HAL open science

Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures

Antoine Messean, Elise Lô-Pelzer, Christian C. Bockstaller, Claire Lamine, Frédérique Angevin

▶ **To cite this version:**

Antoine Messean, Elise Lô-Pelzer, Christian C. Bockstaller, Claire Lamine, Frédérique Angevin. Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures. Innovations Agronomiques, 2010, 8, pp.69-81. 10.17180/28re-fr04 . hal-01173190

HAL Id: hal-01173190

https://hal.science/hal-01173190v1

Submitted on 29 May 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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques 8 (2010), 69-81

Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures.

A. Messéan[a*], E. Lô-Pelzer[a,b], C. Bockstaller[c], C. Lamine[a,d], F. Angevin[a]

[a]: INRA, UAR 1240 Eco-Innov, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

[b]: INRA, UMR 211 AgroParisTech – INRA, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

[c]: INRA, UMR 1121 Nancy-Université - INRA, IFR 110, BP 20507, 68021 Colmar, France

[d]: INRA, UR Ecodéveloppement, Domaine St-Paul, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9

Correspondance : messean@grignon.inra.fr

Résumé

Suite au Grenelle de l'Environnement et à l'évolution des politiques publiques, une réduction sensible de l'usage des produits phytosanitaires est attendue. Cette réduction passe non seulement par une meilleure efficience des intrants et par la substitution de techniques de lutte non chimique aux méthodes habituellement utilisées, mais aussi par des changements de systèmes de culture et l'exploration de stratégies ou d'innovations qui soient en réelle rupture avec les pratiques actuelles. Par ailleurs, il est nécessaire d'évaluer l'ensemble des impacts sociaux, économiques et environnementaux de tels changements car il peut y avoir contradiction entre ces différents aspects de la durabilité. Comment concevoir des innovations en réelle rupture et disposer néanmoins d'une évaluation multicritère de leurs performances la plus solide et la plus large possible ? L'outil d'évaluation *ex ante* multicritère DEXiPM a été développé à cette fin et permet de (i) pouvoir comparer, le plus en amont possible, les performances de systèmes innovants avec celles des systèmes actuels, (ii) sélectionner *a priori* les systèmes les plus prometteurs qui pourront alors être testés au champ (en station et/ou en fermes) et (iii) identifier les conditions facilitant l'adoption de ces systèmes innovants.

L'aptitude à l'analyse et à la comparaison de ces systèmes innovants par l'utilisation de DEXiPM est précieuse pour l'estimation de la durabilité globale des systèmes, mais surtout par la mise en lumière de l'ensemble des critères analysés. Ainsi les améliorations proposées peuvent être discutées et testées sur la base des connaissances disponibles. Parce que le contexte (politique, social, économique…) est pris en compte dans le modèle, DEXiPM peut aussi aider à concevoir des systèmes innovants qui ne sont pas nécessairement viables économiquement, écologiquement performants ou socialement acceptables aujourd'hui mais qui pourraient l'être sous certaines conditions, comme des politiques publiques appropriées ou des stratégies de filière adaptées.

Mots-clés : Évaluation multicritère, systèmes innovants, protection des cultures, pesticides, durabilité

Abstract

Pesticide use reduction in arable cropping systems has become a priority of public policies. To meet the objectives of reducing pesticide use by 50%, it is not only relevant to improve the efficiency of crop protection and to substitute non-chemical solution to pesticide but it is also necessary to consider redesigning cropping systems and exploring really innovative breakthroughs. It is equally important to assess all the economic, social and environmental impacts, be them direct or indirect, of proposed innovative systems. How can we design really innovative solutions and be able to assess them as completely as possible? DEXiPM is an ex ante multi-criteria assessment tool which make it possible (i) to compare, as early as possible, innovative systems with conventional systems, (ii) to select those

systems which are the most promising ones and which would be further tested in-field, and (iii) to identify the conditions which could make their adoption easier.

The ability to analyse and compare innovative systems using DEXiPM should prove valuable not only in estimating the overall sustainability of the systems but, more importantly, in shedding light on the value of all the criteria under analysis. Thus further improvements can be discussed and tested, resulting in better proposals for innovative systems. And because the context (political, social, economical etc) is taken into account in the model, DEXiPM can also assess those innovative systems which may not be feasible or efficient today, but which might be sustainable 'tomorrow' in a different context.

Keywords: Multi-criteria assessment, innovative systems, crop protection, pesticide, sustainability

Introduction

Le système actuel de protection des plantes en grande culture, largement dépendant des pesticides, repose le plus souvent sur des traitements chimiques spécifiques ciblés contre la plupart des bioagresseurs et permet ainsi de concevoir des systèmes de culture qui s'affranchissent de la prise en compte des contraintes biotiques. Ce système est aujourd'hui questionné, en raison de ses effets sur les ressources naturelles (pollution des eaux, des sols, de l'air, érosion de la biodiversité) et de ses impacts potentiels sur la santé humaine des utilisateurs et des consommateurs (e.g., Kolpin et al., 2000 ; Bedos et al., 2002 ; Barriuso et al., 2008). Par ailleurs, ce système rencontre des limites avec, d'une part, l'évolution des populations cibles vers la résistance sous l'effet de la pression de sélection que représente l'usage répété des mêmes substances actives (e.g., Richter et al. 2002) et, d'autre part, avec l'accroissement des risques phytosanitaires dus aux phénomènes d'invasion ou de ré-émergence liés aux différents aspects du changement global.

Les avancées de la connaissance scientifique ainsi que la forte demande sociétale ont conduit les pouvoirs publics européens à renforcer régulièrement les cadres réglementaires en lien avec la santé et l'environnement (Directive Cadre sur l'Eau, paquet pesticide). La récente directive cadre sur l'usage durable des pesticides (Directive 128/2009) fixe des règles pour une utilisation « durable » des pesticides et encourage le recours à la protection intégrée, notamment à travers l'obligation qui est faite aux Etats-Membres d'adopter un plan d'action national de réduction des risques liés aux pesticides. Au niveau national, à la suite du Grenelle de l'Environnement, les pouvoirs publics ont lancé, dès 2007, le plan Ecophyto 2018 avec l'objectif de réduire de moitié l'utilisation de pesticides d'ici 2018 si possible.

Les travaux conduits ces dernières années dans le cadre de projets de recherche comme Gedupic[1], de réseaux de recherche comme ENDURE[2] ou dans le cadre des expertises collectives Inra-Cemagref (Aubertot et al., 2005) puis Ecophyto R&D[3] montrent que l'objectif de réduction de 50% des pesticides retenu lors du Grenelle de l'environnement suppose des changements profonds des systèmes de culture, avec en particulier une modification des assolements en grandes cultures. Cependant, il apparaît aussi que des réductions sensibles pourraient être obtenues en combinant, à des degrés divers, des pratiques raisonnées et de protection intégrée (variétés résistantes, semis moins denses, retardés, désherbage mécanique, lutte biologique …) sans modification des assolements.

Des changements importants de pratiques et de systèmes de protection des cultures sont donc attendus et une nouvelle vague d'innovations techniques et organisationnelles est nécessaire pour

[1] http://www.inra.fr/gedupic
[2] http://www.endure-network.eu/
[3] http://www.inra.fr/presse/ecophyto_rd_quelles_voies_pour_reduire_usage_des_pesticides et Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p.

répondre aux enjeux actuels. Toutefois, les nouveaux systèmes de culture destinés à réduire la dépendance vis-à-vis des pesticides ne doivent pas remettre en cause le fait que les modèles de production actuels permettent d'assurer aux consommateurs une sécurité d'approvisionnement en produits agricoles sur l'ensemble du territoire européen à des niveaux de prix permettant aux ménages à revenu modeste d'y avoir accès, ni se traduire par des impacts indésirables sur d'autres dimensions de l'environnement, comme le recours aux ressources non renouvelables ou la biodiversité.

Il apparaît dès lors nécessaire que l'évaluation des systèmes innovants de protection des cultures, dans une perspective de développement durable, prenne en compte simultanément les différents éléments de critique et de défense du modèle de production à base d'intrants chimiques, relatifs à leurs conséquences non seulement environnementales et sanitaires, mais également économiques et sociales (e.g., Lichtfouse et al., 2009).

Après avoir rappelé la place des outils d'évaluation *ex ante* (a priori) dans la conception de systèmes innovants, nous présentons l'outil DEXiPM qui a été spécifiquement développé pour évaluer des stratégies innovantes de protection des cultures, puis nous illustrons comment cet outil a permis d'aider à concevoir et évaluer des solutions innovantes en systèmes de grande culture.

1- L'évaluation *ex ante* comme outil d'aide à la conception de systèmes innovants

Face à ce challenge de réduction sensible de l'usage des pesticides, il faut sans aucun doute chercher à améliorer les systèmes existants dans une démarche incrémentale, c'est-à-dire par une meilleure efficience des méthodes de protection des cultures et par la substitution de techniques de lutte non chimique aux méthodes habituellement utilisées. Mais il est tout aussi indispensable de concevoir des systèmes de culture et d'explorer des stratégies ou des innovations qui soient en réelle rupture avec les pratiques actuelles. Il s'agit en fait de mettre en œuvre une démarche de conception innovante, dans laquelle les objectifs des systèmes à construire et leurs composantes ne sont pas nécessairement déterminés à l'avance, de même que les modalités de leur validation et de leur adoption (Meynard, 2008).

Certaines de ces innovations peuvent alors ne pas être nécessairement, à court terme, viables économiquement, écologiquement performantes ou socialement acceptables mais pourraient l'être sous certaines conditions, comme des politiques publiques appropriées ou des stratégies de filière adaptées.

Par ailleurs, il faut également pouvoir évaluer l'intérêt que présenteraient des innovations avant même qu'elles soient au point, comme par exemple des idéotypes variétaux nouveaux de manière à fournir des « cahiers des charges de conception ». Par exemple, quelle combinaison de résistances quantitative et qualitative permettrait d'assurer une utilisation durable de variétés résistantes à un pathogène donné ?

Cette démarche prospective est nécessaire et la recherche doit ouvrir le champ des possibles, proposer un éventail de solutions potentielles et identifier les conditions de leur mise en œuvre.

Sélectionner des innovations sur la base d'une évaluation quantitative et complète de leur durabilité revient à prendre le risque de se cantonner à des solutions ou des combinaisons de solutions peu novatrices. En effet, les connaissances nécessaires à une évaluation complète sont – et c'est logique- disponibles pour des pratiques déjà bien étudiées.

De même, associer les acteurs concernés à la co-construction des innovations facilite leur appropriation ultérieure, mais risque d'écarter des innovations en rupture pourtant potentiellement intéressantes mais peu attractives à court terme. Des démarches de conception à base de modèles agronomiques (Jeuffroy et al,. 2008) ou de prototypage (Lançon et al., 2008) permettent d'élargir le champ des solutions explorées. Mais, là encore, on dispose alors de peu de connaissances sur le comportement et les performances de ces solutions nouvelles. Ceci est notamment le cas quand on imagine des

génotypes nouveaux pour lesquels la capacité de modéliser leur comportement et la qualité des prédictions deviennent essentielles.

Comment concevoir des innovations en réelle rupture et disposer néanmoins d'une évaluation multicritère de leurs performances la plus solide et la plus large possible ? Comment un outil d'évaluation peut-il aider à la conception de solutions innovantes en servant d'outil de médiation entre les concepteurs mais aussi avec les utilisateurs ?

Ceci peut se traduire par un double challenge :

- En termes d'anticipation, être capable d'évaluer des innovations le plus en amont possible de leur développement signifie que les connaissances sur leurs performances seront le plus souvent fragmentaires et parfois limitées à des dires d'experts. L'expérimentation étant lourde et coûteuse, on cherchera à sélectionner les systèmes candidats les plus prometteurs avec la plus grande fiabilité. Savoir combiner de cette façon, données qualitatives et données quantitatives dans un processus d'évaluation devient stratégique. En outre, les outils d'évaluation doivent permettre d'identifier les lacunes de connaissances et être dynamiques afin de pouvoir prendre en compte les résultats acquis au fur et à mesure du développement des innovations.

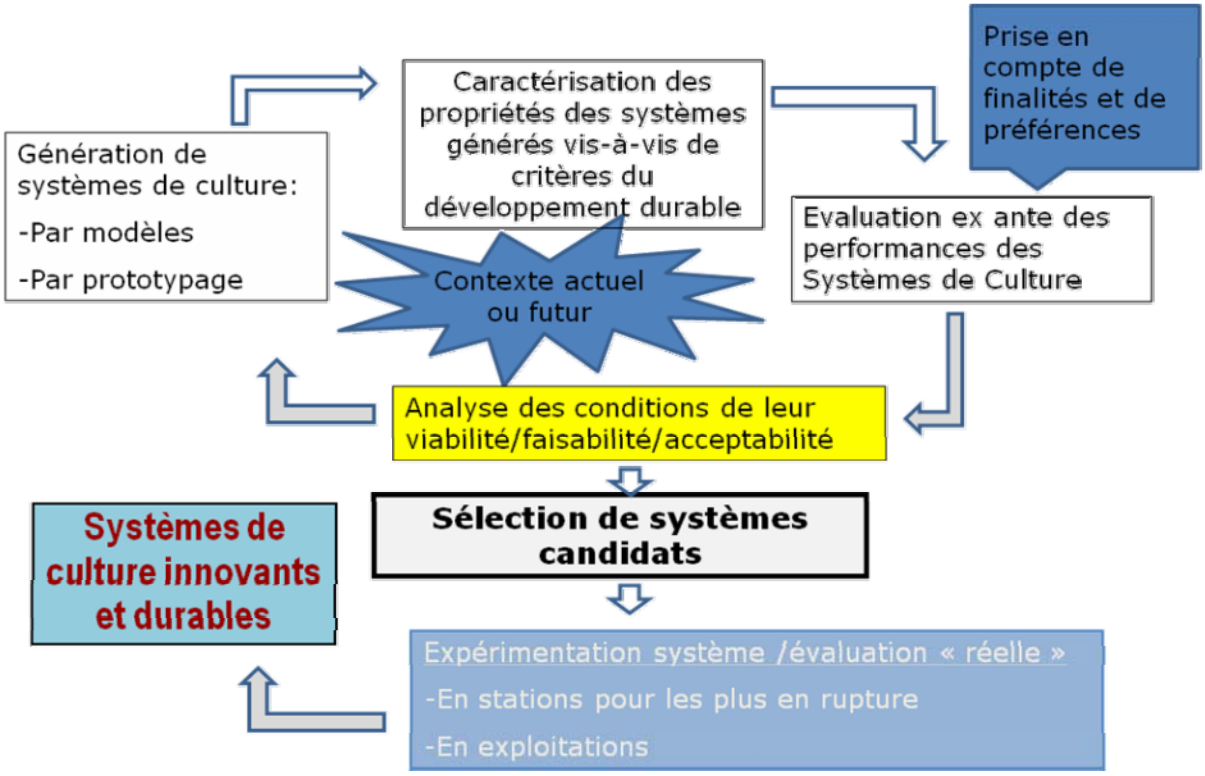
- En termes d'évaluation, la rénovation des modèles de production agricole et des innovations associées implique non seulement des critères étendus d'appréciation de leurs performances (en termes d'impacts environnementaux, de viabilité économique et d'équité sociale), mais également la reconnaissance de différents systèmes de valeurs ou de préférences associés aux systèmes de production ou pratiques agricoles. En effet, ces critères étendus doivent être définis non seulement à partir des connaissances produites par la recherche mais en prenant en compte les attentes, qu'elles soient considérées comme fondées ou non, des différents acteurs concernés, ainsi que leurs pratiques actuelles et les logiques qui les sous-tendent. Par ailleurs, l'assemblage des différents critères à des fins de décision publique doit laisser place aux préférences, forcément contradictoires, de différents acteurs de la société (exemple de la gestion de l'eau sur un bassin d'alimentation). L'évaluation doit donc être multicritère, multi-échelles et multi-acteurs. Là aussi elle doit aussi être dynamique, c'est-à-dire être actualisée en fonction des évolutions du contexte et des systèmes de production.

La Figure 1 illustre une démarche de conception / évaluation de systèmes innovants pouvant s'inscrire dans le contexte décrit ci-dessus :

1. Génération de systèmes et/ou de stratégies en rupture, à dires d'experts ou à l'aide de modèles agronomiques, en explorant le champ des possibles très largement, sans se soucier *a priori* du caractère opérationnel des solutions proposées ;
2. Caractérisation des propriétés des solutions imaginées vis-à-vis d'un ensemble très large de critères du développement durable. En effet, l'introduction d'une pratique a de multiples conséquences directes et indirectes. Par exemple, l'introduction du désherbage mécanique aboutit à une diminution de pesticides mais l'augmentation du temps de travail, le besoin de matériel adapté et les conséquences, en termes de coûts et d'organisation, doivent être considérées.
3. Evaluation des performances des systèmes générés en tenant compte des finalités spécifiques (e.g., réduire la dépendance vis-à-vis des pesticides) et des préférences (pondération entre différents critères) ;
4. Analyse des conditions de contexte qui rendraient plus performants et/ou plus acceptables les systèmes proposés ;
5. Test des systèmes candidats les plus prometteurs dans des dispositifs expérimentaux (pour les solutions les plus en rupture ou les plus risquées) puis en exploitations agricoles.

Les outils d'évaluation multicritère sont nécessaires à la mise en œuvre des étapes 2 et 3. Plusieurs d'entre eux ont été développés par l'INRA et ses partenaires dans le cadre de projets de recherche conduits ces dernières années (projet européen ECOGEN, ADAR, ANR DISCOTECH, réseau d'excellence ENDURE, RMT SCI). Les premières expériences d'utilisation de ces outils pour la conception de systèmes innovants mettent en évidence leur utilité pour avoir une vision exhaustive et partagée de la durabilité (étape 2) mais aussi au stade de l'évaluation comme outil de médiation pour faire exprimer les préférences des acteurs, notamment dans le cadre de recherche de solutions pour gérer une ressource commune (qualité de l'eau, par exemple ; Omon et al., 2010).

Figure 1. Schéma général de conception et évaluation de solutions innovantes



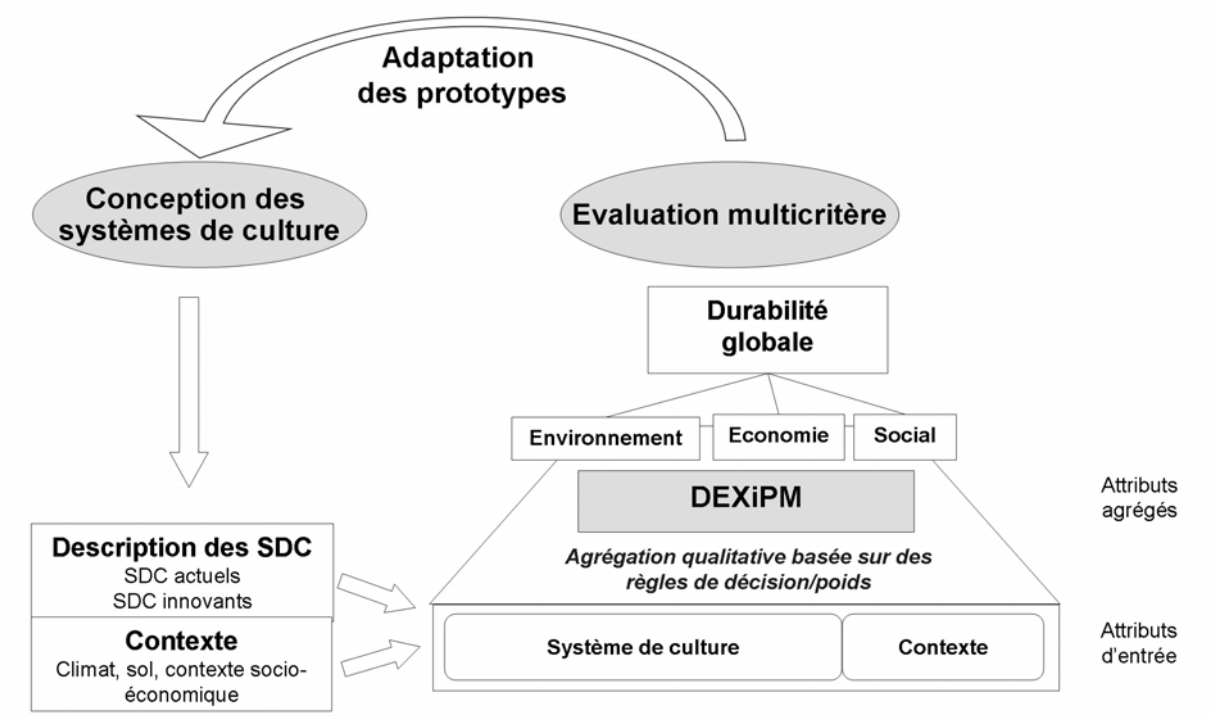
2. DEXiPM, outil d'évaluation multicritère de stratégies de protection des cultures

DEXiPM a été développé dans le cadre du réseau d'excellence ENDURE qui rassemble une communauté de recherche & développement autour de la réduction de la dépendance vis-à-vis des pesticides (Ricci et al., 2007). Un des objectifs de ce réseau est d'évaluer les systèmes de culture actuels et de proposer des systèmes innovants économes en pesticides. A cette fin, des groupes de discussion ont été constitués autour de systèmes de grande culture à base de cultures d'hiver (Colza-blé-orge) et de maïs et rassemblent des chercheurs de disciplines variées (agronomes, malherbologues, pathologistes et épidémiologistes) et des conseillers agricoles. Ces groupes ont décrit les principaux systèmes couramment utilisés dans les principales régions de production européennes et proposé, à dires d'experts, des systèmes alternatifs plus ou moins en rupture avec les pratiques actuelles.

DEXiPM est un outil d'évaluation ex-ante multicritère de la durabilité des systèmes de grande culture proposés qui a pour objectifs de (i) pouvoir comparer, le plus en amont possible, les performances de systèmes innovants avec celles des systèmes actuels, (ii) sélectionner *a priori* les systèmes les plus prometteurs qui pourront alors être testés au champ (en station et/ou en fermes) et (iii) d'identifier les conditions facilitant l'adoption de ces systèmes innovants.

DEXiPM est un modèle hiérarchique multicritère et qualitatif qui permet l'évaluation de systèmes de grande culture selon les trois piliers usuels de la durabilité, environnemental, social et économique (Lichtfouse et al., 2009). Dans chaque branche, la durabilité est ensuite décomposée en critères hiérarchisés (Figures 2 et 3.). DEXiPM s'inscrit dans une lignée d'outils d'évaluation *ex ante* de la durabilité de systèmes innovants développés par l'INRA et ses partenaires : le « *Grignon model* » destiné à évaluer l'impact économique et écologique de l'utilisation de maïs transgéniques (Bohanec et al., 2008), le modèle MASC (Sadok et al., 2009), pour l'évaluation de la durabilité de systèmes de culture innovants. Des méthodes d'évaluation quantitatives telles que SALCA (Nemecek et al., 2008, Jeanneret et al., 2006) ou INDIGO® (Bockstaller et al., 1997 ; 2009), ainsi que des études telles que Le Roux et al. (2008) ont également été analysées pour le choix et la hiérarchie des critères de l'arbre.

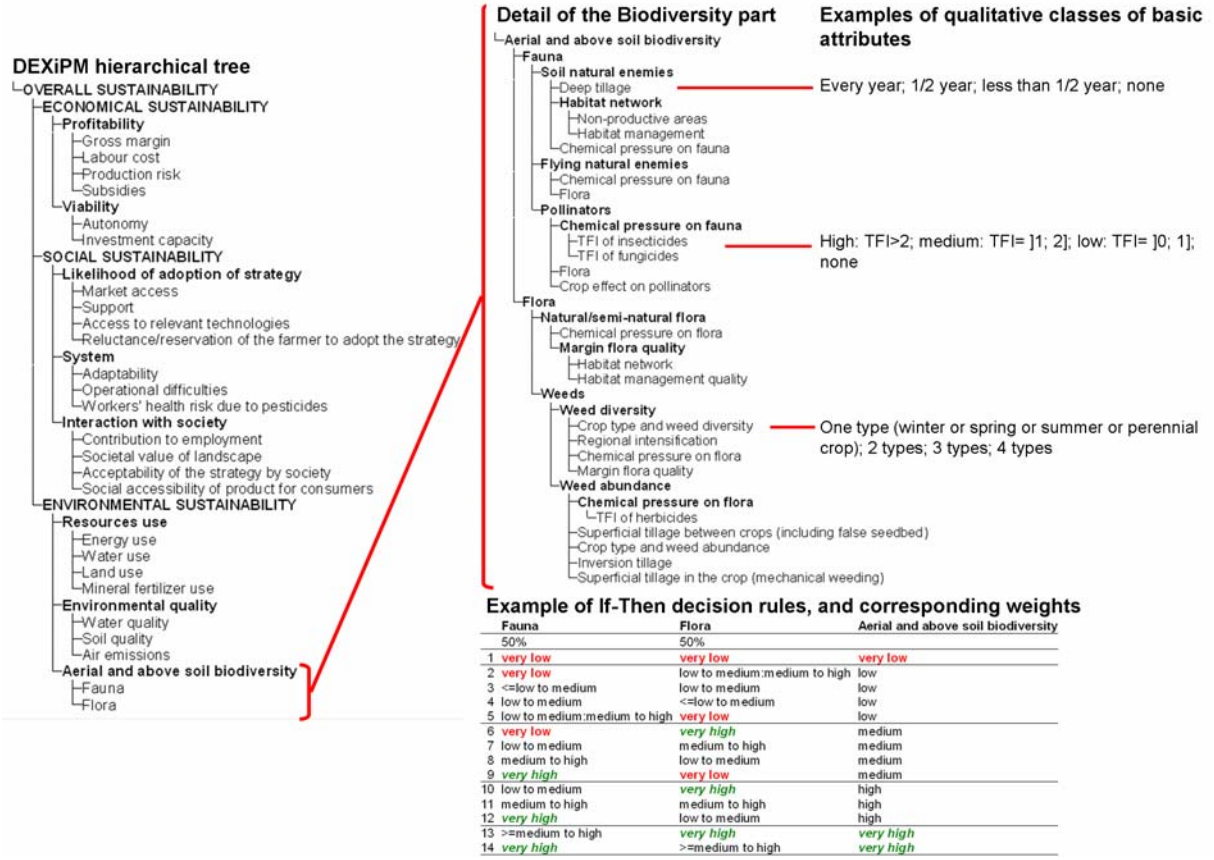
Figure 2. Description générale de DEXiPM et représentation schématique de l'évaluation de systèmes de culture à l'aide de DEXiPM



DEXiPM présente 74 critères basiques et 85 critères agrégés. Il a été développé grâce au logiciel DEXi (Bohanec, 2009). A la différence d'autres modèles de ce type (e. g., MASC ; Sadok et al., 2009), les critères basiques ne sont pas des indicateurs calculés mais une description technique du système de culture ainsi qu'une description du contexte de l'évaluation (contexte pédoclimatique, économique, social, politique). Les critères agrégés sont des indicateurs qualitatifs de durabilité. Ils sont estimés grâce à des règles d'agrégation qualitatives (règles si-alors déterminant la valeur d'un critère agrégé en fonction de ses critères explicatifs, Figure 3) décrites dans les fonctions d'utilité. L'importance de chaque critère est ensuite traduite en poids. Certaines des fonctions d'utilité sont fixées (en particulier dans la partie basse de l'arbre), basées par exemple sur des connaissances scientifiques, alors que d'autres (plutôt dans la partie supérieure de l'arbre) sont adaptables car liées à des préférences de l'utilisateur ou au contexte de l'évaluation. La plupart des critères de l'arbre sont à l'échelle du système de culture comme défini par Sebillotte (1990), mais certains prennent en compte des échelles plus larges comme le paysage (en particulier dans la partie biodiversité, Figure 3) ou l'exploitation agricole (en particulier dans la branche économique).

Basés sur les méthodes et études citées précédemment, les critères et leur hiérarchisation dans l'arbre, ainsi que les valeurs ou classes qualitatives de ces critères et les règles d'agrégation ont été définis par des agronomes et une sociologue. L'arbre a ensuite été soumis à l'expertise de scientifiques d'autres disciplines et de parties prenantes afin de consolider le choix et la hiérarchie des critères ainsi que les fonctions d'utilité. Même si DEXiPM a été conçu initialement pour l'évaluation de systèmes de culture économes en pesticide, ce qui a orienté en partie le choix de certains critères et de certaines règles d'agrégation, il rassemble, grâce à l'intervention d'experts de disciplines et domaines divers, un ensemble très large de critères de durabilité qui permettent de caractériser les performances de systèmes innovants dans d'autres contextes.

Figure 3 : Arbre hiérarchique de DEXiPM pour l'évaluation multicritère de systèmes de culture. Détail de la partie biodiversité aérienne, exemple de règle d'agrégation de critères de valeurs qualitatives d'attributs d'entrée.



Dans sa version actuelle, et contrairement à d'autres modèles du même type, comme MASC, l'arbre qualitatif a été décrit de manière complète, à partir de la description des systèmes de culture, de façon à permettre l'évaluation *ex ante* de systèmes de culture complètement innovants, pour lesquels aucune donnée quantitative ne serait disponible. Cependant, cet arbre est flexible et il est tout à fait possible, dans le cadre d'une évaluation *ex post* par exemple, d'estimer quantitativement à l'aide de méthodes existantes (en particulier pour la branche environnementale), ou par expertise directe, des critères agrégés situés à des niveaux plus élevés dans l'arbre.

DEXiPM peut donc être utilisé non seulement pour des évaluations *ex ante,* ce qui fait son originalité, mais aussi, et de manière plus classique, pour des évaluations *ex post* de systèmes de culture. Il ne doit pas être utilisé uniquement pour estimer la note finale de la durabilité globale du système de culture, mais avant tout comme un tableau de bord de ce système, qui comprend l'estimation des critères d'entrée ainsi que l'ensemble des valeurs prises par les critères agrégés de l'arbre, qui conduisent à la durabilité globale (ouvrir ainsi la « boîte noire » de la durabilité). Ainsi, les concepteurs

se sont attachés à être aussi exhaustifs que possible dans les attributs, ce qui conduit parfois à une certaine redondance, par exemple entre les critères consommation d'énergie et émissions de CO_2.

Deux utilisations majeures de DEXiPM ont été identifiées :

- D'abord, il est possible de comparer dans un contexte donné (actuel ou futur) plusieurs systèmes de culture et déterminer le ou lesquels sont les plus durables, en fonction des critères analysés, en regardant non seulement la note finale mais aussi et surtout l'ensemble des critères de l'arbre. On pourra alors analyser les conséquences sur un ensemble de critères de durabilité de la modification d'une pratique destinée *a priori* à améliorer un critère de base.
- Une deuxième utilisation possible du modèle est d'évaluer quelles modifications du contexte actuel (réorientation des aides, mécanismes d'incitation, système d'assurance, stratégies de filières, etc.) sont nécessaires pour rendre un système de culture durable (rentable, acceptable, etc.) alors qu'il ne l'est pas dans le contexte actuel. Cette deuxième utilisation est possible grâce à la prise en compte dans DEXiPM de critères qui décrivent ces éléments de contexte.

3. Exemple de systèmes de culture proposés et évalués avec DEXiPM dans ENDURE

Nous présentons ici un exemple d'évaluation de systèmes de culture qui ont été proposés dans le cadre de ENDURE[4], en remobilisant des systèmes du projet ADAR SDC innovants (Reau et Landé, 2006).

Deux systèmes innovants (SDCi) ont été proposés à partir d'un système conventionnel actuel (Tableau 1). Le système actuel considéré est intensif, avec une rotation colza-blé-orge, où la protection est basée sur l'utilisation de pesticides et de variétés résistantes et où l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est estimé à 5.8, en se basant sur le rapport Ecophyto R&D grandes cultures (Brunet et al., 2010). Les risques de bioagresseurs sont surtout les adventices d'automne, les insectes sur colza et les maladies (septoriose et sclérotinia). Pour le premier SDCi, on a ajouté dans la succession un tournesol et un blé, ainsi qu'une CIPAN[5] avant le tournesol. Pour le deuxième système, on a remplacé l'orge d'hiver par une orge de printemps et on a ajouté deux années de luzerne et un triticale. On diversifie donc dans les deux cas les cultures de la rotation, qui est allongée, et les périodes de semis. Le blé est semé plus tard pour permettre des faux semis et éviter le traitement contre les pucerons d'automne. L'introduction d'une culture pérenne pour le SDCi 2 renforce l'effet positif sur les adventices, et pour ce même SDCi, le colza et l'orge de printemps sont semés plus tôt avec un effet de compétitivité sur les adventices et sur le phoma. Pour le SDCi 1, un mélange variétal est semé pour diminuer les maladies foliaires. On réalise également des désherbages mécaniques, possibles grâce à la diminution des densités de semis. La fertilisation azotée est réduite, ce qui permet de ne pas utiliser de régulateurs de croissance. Pour le SDCi 2, on utilise un contrôle biologique contre le sclérotinia du colza et on réalise deux types d'aménagements paysagers : semis de navette autour du colza pour attirer les méligèthes, et entretiens-semis des bordures pour favoriser les auxiliaires. Ceci doit nous permettre théoriquement d'atteindre un IFT de 2.2 pour le premier SDCi et de 0.4 pour le second.

En ce qui concerne la durabilité globale (Figure 4), DEXiPM indique une durabilité faible (low) pour le SDCi 1 et moyenne (medium) pour le SDCi 2, malgré les modifications profondes par rapport au système de culture conventionnel actuel. Par rapport à ce dernier, la durabilité sociale est améliorée pour le SDCi 1 alors que sa durabilité économique est altérée. En revanche, avec le SDCi 2, la durabilité économique est maintenue et les durabilités sociales et environnementales sont améliorées. Compte-tenu du nombre de critères retenus, DEXiPM est donc peu sensible aux modifications de

[4] D'autres systèmes innovants adaptés au Royaume-Uni et au Danemark ont été construits en utilisant la même démarche mais ne sont pas reportés ici.

[5] CIPAN : Culture intermédiaire piège à nitrate

système lorsque l'on compare les niveaux très agrégés de la durabilité. Néanmoins, de nombreuses différences sont observées au niveau des critères inférieurs.

Tableau 1. Principaux éléments descriptifs des systèmes de culture analysés

	SDC actuel	SDC innovant 1	SDC innovant 2
Rotation	colza–blé–orge	colza–blé–orge–(CIPAN)–tournesol–blé	colza–blé–orge printemps–luzerne–luzerne–blé– (moutarde)–tournesol–triticale
Pesticides			
IFT moyen annuel (ha-^{1}.an^{-1})	5.8 Ecophyto R&D	2.2	0.4
Fertilisation			
N (kg.ha^{-1}.an^{-1})	> 150	50-150	50-150
P (kg.ha^{-1}.an^{-1}, unité P2O5)	0-50	0-50	0-50
K (kg.ha^{-1}·an^{-1}, unité K2O)	50-100	50-100	50-100
Travail du sol			
Labour (nb moyen /an)	0	0.2	0.17
Travail superficiel (nb moyen /an)	2	7.8	6.5
Remarques		Mélanges variétaux	Contans® Aménagements paysagers

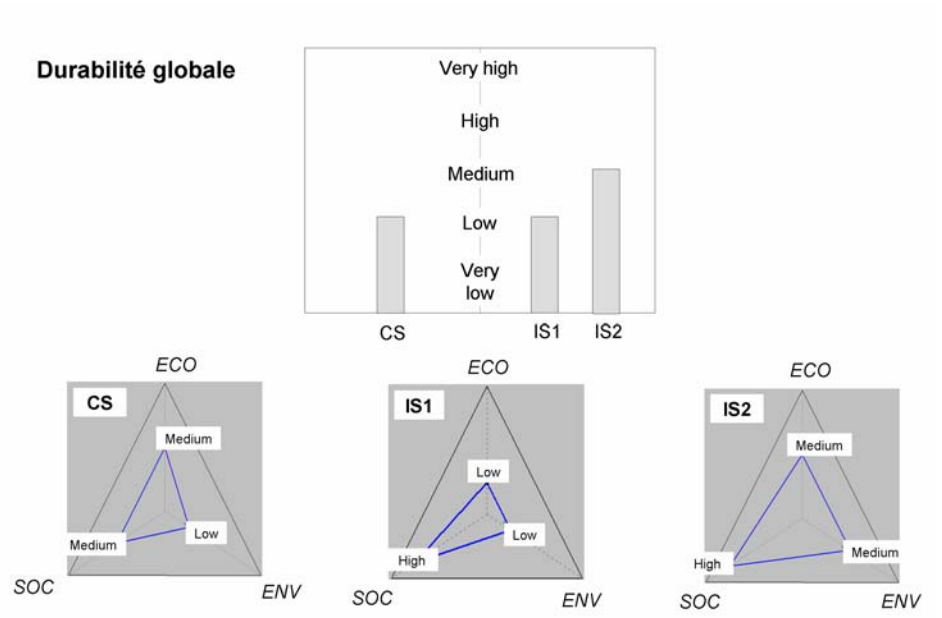
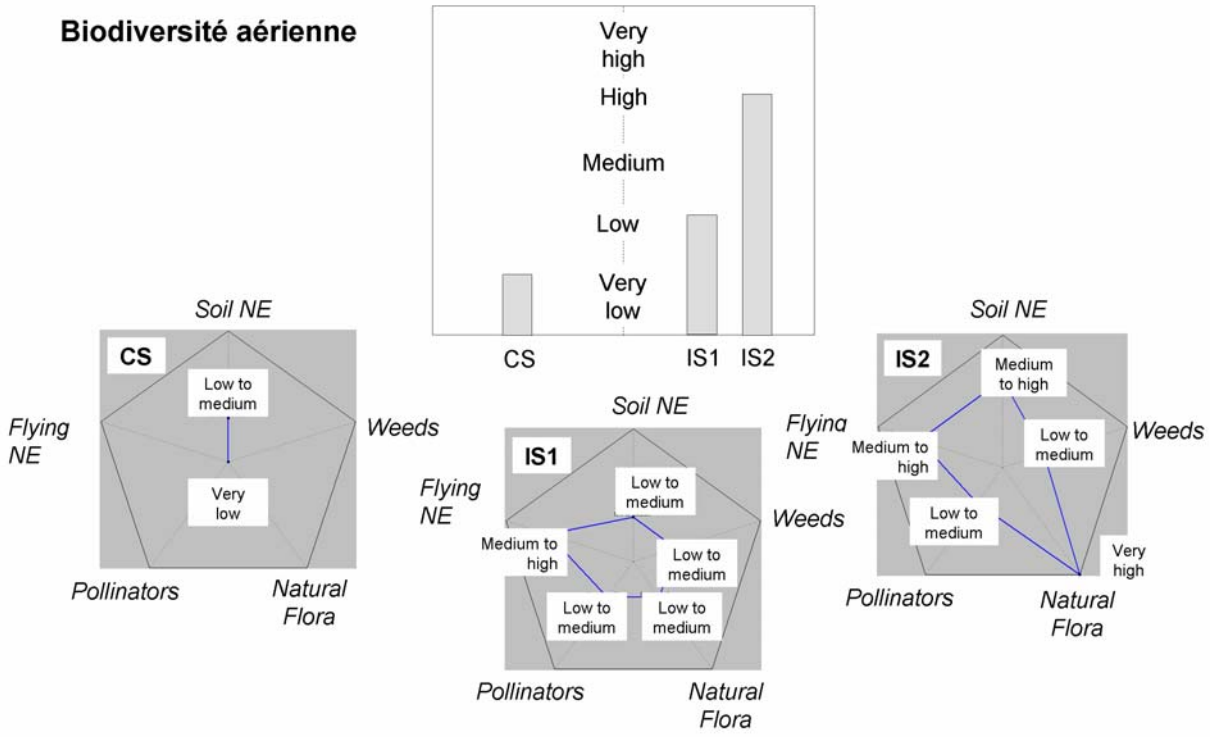


Figure 4. Evaluation de la durabilité globale des systèmes de culture avec DEXiPM. CS : système intensif actuel, IS 1 et 2 : systèmes innovants. ECO: durabilité économique ; ENV: durabilité environnementale ; SOC: durabilité sociale.

Pour les critères de la branche biodiversité (Figure 5), 4 des 5 critères présentés ici sont améliorés pour le SDCi 1 par rapport au SDC actuel : ennemis naturels volants, polinisateurs, flore naturelle et adventices. Il apparaît aussi que l'ensemble des critères pour SDCi 2 est amélioré par rapport au SDC actuel ainsi que les critères « flore naturelle » et « ennemis naturels du sol » par rapport au SDCi 1. Ces

dernières différences s'expliquent essentiellement par les aménagements paysagers (connectivité et qualité des bordures mises en place). Ceci illustre l'importance d'utiliser DEXiPM comme un tableau de bord des performances des systèmes.

Figure 5. Evaluation de la biodiversité aérienne des systèmes de culture avec DEXiPM. CS : système intensif actuel, IS 1 et 2 : systèmes innovants. NE: natural enemies/ennemis naturels.



Comme indiqué précédemment, DEXiPM peut d'abord être utilisé pour analyser des systèmes de culture et les comparer entre eux et proposer des améliorations de ces systèmes vis à vis de la durabilité. Par exemple, dans le critère 'resource use' (dépendant aussi de l'eau, de l'énergie, et des terres), le critère 'engrais P et K' a la même valeur pour les systèmes présentés (high to medium). Certains critères de la durabilité environnementale des deux systèmes innovants peuvent donc être améliorés si on diminue la quantité d'engrais apportée aux systèmes, de même que la durabilité économique (diminution du coût de production). DEXiPM peut aussi être utilisé pour évaluer les modifications du contexte qui pourraient rendre un système innovant plus durable. Par exemple, pour l'évaluation des systèmes de culture innovants ci-dessus, on a considéré qu'il pouvait y avoir une pénalité dans le prix de vente du fait du mélange variétal pour le blé pour le SDCi 1 et du fait de la présence de luzerne deux années consécutives dans le SDCi 2, qui pourrait être difficile à vendre si les élevages sont peu nombreux dans la région. Sans cette pénalité, la marge brute du SDCi 2 devient égale à celle du système conventionnel actuel et non plus inférieure. Un autre exemple de l'importance de la prise en compte du contexte concerne la partie sociale. Dans l'évaluation, il a été supposé que l'agriculteur dispose d'un encadrement (disponibilité élevée en conseil pour le système conventionnel et moyenne pour les deux systèmes innovantsmais appartenance à un réseau d'agriculteurs) favorisant la maitrise des deux systèmes innovants. Ces hypothèses aboutissent à une probabilité d'adoption et à une durabilité sociale élevées pour l'ensemble des systèmes de culture innovants. Si on suppose que les agriculteurs ne disposent pas de ce réseau, la probabilité d'adoption et la durabilité sociale deviennent moyennes pour les deux systèmes innovants.

Conclusion et perspectives

L'exemple de construction de systèmes innovants décrit dans cet article illustre comment un outil comme DEXiPM peut aider l'utilisateur à évaluer des systèmes innovants, identifier les points critiques en termes d'impacts qui restent à « corriger » et déterminer les conditions qui permettraient de faciliter la mise en œuvre et l'appropriation de ces systèmes.

La plupart des connaissances disponibles sur la durabilité ont été regroupées dans l'arbre de DEXiPM. Ce modèle permet donc d'avoir un tableau de bord complet des critères de durabilité et pas uniquement ceux liés à l'utilisation des pesticides. Comme la plupart des modèles à base de DEXi, la démarche d'évaluation utilisant DEXiPM fournit une bonne base de discussion autour des Systèmes Innovants, qui commence dès les descriptions du système et du contexte qui sont entrées dans le modèle. La conception de DEXiPM a permis aussi d'identifier des lacunes de connaissances sur l'impact des systèmes de culture sur la durabilité et, à ce titre, de tels outils peuvent contribuer à la définition de priorités de recherche.

Enfin, dans DEXiPM, le contexte de l'évaluation est explicitement pris en compte : contextes pédoclimatique, social, politique et économique, ce qui permet d'étudier et d'analyser les modifications qui rendraient un SDCi acceptable, pour l'agriculteur (ex : rentabilité), les organismes de collecte (ex : cultures vendables et niveaux de production suffisants) et la société (risques environnementaux réduits, entretien du paysage, etc.). Le rôle des politiques publiques et des mécanismes d'incitation peut ainsi être évalué.

A ce titre, DEXiPM constitue un outil d'aide à la réflexion et à la médiation entre chercheurs, acteurs des filières de production et pouvoirs publics.

DEXiPM est, dans sa version actuelle, entièrement qualitatif, ce qui permet l'évaluation *ex ante* de systèmes innovants où aucune donnée quantitative ne serait disponible. Cependant, la prise en compte d'un grand nombre de critères d'entrée et de critères agrégés, et donc la taille importante de l'arbre, ainsi que l'estimation des critères à l'aide d'un nombre assez faible de classes qualitatives (5 au maximum) participent à la perte de sensibilité quand on atteint les critères les plus agrégés. Une analyse de sensibilité du modèle est en cours afin d'évaluer les conséquences de la complexité de l'arbre de DEXiPM sur la sensibilité des sorties aux critères d'entrées et aux variations des fonctions d'utilité. Ce manque de sensibilité affecte surtout l'arbre complet qui sert à caractériser de manière très large la durabilité et identifier les points forts et faibles. Ceci pointe aussi une limite attendue de ce modèle : le modèle va moins « réagir » à des systèmes moins en rupture (choix d'une variété plutôt qu'une autre, modification de l'organisation spatiale du SDC). L'évaluation et le tri de systèmes de culture en fonction de finalités et préférences spécifiques pourrait s'appuyer sur un arbre « simplifié » ne prenant en compte que les attributs jugés « critiques » ou prépondérants d'après les acteurs.

On peut noter que la variabilité interannuelle des niveaux d'attaques de bioagresseurs, liée par exemple au climat, n'est pas explicitement prise en compte. Cette variabilité peut néanmoins être appréhendée par l'utilisateur de l'outil, grâce à des critères de jugement comme le critère 'production risk' dans la partie économique, qui permet de moduler le critère 'profitabilité' si l'utilisateur estime qu'il y a un risque que la marge brute estimée ne soit pas atteinte, par exemple du fait d'une possibilité de plus forte attaque d'un bioagresseur donné si les conditions sont favorables. Ce problème de la variabilité interannuelle mériterait cependant d'être approfondi.

Contrairement à MASC par exemple (Sadok et al. 2009), les entrées de DEXiPM ne sont pas des indicateurs calculés mais une description directe du Système de Culture et du contexte, ce qui permet d'éviter une étape intermédiaire de calcul et de s'adapter aisément au niveau de connaissances disponibles sur les performances des systèmes. La flexibilité de DEXiPM prend alors toute son importance et il est possible d'estimer de façon plus précise des critères situés à des niveaux supérieurs dans l'arbre quand cela est possible, en particulier pour de l'évaluation *ex post*. Par

exemple, certains critères agrégés peuvent être estimés quantitativement à l'aide de modèles ou méthodes existantes (Analyses de cycle de vie, INDIGO, etc.).

Le développement de DEXiPM et son extension à d'autres filières, comme la vigne, les légumes de plein champ ou les vergers se poursuivra dans le cadre du réseau ENDURE et du projet PURE que l'INRA a déposé auprès de l'UE en janvier 2010. Plus généralement, la dynamique des outils DEXi pour l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture, dont font partie DEXiPM ou MASC, va continuer à travers divers projets de recherche, notamment dans le cadre du GIS GC-HP2E.

De tels outils d'évaluation *ex ante,* qui facilitent la mise en œuvre d'un processus de conception innovante, devraient encourager une gestion durable des innovations et ainsi contribuer à redonner confiance dans les procédures d'élaboration de la décision publique.

Références bibliographiques

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (Editeurs), 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, Expertise scientifique collective INRA-CEMAGREF, 2005/12. 845 p.

Barriuso E., Benoit P., Dubus I.G., 2008. Formation of pesticide non-extractable (bound) residues in soil: Magnitude, controlling factors and reversibility. Environmental Science and Technology 42, 1845-1854.

Bedos C., Cellier P., Calvet R., Barriuso E., 2002. Occurence of pesticides in the atmosphere in France. Agronomie 22, 35-49.

Bockstaller C., Girardin P., Van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. European Journal of Agronomy 7, 261-270.

Bockstaller C., Guichard L., Keichinger O., Girardin P., Galan M.B., Gaillard G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 223-235.

Bohanec M., Messéan A., Scatasta S., Angevin F., Griffiths B., Krogh P.H., Znidarsic M., Dzeroski S., 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. Ecological Modelling 215, 247-261.

Bohanec M., 2009. DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana. http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html.

Brunet N., Debaeke P., Delos M., Guérin O., Guichard L., Guindé L., Mischler P., Munier-Jolain N., Omon B., Rolland B., Viaux P., Villard A., 2010. Ecophyto R&D. Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires, volet 1. Tome II: Analyse comparative des différents systèmes en grandes cultures, France, INRA Editeur, 218 p.

Jeanneret P., Baumgartner D., Freiermuth R., Gaillard G., 2006. Méthode d'évaluation de l'impact des activités agricoles sur la biodiversité dans les bilans écologiques. SALCA-BD. Rapport Agroscope. 67 p.

Jeuffroy M.H., Bergez J.E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J.M., Reau R., Surleau-Chambenoit C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In : R. Reau et T. Doré (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables: quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer. Paris, Educagri Editions, pp 109-128.

Kolpin D.W., Barbash J.E., Gilliom R.J., 2000. Pesticides in ground water of the United States, 1992-1996. Ground Water 38, 858-863.

Lançon J., Reau R., Cariolle M., Munier-Jolain N., Omon B., Petit M.S., Viaux P., Wery J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. In : R. Reau et T. Doré (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables: quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer. Paris, Educagri Editions, pp 91-107.

Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trometter M., 2008. Agriculture et biodiversité, valoriser les synergies. Rapport d'expertise collective INRA.

http://www.inra.fr/l_institut/expertise/expertises_realisees/agriculture_et_biodiversite__1

Lichtfouse E., Navarrete M., Debaeke P., Souchere V., Alberola C., Menassieu J., 2009. Agronomy for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 1-6.

Meynard J.M., 2008. Introduction générale - Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. In : R. Reau et T. Doré (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables: quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer. Paris, Educagri Editions, pp 11-27.

Nemecek T., Richthofen J.S.v., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. European Journal of Agronomy 28, 380-393.

Omon B., Lagaise B., Reau R., 2010. Evaluation de systèmes de culture pratiqués par des agriculteurs innovants dans l'Eure. Séminaire "Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture", 9 et 10 mars 2010, Paris, pp 7-8.

Reau R., Landé N., 2006. Evaluation *a priori* de systèmes de cultures innovants conçus par des experts et adaptés à des contextes régionaux. Rapport final de l'action 1. Projet ADAR « systèmes de culture innovants ». 27 p.

Ricci et al. 2007. Network of Excellence ENDURE (European Network for the Durable Exploitation of crop protection strategies, contract number 031499).

Richter O., Zwerger P., Böttcher U., 2002. Modelling spatio-temporal dynamics of herbicide resistance. Weed research 42, 52-64.

Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messéan A., Doré T., 2009. MASC: a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. Agronomy for Sustainable Development 29, 447-461.

Sebillotte M., 1990. Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : L. Combe et D. Picard (Eds.), Les systèmes de culture. INRA, Paris, pp 165-196.