure 2).



**Figure 2 : Progrès génétique en productivité annuelle enregistré chez le maïs (gauche) et le ray-grass anglais (droite) : conditions de croissance très favorables (1992), froides et humides (1993) et chaudes et sèches (2001) pour le maïs (Duvick 2005) ; moyenne de 2 à 6 coupes par an sur 3 ans et 4 lieux d'essais chez 21 variétés de ray-grass anglais diploïdes et tardives, inscrites au catalogue français entre 1970 et 2005 ; rendements corrigés de la date d'épiaison des variétés (29 mai en moyenne) ; la régression est significative en été ( $P = 0.002$ ) et en automne ( $P < 0.001$ ), (Chosson et al 2009, Sampoux et al 2011).**

Chez le ray-grass, la période de création variétale observée est plus courte car celle-ci n'a démarré réellement qu'avec la révolution fourragère, quarante ans après le maïs. La productivité est annuelle pour le maïs mais de fortes variations climatiques entre années permettent de la rapprocher de celle du ray-grass après fractionnement entre saisons sur plusieurs années et de comparer le gain génétique vis-à-vis de la ressource en eau entre les deux espèces.

On note immédiatement que le gain observé chez le ray-grass est inférieur d'un facteur quatre environ à celui du maïs, et ce pour différentes raisons : efficacité de la photosynthèse, durée du cycle de sélection, pérennité de la culture, structure génétique des variétés, densité du peuplement... toutes en faveur du maïs. Mais ces données tiennent plus à la biologie de l'espèce et/ou de sa culture qu'à une sélection qui serait moins efficace en soi. Le différentiel de gain serait par exemple moins accusé entre tournesol et ray-grass par le simple fait que les



deux espèces partagent le même système photosynthétique (plante en C3) vis-à-vis du maïs (plante en C4), (Maury et al 2011).

Cependant, la comparaison éclaire sur la hiérarchie des caractères dont la variabilité génétique a été sollicitée pendant la sélection. L'accumulation de biomasse, la vitesse de croissance des organes, végétatifs et reproducteurs, restent ainsi des cibles de sélection les plus efficaces, et générales, de l'amélioration de la productivité, c'est-à-dire même lorsque le déficit hydrique s'accroît (Welcker 2012). La photosynthèse en particulier n'est pas aussi critique que l'on pensait devant l'ensemble des caractères contribuant à une meilleure efficacité de la gestion des ressources en eau : croissance et architecture racinaire pour extraire plus d'eau ou plus profondément dans le sol, contrôle de la transpiration par les stomates pour l'utiliser parcimonieusement.

Cette approche rétrospective de l'amélioration atteint ses limites car elle ne permet pas d'identifier dans le détail quels caractères ont été exploités prioritairement, sachant d'autre part que nombre de ces caractères ont des variations antagonistes ; il est vraisemblable qu'une sélection directe et sur un caractère aussi intégratif que le rendement annuel atteigne aussi une limite pour des espèces sélectionnées intensivement et depuis longtemps comme le maïs.

### 3. Conclusion

La poursuite du progrès génétique passe donc par l'identification précise des caractères de l'efficacité de l'eau sur lesquels l'intensité de la sélection pourra se renforcer en pleine connaissance des relations de cause à effet et non plus de façon seulement statistique.

L'intégration de plus en plus étroite de l'écophysiologie à la génétique au travers de la modélisation permet de mieux formaliser l'amélioration : évaluer *a posteriori* quelles sont les zones de cultures et les pratiques qui valoriseront le mieux le progrès génétique sortant du flux constant des variétés issues de la sélection conventionnelle, comme définir *a priori* les modèles de variétés, les idéotypes, à sélectionner pour l'avenir (Volaire et al 2013).

La vulgarisation des outils moléculaires ces dernières années est à ce sujet l'occasion d'un changement d'échelle sans précédent de l'amélioration des plantes dans la compréhension des mécanismes de la réponse à la sécheresse et l'appréhension de leur variabilité génétique. Caldeira et al (2014) montrent par exemple que la synthèse d'aquaporine dans les racines, protéine de la membrane plasmique augmentant la perméabilité à l'eau, permet d'ajuster à l'échelle de la journée la conductance hydraulique des racines et d'augmenter ainsi le prélèvement d'eau pour maintenir croissance et photosynthèse de toute la plante. C'est aussi à l'échelle des gènes ou de marqueurs génomiques associés aux caractères que la sélection des plantes est désormais envisagée, qu'elle dépassera les limites de la sélection phénotypique dont de nombreux exemples montrent qu'elle ne peut à elle seule, accumuler tous les gènes favorables (les allèles dans le cas présent) à l'expression maximum d'un caractère quantitatif, notamment quand celle-ci est limitée par un facteur du milieu comme l'eau.

Enfin, la prise de conscience du changement climatique et le gain en précision et généralité des modèles de prévision qu'elle a suscité, est également un contexte totalement nouveau pour une amélioration non seulement de plus en plus ajustée aux régions et systèmes de culture mais aussi anticipatrice.

## Bibliographie

- Caldeira C.F., L. Jeanguenin, F. Chaumont, F. Tardieu, 2014 Circadian rhythms of hydraulic conductance and growth are enhanced by drought and improve plant performance. *Nature Communications* 5, doi:10.1038/ncomms6365
- Chosson J.C., V. Béguier, M. Ghesquière, M.C. Gras, J.P. Sampoux, 2009. Les progrès génétiques enregistrés depuis 50 ans dans le secteur des espèces fourragères pérennes, *Fourrages*, 200, 475-488
- Duvick, D. N., 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica*, 50, 193-202
- Ghesquière, M., 2007 Note sur la diversité des variétés de *Festulolium*. *Fourrages*, 191, 377-379
- Ghesquière, M., C. Mousset, 2003 *Festulolium* : définitions et perspectives. *Fourrages*, 176, 479-492
- Maury P., N. Langlade, P. Grieu, D. Rengel, A. Sarrafi, P. Debaeke, P. Vincourt, 2011 Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovations Agronomiques*, 14, 123-138
- Poirier M, J.L. Durand, F. Volaire, 2012. Persistence and production of perennial grasses under water deficits and extreme temperatures: importance of intraspecific vs. interspecific variability. *Glob Chang Biol*, 18, 3632–3646
- Sampoux JP, P. Baudouin, B. Bayle, V. Béguier, P. Bourdon, J.F. Chosson, F. Deneufbourg, C. Galbrun, M. Ghesquière, D. Noël, W. Pietraszek, B. Tharel, A. Viguié 2011 Breeding perennial grasses for forage usage: An experimental assessment of trait changes in diploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars released in the last four decades. *Field and Crop Science*, 123, 117-129
- Voltaire F., P. Barre, V. Béguier, T. Bourgoïn, J.L. Durand, M. Ghesquière J.P. Jaubertie, I. Litrico, D. Noël, 2013. Quels idéotypes de plantes fourragères pour des prairies adaptées au changement climatique ? *Fourrages*, 214, 119-126
- Welcker C., 2012 Adaptation du maïs au déficit hydrique : défis et pistes pour la sélection. *Le sélectionneur français*, 63, 25-35



# Analyse multicritère de différents systèmes de culture irrigués. Existe-t-il une alternative à la monoculture de maïs grain ?

Sébastien MINETTE<sup>1</sup>, Bruno SYLVESTRE<sup>2</sup>

Affiliation : <sup>1</sup>Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes, <sup>2</sup>Agriculteur

Courriel : sebastien.minette@poitou-charentes.chambagri.fr

## Résumé

Dans le cadre d'un projet régional Systèmes de culture innovants, les Chambres d'agriculture de Poitou-Charentes ont mis en œuvre, début 2008, une démarche de co-conception impliquant directement des agriculteurs et des conseillers. L'objectif est la conception de systèmes de culture « économes en intrants » qui seront ensuite testés et évalués aux champs à travers un réseau régional.

Les systèmes classiques de Charente, comme la monoculture de maïs grain ou le système maïs grain/blé tendre, peuvent présenter des limites, tant d'un point de vue environnemental qu'agronomique. Un système « alternatif » a donc été conçu et testé pendant 5 ans (durée d'une rotation). Les résultats obtenus font ressortir la performance du système concernant la durabilité environnementale, agronomique et sociale. En revanche, la durabilité économique est dégradée par rapport aux systèmes classiques avec des volumes d'eau disponibles inchangés. Cette comparaison met aussi en avant la difficulté de comparer des systèmes de culture dans un contexte d'irrigation différents. En effet, il est nécessaire de comparer des systèmes de culture dans un contexte identique en prenant en compte les contraintes liées à la surface irrigable, à la ressource et aux équipements d'irrigation. Sans ces précautions, l'analyse des indicateurs de performance des systèmes peut conduire à des interprétations erronées.

**Mots-clés :** Co-conception, systèmes de culture, évaluation, irrigation

## 1. Contexte

Le modèle de production intensif mis en place après la deuxième guerre mondiale, en réponse aux objectifs d'autosuffisance nationale et de réduction des prix des aliments a atteint ses limites (Bourgeois, 2007). Durant la dernière décennie, la politique agricole a pris une nouvelle évolution. L'enjeu productiviste est toujours présent face à une population mondiale croissante, mais désormais nuancé par la volonté de préservation de l'environnement (Reau, 2008). Les nombreux problèmes environnementaux comme la pollution des eaux, et agronomiques comme l'apparition de résistances ou la perte de biodiversité ont contribué à l'apparition du concept de développement durable. Il s'agit d'un mode de développement qui « répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland G, 1987). Face à ces contraintes et en réponse aux multiples enjeux de l'agriculture, de nombreux acteurs s'impliquent pour concevoir de nouveaux systèmes culturels répondant aux objectifs réglementaires et environnementaux.

## 2. Projet régional

La démarche Systèmes de culture innovants (SdCi) a été initiée il y a six ans en Poitou-Charentes.

### Les objectifs principaux sont :

- mettre en œuvre une démarche de conception de systèmes afin d'identifier des systèmes prometteurs ;
- mettre en place un réseau multi-local d'expérimentations au champ des systèmes et de techniques innovantes les plus prometteurs pour évaluer leurs performances et leurs conditions de réussite ;
- initier un réseau de compétences et de communication pour accompagner l'adoption des systèmes jugés prometteurs.

Les systèmes de culture (SdC) testés sont issus d'une réflexion collective de groupes volontaires d'agriculteurs et de conseillers, afin de définir des systèmes moins consommateurs en intrants azotés, phytosanitaires ou eau. Ce travail collectif et participatif est appelé « co-conception ». Ces systèmes sont ensuite testés aux champs chez des agriculteurs volontaires. Ils mobilisent un ensemble de « leviers agronomiques » parmi lesquels :

- introduction de diversité végétale (allongement rotation, couverts végétaux) ;
- stratégies d'esquives (combinaison dates de semis, choix variétaux) ;
- désherbage mécanique (binage, herse étrille) ;
- travail du sol (labour, faux-semis, semis direct).

Après leur conception, les essais sont mis en œuvre et suivis par le binôme agriculteur-conseiller ou un groupe de techniciens (essais station). Ces groupes décident des interventions à réaliser, suivent les essais et recueillent les résultats techniques (rendement, qualité) et agronomiques (faisabilité des techniques, impacts sur bio-agresseurs...).

Enfin, une phase d'évaluation multicritère est réalisée afin de juger globalement la durabilité des systèmes sur les volets sociaux, économiques et environnementaux.

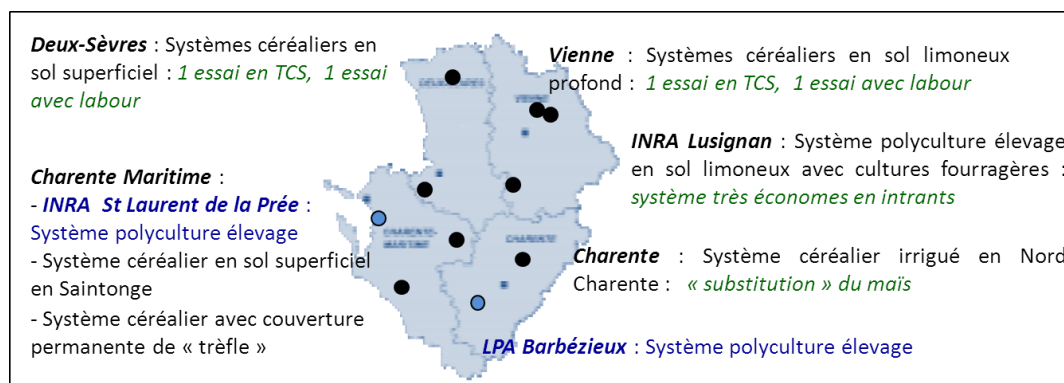


Figure 1. Carte des sites 2013 (en noir : essais débutés en 2008, en bleu : essais débutés en 2010)

### 3. Démarche d'évaluation

Pour structurer l'évaluation, chaque système sera décrit et analysé suivant le schéma :

1. Description du contexte : lieu, climat, sol, environnement de la parcelle
2. Rotation testée et caractéristiques du SdC
3. Itinéraires techniques « pratiqués » : synthèse des répétitions sur les années d'essais.
4. Résultats techniques et performances pour les objectifs initiaux : 1<sup>er</sup> niveau d'analyse
5. Résultats techniques et performances sur autres enjeux : 2<sup>e</sup> niveau d'analyse
6. Conclusions sur les performances du système et perspectives d'améliorations

En Poitou-Charentes, les systèmes co-construits par les agriculteurs avaient pour ambition de limiter le recours aux intrants (chimiques, eau). L'hypothèse sous-jacente, qu'il faudra vérifier lors de l'évaluation, est que la moindre utilisation d'intrants aboutissent à limiter les transferts de pesticides ou d'azote vers les eaux. Les conséquences sur les autres enjeux (« effets collatéraux ») seront ensuite évaluées. Un système, pour être qualifié de « durable » dans le contexte du projet SdCi, devra répondre aux exigences initiales, mais aussi à d'autres enjeux, comme la rentabilité économique.

Enjeux-Questions		Indicateurs	Unités	Méthode de calcul
<b>1<sup>er</sup> niveau d'analyse : vérification des hypothèses</b>				
Econome en intrants	Le système est-il « économe » en : <b>intrants « phytos » ?</b>	IFT	/	IFT = $\frac{\text{dose appliquée}}{\text{dose homologuée minimale}}$ * surface traitée
		Quantité de Substance Active (QSA)	gramme/ha/an	QSA = $\sum$ produits (dose appliquée x concentration en substance active)
	<b>intrants « azote » ?</b>	Quantité d'azote utilisée	unités/ha/an	$\sum$ quantité d'azote épandue par hectare par an
		Balance Globale Azotée (BGA)	Kg N/ha	BGA = entrée N (fertilisation) – sorties N (besoins en azote de la culture)
		EQUIF	/	EQUIF = entrée N (fertilisation) – sorties N (besoins en azote de la culture)
	<b>intrants « phosphore et potassium » ?</b>	Bilan phospho-potassique	KG/ha/an	Bilan = entrées (kg/ha)-sorties (kg/ha)
<b>intrants « eau » ?</b>	Eau sollicitée	mm/ha/an	$\sum$ quantité d'eau apportée en mm /ha/an	
Qualité de l'eau	Le système permet-il de <b>limiter les risques de transferts azote ou pesticides ?</b>	ARTHUR	/	Note = fonction des substances actives utilisées, du milieu de la parcelle ( <i>type de sol, climat, % de pente</i> )
		Syst'N	Kg N/ha/an	Modélisation = fonction des pratiques de gestion de l'azote, du milieu et de la rotation culturale
<b>2<sup>ème</sup> niveau d'analyse : « effets collatéraux »</b>				
Productivité	Impact sur la <b>productivité</b> globale des cultures et du système ?	Rendement	Qx/ha	Rendement moyen des parcelles
		Qualité des produits	/	Principaux critères qualitatifs de chaque culture comme le taux protéique, le % d'humidité..
Economique	Le système est-il <b>économiquement</b> rentable ?	Charges opérationnelles	euros / ha / an	$\sum$ (intrants) : semences + fertilisants + produits phyto + irrigation
		Coût de mécanisation	euros / ha / an	$\sum$ (coût) : interventions mécaniques
		Marge brute (MB)	euros / ha / an	MB = produit brut - charges opérationnelles
		Marge semi-nette (MSN)	euros / ha / an	MSN = MB - coût de mécanisation
Energie	Consommation en <b>carburant</b> ou <b>énergie</b> ?	Consommation de carburant	Litres / ha / an	$\sum$ consommation en carburant par ha par an ( <i>pour les cultures et les systèmes</i> )
		Efficacité énergétique (Systerre)	mégajoules / ha / an	Efficacité = Energie produite / Energie consommée
Environnement	Emissions de « <b>Gaz à Effet de Serre</b> » (GES)	Emissions de GES (Systerre)	kg équivalent CO2 / ha	$\sum$ (émissions de CO2, Ch4 et N2O)
Social	Le système occasionne-t-il plus de <b>passages mécaniques</b> ? Quels <b>risques d'exposition</b> « phytosanitaires » ?	Temps de travail	heures / hectare / an	$\sum$ (nb de passage x débit de chantier des outils)
		Nombre de passage	nb/ha/an	$\sum$ interventions mécaniques ( <i>pour les cultures et les systèmes</i> )
		Niveau d'exposition de l'agriculteur à la toxicité des produits phytosanitaires	Qualitatif	$\sum$ (nombre de produits à caractères dangereux pour la santé humaine (toxique, CMR ou nocif))

Figure 2 : Présentation des indicateurs retenus pour l'évaluation

## 4. Le système étudié en Charente

L'exploitation testant le système innovant pour une durée de cinq ans est située au nord de la Charente (16). Les sols sont des argilo-calcaires (30-35 % d'argile) sur calcaire dur moyennement profonds et à charge moyenne en cailloux. Ils sont sains mais possèdent une réserve en eau limitée (réserve facilement utilisable : ~40 mm). Ces sols sont appelés « groies superficielles ». Le climat est de nature océanique : des étés plutôt chauds et des hivers doux.

La pluviométrie annuelle moyenne est de 775 mm (650 à 900 mm). En règle générale, le bilan hydrique est déficitaire dès la première décade d'avril. Ce déficit persiste jusqu'à octobre. Les températures sont douces avec une température annuelle de 11°C.

Dans ce contexte, le SdCi de Charente a été initié dans l'objectif de tester une alternative aux rotations classiques fortement chargées en maïs grain irrigué. Le système testé doit permettre à l'échelle de la rotation, d'optimiser l'utilisation d'un volume d'eau restreint ainsi que de diminuer l'apport de pesticides et d'azote minéral tout en gardant une rentabilité du système intéressante pour l'agriculteur.

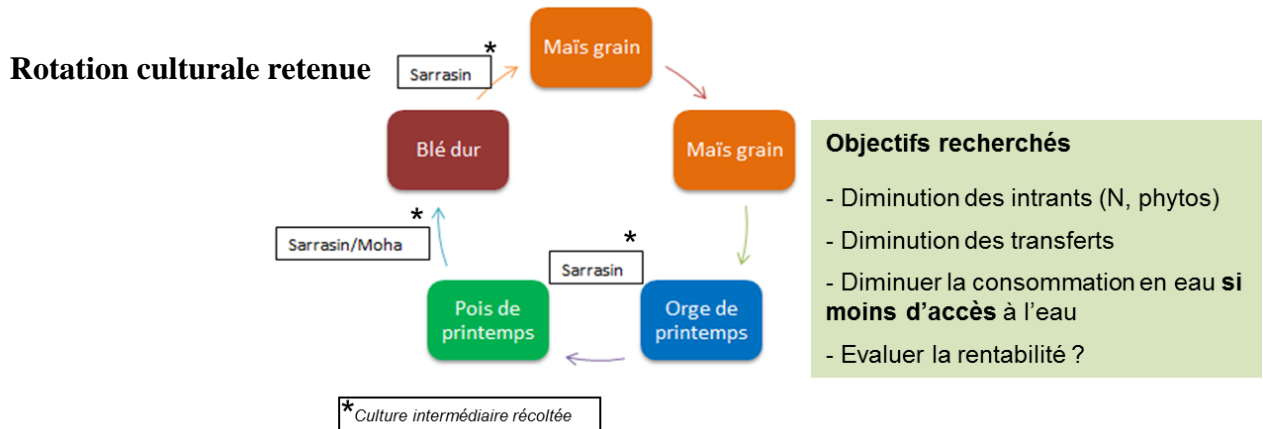


Figure 3 : Rotation testée en Charente sur les 5 campagnes culturales (2008/09 à 2012/13)

Les performances du système seront comparées aux performances de systèmes classiques conduits à proximité de l'essai et sur les mêmes campagnes culturales (récoltes 2009 à 2013).

<p>Système étudié</p> <p>Références « systèmes actuels » réparties en 4 groupes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ rotation « innovante » (SdCi Charente)</li> <li>☞ rotation « habituelle » de l'agriculteur</li> <li>☞ 6 monocultures maïs grain</li> <li>☞ 2 rotations maïs grain (x 3) / blé tendre</li> </ul>	<p>(M-M-Op-Pp-Bd)</p> <p>(M-M-M-Op-M)</p> <p>(M-M-M-M-M)</p> <p>(M-M-M-Bt-M)</p>
---	--	--

### Système économe en intrants ? Limitant les transferts vers les eaux ?

Le système innovant mis en place permet une diminution de l'IFT total de l'ordre de **20 %** par rapport à la moyenne des systèmes en monoculture et en rotation maïs grain / blé tendre et jusqu'à **38 %** par rapport à l'IFT régional.

A noter le niveau relativement faible du système « agriculteur » (SdC « agri ») où la combinaison de solutions agronomiques (désherbage mécanique + chimique) permet d'obtenir des IFT très bas.

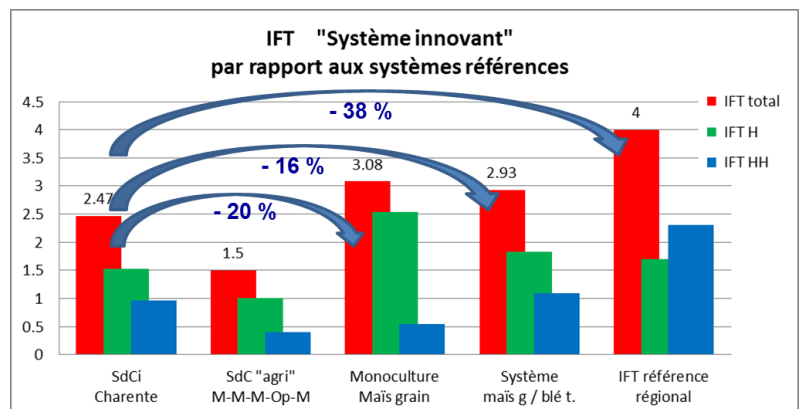


Figure 4 : IFT totaux des différents systèmes évalués

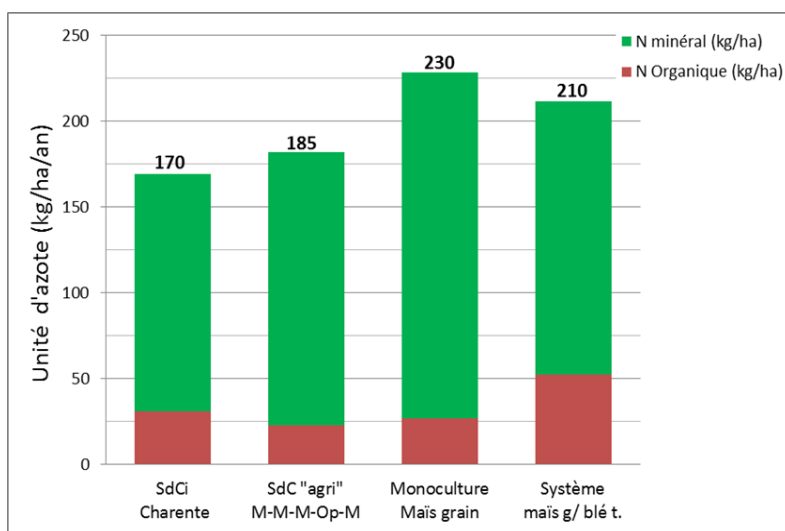


Figure 5 : Azote apporté par hectare et par an pour chaque système

Le SdCi Charente est le plus économe en apport d'azote brut avec **170** Unités d'azote apportées, (dont 140 U/ha/an en minéral).

Cet indicateur ne prend pas en compte la quantité de matières produites par les différentes cultures (grain/paille) et les gains des restitutions. Il ne permet pas de statuer sur d'éventuels risques de transfert mais indique simplement un niveau d'utilisation d'azote par hectare et par an.

Les risques de transfert d'azote par lixiviation sont relativement faibles, en revanche la concentration en nitrate sous le profil est encore assez élevée.

Indicateur Syst'N, CRA-PC 2014	SdCi Charente 2008-09 à 2012-13	Monoculture maïs grain	Système maïs/blé tendre	SdC "agri" M-M-M-Op-M
Concentration moyenne en NO <sub>3</sub> sous le profil racinaire (mg NO <sub>3</sub> /L)	45	65 (mini : 50 ; maxi : 67)	55 (mini : 50 ; maxi : 60)	55
AZOTE lessivés (kg N/ha/an)	35	50	40	40

Figure 6 : Estimation des risques de transferts d'azote par lixiviation (Estimations indicateur Syst'N)

Cette évaluation a été réalisée avec l'objectif initial assigné aux cultures intermédiaires : **cultures dérobées et récoltées**. Cependant, la faible rentabilité de cette pratique conduit dans l'avenir à modifier cet objectif et à privilégier l'enjeu « azote ».

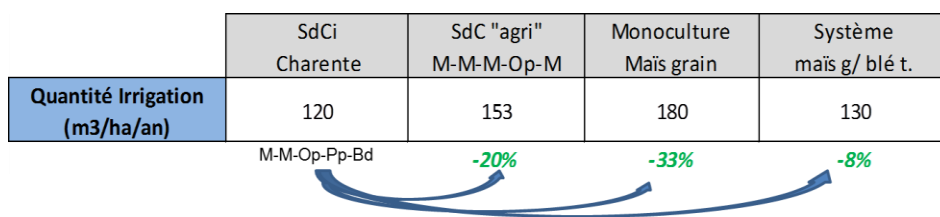










Figure 7 : Consommation en eau d'irrigation des différents systèmes (mm d'eau apportée)

Le système innovant ressort **moins consommateur** en eau que les autres systèmes (- 10 à 35 %). Cette évaluation de la consommation en eau doit cependant être examinée au regard des cultures le composant, des quantités de matières produites, ainsi que des quantités d'eau disponibles. Dans cet essai, le volume d'eau annuel réellement utilisable pour l'irrigation n'était pas connu à la mise en place des cultures, mais seulement au début de chaque semaine durant la période d'irrigation. De ce fait, un **volume déterminé** au moment du choix de l'assolement (ex : volume stocké) permettrait **d'optimiser les surfaces** de chaque système en fonction de leur besoins respectifs et **d'ajuster** au mieux les apports d'intrants (azote) en fonction d'un objectif de rendement plus précis lié à des apports d'eau garantis.



## Synthèse sur les objectifs initiaux du système innovant en comparaison avec les autres systèmes








-  : Amélioration du critère
-  : Stabilisation du critère
-  : Dégradation du critère

		SdCi de Charente
<b>Evaluation agronomique</b>		
	Diminution de l'IFT	
	Diminution de la fertilisation azotée minérale	
	Diminution du volume d'eau	
<b>Evaluation environnementale</b>		
	Réduction risque de transfert de phyto	
	Réduction risque de lessivage de l'azote	

## Analyse des « effets collatéraux » Performances économiques et sociales

Le système testé est performant pour de nombreux critères et assure une bonne productivité tout en respectant les critères de qualité des cultures.

Cependant, sa rentabilité économique est **fortement dégradée** par rapport aux systèmes classiques conduits chez des agriculteurs voisins.

		SdCi Charente
<b>Evaluation Economique</b>		
Productivité	Rendement	
	Qualité des produits	
Economie	Charges opérationnelles	
	Marge semi-nette	 /  <sup>2</sup>
<b>Evaluation sociale</b>		
	Temps de travail	
	Niveau d'exposition à produits dangereux pour la santé	

<sup>2</sup>A volume d'eau équivalent, le résultat économique est plus satisfaisant

La marge semi-nette est ainsi **pénalisée** de **470 €/ha** par rapport à la monoculture et de **200 €/ha** par rapport à des rotations incluant un blé tendre tous les 3-4 ans.

	Marge semi-nette (euros/ha/an)
<b>SdCi Charente</b>	845
<b>SdC "agri" M-M-M-Op-M</b>	1185
<b>Monoculture Maïs grain</b>	1470
<b>Système maïs g / blé t.</b>	1130

Figure 8 : Marges semi-nettes des différents systèmes (€/ha/an), campagnes 2009 à 2013

Malgré les économies de charges opérationnelles réalisées grâce à une conduite économe en intrants, le système innovant ne peut pas rivaliser avec le potentiel du maïs grain qui permet un produit brut important.

### Pour aller plus loin (résultats obtenus par simulations)

En se replaçant dans un **contexte à volume d'eau équivalent mais restreint** pour les deux **systèmes classiques**, le système innovant retrouve des résultats économiques similaires à ceux des rotations plus courtes moins diversifiées. En effet, la moindre disponibilité en eau pénalise les rendements de la monoculture de maïs grain et de la rotation maïs grain/blé tendre.

Le système devient aussi intéressant face aux aléas « prix de vente » et « prix de l'azote ».



## 5. Conclusions

Les résultats obtenus pour le système innovant de Charente font ressortir sa performance concernant la durabilité environnementale (diminution de l'IFT, risques de transfert dans l'environnement maîtrisés) et agronomique. Le système reste également globalement satisfaisant concernant la durabilité sociale (moindre exposition à des produits toxiques, charge de travail acceptable).

En revanche, la **durabilité économique** est dégradée en comparaison de systèmes classiques type monoculture de maïs grain ou maïs grain assolé avec une céréale comme le blé tendre ou l'orge de printemps.

Ce travail permet donc d'alimenter les références techniques sur les techniques culturales mises en avant dans ce système (désherbage mécanique, cultures intermédiaires) et légitime la réflexion sur les systèmes de culture.

Cependant, **l'évaluation** des systèmes mobilisant l'irrigation est **délicate**. A travers ces résultats, il semble probable qu'un certain niveau de monoculture sera maintenu dans les zones irriguées. Cette rotation pourra être coupée sur une année ou deux pour résoudre des problèmes agronomiques particuliers (ex. adventices). En cas de diminution forte de volume attribué, certains agriculteurs s'orienteront vers des cultures sèches intercalées entre des cultures irriguées, en espérant augmenter leur SAU si des opportunités se présentent. D'autres s'investiront dans des projets de création de ressources supplémentaires, tous dans le but de maintenir des exploitations économiquement durables. Dans le contexte des exploitations céréalières irriguées du Poitou-Charentes, le test effectué ces cinq années, fait apparaître que la diminution des volumes d'eau entraîne quasi systématiquement une perte de revenu fragilisant ainsi ces exploitations. En tout état de cause, une **irrigation raisonnée** permet une valorisation intelligente de l'ensemble des facteurs de production, environnement compris, et s'inscrit parfaitement dans le cadre d'une **agriculture durable**.

## Bibliographie

Bourgeois L. 2007. Soixante ans de politique agricole en France. Un volontarisme politique dans un contexte favorable. *Economie Rurale* n°300.p3 Disponible sur <http://economierurale.revues.org/2120>. Consulté le 15/05/2014.

Brundtland G., et al. 1987. Rapport Brundtland : Notre avenir à tous. Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation

Laot A. 2014. Analyse multicritère d'un système de culture innovant en céréales irriguées de Charente en alternative à une monoculture de maïs grain, Mémoire de fin d'études. Chambre Régionale d'Agriculture de Charentes, 70p.

Reau R., Doré T. 2008. Systèmes de cultures innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éditions. 176p.





Centre INRA Poitou-Charentes - Le Chêne - RD 150  
CS 80006 - 86 600 Lusignan  
[www.poitou-charentes.inra.fr](http://www.poitou-charentes.inra.fr)

Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes  
CS 45002 - 86 550 Mignaloux-Beauvoir  
[www.poitou-charentes.chambagri.fr](http://www.poitou-charentes.chambagri.fr)

