

PERSYST, un outil d'estimation des PERformances agronomiques de SYSTèmes de culture - Adaptation à l'agriculture biologique en Île-de-France

Guichard L.¹, Ballot R.¹, Glachant C.², Aubert C.²

¹ UMR 211 agronomie, INRA / AgroParisTech, F-78 850 Thiverval-Grignon

² Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne, 418 rue Aristide Briand, F-77350 Le Mée sur Seine

Correspondance : Laurence.Guichard@grignon.inra.fr

Résumé

PERSYST est une application web permettant d'estimer *ex ante* le rendement des cultures en intégrant explicitement l'effet du système de culture dans lequel elles s'insèrent (rotation et itinéraires techniques). L'estimation du rendement est complétée par des indicateurs environnementaux et économiques calculés à l'échelle de la rotation, caractéristique du système de culture. En 2012, un travail spécifique relatif à la prise en compte des pratiques de gestion des adventices et d'apports organiques, indispensable pour une utilisation en agriculture biologique (AB) a été mené. Il a conduit à paramétrer l'outil en Île-de-France pour 8 types de sol et 18 cultures. Ce paramétrage a été validé sur des situations courantes et reste à évaluer sur des situations moins fréquentes. Une fois complétée, cette validation ouvrira la possibilité de tester l'outil dans des situations d'usage telles que l'accompagnement à la réflexion sur leurs systèmes de culture, d'agriculteurs en AB ou candidats à la conversion.

Mots-clés : Agriculture Biologique, systèmes de culture, modèle opérationnel, élicitation d'expertise, rotation

Abstract: PERSYST, a model for *ex ante* assessment of cropping systems performances. Adaptation to organic farming in the Ile-de-France region

PERSYST is a web software for *ex ante* assessment of crop yield that takes explicitly into account the cropping system (i.e. crop rotation and crop management) perspective. Environmental and economic indicators are calculated at crop rotation scale to complete the previous yield assessment. In 2012, a research program enabled the model adaptation to organic systems, taking into account weed management and organic inputs supply. This program also allowed to parameterize the web software in the Ile-de-France region for 8 soil types and 18 crops. Parameterization has been validated for the most common situations. Validation remains to be done for less common ones. When completed, validation will make it possible to test the software in promising situations of use, such as supporting organic farmers analyzing their current cropping systems, or supporting farmers thinking about converting their farms to organic farming.

Key words: Organic farming, cropping systems, operational tool, expert elicitation, crop rotation

Introduction

La production agricole est aujourd'hui soumise à de nouveaux enjeux concernant notamment l'environnement, la qualité des produits et le paysage... Ce nouveau « corps de contraintes » et son évolution souvent rapide posent le problème de l'évaluation économique et environnementale des systèmes de culture actuels, et de la conception de nouveaux systèmes de culture satisfaisant au mieux ces

nouvelles demandes. Mettre au point des systèmes de culture « innovants » par expérimentation est long et permet souvent de comparer peu de systèmes *a priori* intéressants. Une voie privilégiée pour concevoir des systèmes de culture repose sur l'utilisation de modèles facilitant l'évaluation d'un grand nombre de systèmes virtuels (Rossing *et al.*, 1997 ; Jeuffroy *et al.*, 2008 ; Meynard, 2008).

Or, malgré le développement important des modèles agronomiques dans les vingt dernières années, du fait de la complexité des agrosystèmes et des interactions en jeu, peu de modèles simulent aujourd'hui l'effet du milieu, de la succession de cultures, de l'itinéraire technique et de leurs interactions sur des variables agronomiques (rendement, qualité), économiques et environnementales (risque de pollution de l'air et de l'eau, consommation de ressources fossiles...). De plus, lorsqu'ils existent (APSIM (Wang *et al.*, 2002), CROPSYST (Stöckle *et al.*, 2003), DSSAT (Jones *et al.*, 2003)), l'effet du précédent cultural sur les bioagresseurs et sur la gestion de l'azote, et les conséquences sur le rendement, éléments indispensables au raisonnement de rotation de cultures, sont rarement présents. Ils prennent enfin peu en compte de manière explicite l'effet de l'itinéraire technique (et des interactions entre choix techniques) sur les performances des cultures.

La plupart des modèles agronomiques actuels peuvent donc difficilement être utilisés pour simuler l'effet de la rotation des cultures sur le rendement, ou pour raisonner la cohérence des techniques culturales permettant de gérer les fournitures azotées et de réduire les risques d'enherbement et de maladies ou de ravageurs, ou encore pour identifier des systèmes de culture performants et durables, un des enjeux majeurs de l'évolution des systèmes.

Dans le même temps, on constate encore une sous-valorisation des expériences et expertise des acteurs de l'agriculture pourtant souvent détenteurs de savoirs non formalisés, non publiés et de fait non valorisés.

C'est de ce double constat qu'est née l'idée de construire un cadre générique de modélisation apte à permettre l'estimation des performances des systèmes de culture. L'UMR agronomie de Grignon a ainsi développé un prototype d'outil de caractérisation agronomique et environnementale des systèmes de culture : l'outil PERSYST (PERformances des SYSTèmes de culture (Guichard, 2008)) fonctionne sur la base d'un modèle agronomique qui rend compte de l'effet de la succession de cultures et des itinéraires techniques de chaque culture sur leur production et leurs performances environnementales à partir de relations simples, de données d'experts et de modèles existants. Il prend en compte de manière simple les effets de la rotation et des principaux éléments de l'itinéraire technique pour estimer le rendement attendu d'une situation culturale décrite par le système de culture, dans un type de sol, sous la variabilité climatique locale. Il est paramétré à l'échelle de la région ou du département par mobilisation des connaissances d'experts dans le cadre d'une méthodologie *ad hoc* (Guichard *et al.*, soumis).

Le domaine de validité de l'outil excluait jusqu'à présent les systèmes de culture en agriculture biologique (AB) du fait de plusieurs simplifications opérées sur le modèle initial : non-prise en compte des pratiques de gestion des adventices et des apports organiques notamment. Des réflexions menées en 2012 en Ile-de-France ont permis de corriger ces limites et donc d'étendre le domaine de validité aux systèmes de culture en AB, tout en le paramétrant pour la région Ile de France.

Cet article présente l'architecture générale de PERSYST et le travail d'adaptation et de paramétrage réalisé en Ile-de-France. Après une première partie resituant les éléments de contexte spécifiques ayant guidé le travail mené en Ile-de-France, une présentation générale de PERSYST sera proposée, permettant au lecteur de comprendre le fonctionnement général de l'outil et les spécificités de son paramétrage. La troisième partie présentera les enrichissements proposés et les résultats obtenus en Ile-de-France.

1. Contexte et objectifs du travail mené en Ile-de-France

Le plan d'action « Agriculture Biologique – horizon 2012 » proposé en 2007 et repris dans le cadre du Grenelle de l'environnement visait un triplement des surfaces agricoles françaises en AB d'ici 2012. Cette priorité nationale a été déclinée localement. En Ile-de-France particulièrement, la Région affichait une volonté et un objectif ambitieux de développement des surfaces en AB dans les prochaines années (Poursinoff, 2008). Cet objectif ambitieux est de fait loin d'être atteint aujourd'hui. En effet, le nombre de candidats potentiels à la conversion ou à l'installation est limité du fait de freins et d'incertitudes réels : changements importants de pratiques et de repères que cela représente pour des agriculteurs plus « conventionnels » et incertitudes en matière de performances techniques et de viabilité économique (et de variabilité) de ces modes de conduite (Lamine et Bellon, 2009).

Pour s'engager vers des systèmes de culture très économes en intrants, ou biologiques, les agriculteurs requièrent des informations fiables et adaptées localement sur les conséquences prévisibles de différents choix techniques possibles sur la production et ses performances économiques et environnementales. Cette demande renforce la nécessité de disposer d'outils d'accompagnement interactifs, facilement appropriables par les acteurs concernés, qui permettent au binôme « agriculteur candidat / conseiller » d'explorer des possibles en matière de modes de conduite et de systèmes et d'en estimer *a priori* les performances techniques et la viabilité économique. Pour accroître la fiabilité des résultats issus de ces outils, ils doivent être renseignés à partir d'informations quantitatives régionalisées.

C'est dans ce contexte qu'est né le projet (i) de poursuivre le travail de formalisation d'expertise développé pour PERSYST en complétant la démarche pour étendre son domaine de validité aux modes de conduite biologiques ; (ii) de valoriser les connaissances et l'expertise disponibles en agriculture biologique dans la région Ile-de-France (chez les conseillers, les agriculteurs et dans des dispositifs expérimentaux) en vue de paramétrer l'outil pour cette région.

Ce projet vise à fournir aux acteurs de l'agriculture (binôme agriculteur / conseiller technique en priorité) un outil logiciel leur permettant d'évaluer *ex ante* les performances agronomiques, environnementales et économiques des systèmes de culture conduits en AB (par souci de simplification, ces deux dernières dimensions ne seront pas présentées dans l'article). Cet outil, paramétré pour l'Ile-de-France, est de nature à faciliter la gestion de ces systèmes de culture chez les agriculteurs déjà convertis, voire aussi l'accompagnement des agriculteurs candidats à la conversion.

2. Présentation générale du modèle PERSYST

2.1 Architecture générale

PERSYST est un modèle de système de culture qui simule les conséquences sur le rendement des cultures de la rotation dans laquelle elles s'insèrent et des conduites mises en œuvre. Ses principales caractéristiques (et spécificités par rapport aux modèles de cultures existants) sont (i) une conception à partir de la mobilisation des connaissances d'experts, de conseillers ou de praticiens, formalisées dans une démarche de modélisation, (ii) un fonctionnement à l'échelle pluriannuelle intégrant la variabilité climatique, (iii) la prise en compte des effets de la rotation et des conséquences de choix en termes d'itinéraire technique (implantation, gestion de l'azote, niveau de protection des cultures), (iv) la prise en compte des caractéristiques des milieux.

L'évaluation des performances agronomiques par l'outil passe par différents niveaux de construction du rendement intégrant progressivement l'effet du milieu (module « rendement maximal »), de la rotation (module « effet rotation ») et des itinéraires techniques (module « effet itinéraire technique ») (Figure 1).

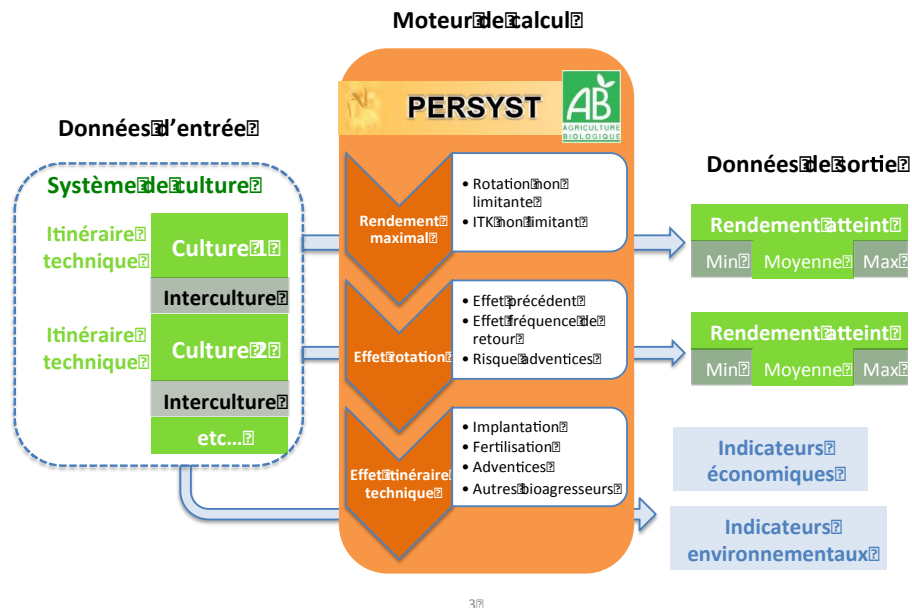


Figure 1: Présentation de l'architecture générale de PERSYST

Le premier module de PERSYST initialise un rendement potentiel compte-tenu de la culture, de la région et du type de sol considérés, trois variables constituant les données d'entrée. Les données de sortie sont le rendement potentiel de la culture, exprimé sous forme d'une gamme de valeurs à laquelle est associée une distribution de probabilités reflétant la variabilité climatique.

Un second module réduit le rendement potentiel des pertes dues à la rotation. Il prend en compte deux facteurs : l'effet du précédent cultural (Sebillotte, 1990) et l'effet de la fréquence dans la rotation de cultures hôtes de mêmes pathogènes. Ces effets intègrent des facteurs biologiques (pression de maladies telluriques par exemple), physiques (dégradation de la structure due à la période de récolte par exemple) et chimiques (moindre disponibilité en azote due à la dégradation des pailles par exemple). Les données d'entrée sont la nature et l'ordre de succession des cultures et intercultures composant la rotation. Les données de sortie sont pour chaque culture les pertes de rendement dues à la rotation, qui peuvent être exprimées sous forme d'une valeur unique ou d'une gamme de valeurs associée à une distribution de probabilités.

Le troisième module réduit le rendement des pertes dues à l'itinéraire technique. La description des itinéraires techniques est fortement simplifiée et s'inspire du modèle agronomique de Betha qui simule l'effet d'un ensemble de choix techniques sur la production et l'environnement du blé tendre (Loyce *et al.*, 2002). Elle se fait par combinaison d'options techniques, décrites selon de grands types d'intervention culturale (fongicide, insecticide, désherbage...) qui ont le plus d'incidence sur la production (rendement) et le milieu (sorties environnementales). Ce choix permet de conserver une « indépendance » vis-à-vis de l'évolution des spécialités commerciales utilisées. Et surtout il rend possible une future génération de systèmes de culture par le jeu de combinaisons automatisées d'options techniques et de rotations.

Le Tableau 1 décrit un exemple des principales options techniques retenues sur le blé.

Le renseignement des conséquences sur le rendement des différentes combinaisons possibles d'options techniques s'appuie sur la méthode d'agrégation d'attributs multi-attributs hiérarchique DEXi (Bohanec *et al.*, 2008) décrite dans la section suivante (2.2).

Tableau 1: Exemple des options techniques retenues par intervention culturale pour le blé tendre

Opération culturale	Modalités optionnelles
Travail du sol	« labour », « travail réduit » ou « semis direct »
Choix variétal	« rustique » ou « normal (ITK référence) »
Date de semis	« normale (ITK référence) », « avancée » ou « retardée »
Densité de semis	« faible », « normale » ou « forte »
Gestion de l'azote	« excédentaire » et « équilibrée ou déficitaire »
Protection insecticide	Oui/non
Protection fongicide	« impasse », « allégé », « normale » (ITK référence), « renforcé »
Régulateur	Oui/non

Les aléas climatiques sont pris en compte à deux niveaux :

- Au niveau du rendement potentiel : il est chaque année issu d'un tirage entre les deux bornes d'une fourchette caractérisant l'amplitude de variation liée au climat (excès ou déficit hydrique, températures échaudantes...) pour une espèce et un type de sol donnés. Ce tirage est orienté selon une loi de distribution exprimée par les acteurs (voir section 2.2).
- Au niveau des sorties environnementales, lorsqu'il s'agit d'émissions dépendant du climat (cas des émissions azotées par exemple). Le programme intègre un module de génération de scénarios climatiques pour l'ensemble de la rotation par tirage aléatoire dans une base de données climatiques locales. Le tirage aléatoire répété de scénarios permet d'assortir d'une certaine variabilité les résultats moyens des indicateurs de performance intégrant le climat.

2.2 Méthode de paramétrage de PERSYST

L'originalité de l'approche de modélisation employée réside dans la mobilisation conjointe de données bibliographiques et des connaissances des experts, des conseillers ou des praticiens (agriculteurs, éleveurs...). Cette méthodologie fait donc appel aux savoirs locaux (Girard et Navarrete, 2005) et à leur « formalisation » dans une démarche de modélisation qualitative. Le paramétrage est obtenu dans le cadre d'une démarche de questionnement formalisée et reproductible (Guichard *et al.*, soumis) adaptée de Francisco et Anderson (1972). Il est réalisé à partir de questionnement d'experts ou toute autre personne référente de l'agriculture de la région considérée. Il est local (régional) mais conduit à une organisation des connaissances génériques, qui peut être reprise lors des paramétrages dans d'autres régions françaises.

La méthode de questionnement articule un questionnement individuel de chaque expert suivi de séquences collectives de « validation ». Cette démarche permet de recueillir une expertise non consensuelle, chacun des experts mobilisant pour répondre ses propres référentiels et connaissances. La synthèse de l'ensemble des réponses est dans un deuxième temps soumise au collectif d'experts. Cette restitution au groupe est l'occasion de discuter des résultats, de leur cohérence et de leur variabilité et au final de leur « acceptation » par le collectif.

Le questionnement auquel ont été soumis les experts porte sur le paramétrage des trois thèmes suivants : (i) potentialités des cultures, (ii) effet rotation, (iii) effet itinéraire technique.

Concernant les potentialités des cultures, les experts s'expriment sur les valeurs des rendements potentiels des différentes cultures retenues sur la région, dans les types de sols étudiés. Le potentiel est défini comme le rendement couramment observé en absence de problèmes parasitaires et sans autre facteur limitant que le climat (Boiffin *et al.*, 1982). Pour répondre à cette question, les experts sont invités à :

- Décrire ce potentiel pour des situations culturelles correspondant à des précédents favorables (qu'ils spécifient),
- Décrire les grandes caractéristiques de l'itinéraire technique (appelé par la suite ITK de « référence ») permettant d'atteindre ce potentiel,
- Fournir les réponses sous la forme d'une fourchette et d'une distribution dont les bornes inférieures et supérieures correspondent aux années climatiques respectivement défavorables et favorables. Afin de ne pas caractériser les bornes par de vrais extrêmes climatiques, par définition très rares, et entraînant une très forte amplitude des réponses, la question leur est posée sous la forme suivante « *selon vous, quel est le rendement minimum obtenu 9 années sur 10, et quel est le rendement maximum atteignable 2 années sur 10 – dans les conditions de précédent favorable et d'itinéraire de référence (non limitant) décrits précédemment, par culture et type de sol* ». Cette expression sous forme de quantile permet de limiter l'incertitude dans la réponse fournie (plus grande homogénéité des situations décrites pas chacun).

Concernant l'effet rotation, les experts sont conviés à se placer dans la situation d'une culture, dans un sol, derrière un précédent favorable identifié, et conduite avec l'ITK de « référence ». Le questionnement porte alors sur les conséquences éventuelles sur le rendement d'une modification du précédent (en conservant l'ITK de référence) et sur les raisons de ces modifications (maladies telluriques ? structure du sol ? date de semis retardée ?...). Ils sont également questionnés sur l'effet sur le potentiel de la fréquence de retour de la culture (ou d'une culture hôte d'un même parasite) dans la succession. Ce potentiel de rendement d'une culture est-il différent selon la fréquence de cette culture dans la rotation ? Par exemple, le colza dans une succession courte colza-blé-orge a-t-il le même potentiel qu'un colza dans une succession plus longue où le retour du colza est moins fréquent ?

Enfin, la troisième partie du paramétrage porte sur l'effet sur le rendement de combinaisons d'options techniques différentes de celles décrivant l'itinéraire de référence. Ce questionnement vise à (i) identifier les modifications de l'ITK « de référence » qui permettent de rattraper pour partie ou totalement les pertes de rendement évoquées précédemment et chiffrer ce rattrapage, (ii) aborder de façon plus générale les principales interactions entre techniques connues et leurs conséquences agronomiques. Par exemple, un risque de parasitisme fongique élevé en situation de semis précoce et dense peut être compensé par une protection fongicide importante ou une protection plus allégée permise par une date de semis plus tardive d'une variété plus « rustique »... sous réserve que la dose d'azote soit cohérente avec cette stratégie.

Le renseignement des conséquences sur le rendement des différentes combinaisons possibles d'options techniques s'appuie sur la méthode d'agrégation d'attributs multihierarchique DEXi (Bohanec et Rajkovic, 1990 ; Bohanec, 2011). Elle combine certains éléments issus de systèmes experts et des éléments du domaine de l'apprentissage automatique (« machine-learning », l'un des champs de l'intelligence artificielle) (Sadok et al., 2008). L'application de cette démarche à notre problématique a consisté à décomposer la perte potentielle de rendement sous l'effet d'un itinéraire technique par une prise en compte explicite des principaux processus biophysiques en œuvre et de leurs interactions. Une arborescence permet de rendre compte de cette articulation explicite des connaissances des experts. Les interventions culturales (attributs de base) sont caractérisées par des variables qualitatives qui représentent la diversité de stratégies que l'on souhaite modéliser. Par exemple sur le blé, l'attribut choix variétal est important. Il prend les valeurs de classes suivantes : « normal » (c'est-à-dire variété plutôt productive et sensible) et « variété rustique » (c'est-à-dire multi-résistante, mais de productivité inférieure) (Tableau 1). A cette étape, les variables quantitatives sont rendues qualitatives. Ainsi, l'attribut « niveau de fertilisation azotée » a 2 valeurs possibles : « excédentaire » et « équilibrée ou déficitaire », en fonction du bilan d'azote calculé par l'outil Persyst (Figure 2).

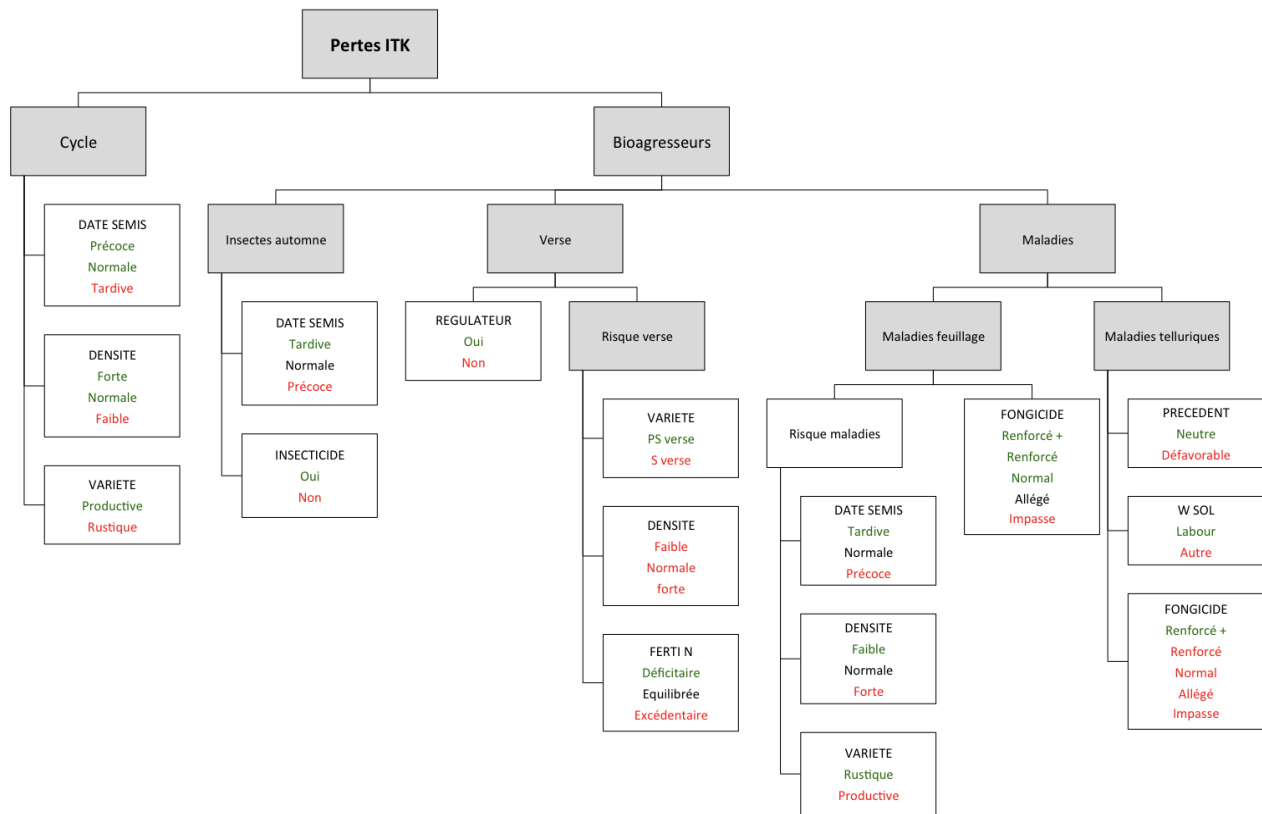


Figure 2: Exemple d'arborescence détaillant les pertes de rendement sur le blé en Bourgogne : attributs basiques, attributs agrégés et valeurs des classes.

A chaque nœud de l'arbre (ou attribut d'agrégation), une fonction d'utilité est définie pour agréger les attributs sous-jacents. Cette fonction d'utilité prend la forme d'une table d'agrégation et rend explicite les règles de décision mobilisées dans le croisement des variables (Tableau 2).

Tableau 2 : Exemple de fonction d'utilité pour renseigner l'attribut agrégé de pertes « maladies du feuillage » (paramétrage Bourgogne)

FONGICIDE	Risque maladies du feuillage	Pertes maladies du feuillage
Allégé Normal Renforcé ou Renforcé + TS	Faible Moyen Fort	Classe 0
Normal Allégé	Fort Moyen	Classe 1
Allégé	Fort	Classe 2
Impasse	Faible	Classe 3
Impasse	Moyen	Classe 4
Impasse	Fort	Classe 5

Cette structuration est suffisamment générique pour que le paramétrage de l'outil dans une autre région ne nécessite pas un investissement important supplémentaire. Elle rend également possible une évolution de l'arbre par intégration d'interventions culturales ou d'options non initialement prévues.

Les sorties de PERSYST se présentent sous la forme d'une description du ou des systèmes de culture à évaluer, caractérisés par leur successions de cultures, la combinaison d'options techniques retenue pour chaque culture de la succession et le type de sol dans lequel la simulation est demandée. Les résultats présentent le rendement estimé (et leur variabilité en cas de simulation sur plusieurs scénarios climatiques), ainsi que la décomposition des principales pertes (celles liées à la rotation et celles liées à l'itinéraire technique).

3. Adaptation et paramétrage en Ile-de-France

3.1 Evolutions nécessaires de PERSYST pour une utilisation en agriculture biologique

Des choix de modélisation ont été faits pour le développement de la version initiale de PERSYST, avec des simplifications importantes dans la description des itinéraires techniques. Les deux simplifications les plus importantes portaient sur la gestion des adventices et la gestion de l'azote. L'enherbement était ainsi considéré par défaut comme contenu à un niveau non limitant, et la gestion de l'azote n'intégrait pas l'azote organique. Ces deux simplifications nous ont permis d'avancer sur l'architecture de PERSYST. Si elles peuvent être considérées comme acceptables en agriculture conventionnelle, elles ne le sont plus dès lors que l'on s'intéresse à l'AB pour laquelle azote et adventices sont les deux principaux facteurs limitants. Un nouveau projet a permis d'intégrer à PERSYST des améliorations concernant (i) l'effet des pratiques de gestion des adventices sur le rendement et (ii) l'effet des pratiques de fertilisation sous forme organique. La prise en compte de l'effet des pratiques de gestion des adventices a bénéficié de l'expertise de N. Munier-Jolain (INRA) et la prise en compte des apports d'azote sous forme organique s'est appuyée sur les formalismes de l'outil INDIGO (Bockstaller *et al.*, 2002).

3.2 Paramétrage en Ile-de-France

La méthode de paramétrage décrite dans la section 2.2 a été mise en œuvre en Ile-de-France, après quelques adaptations rendues nécessaires compte-tenu des acteurs impliqués dans le recueil d'information. En effet, en Ile-de-France, les connaissances techniques concernant les performances de systèmes de culture en AB ne sont pas issues de l'expérience de nombreux acteurs mais sont essentiellement collectées par les conseillers AB de la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne. Seuls C. Glachant et C. Aubert ont donc été impliqués dans l'étape initiale de recueil des éléments nécessaires au paramétrage. La validation par un collectif élargi a cependant été conservée. Elle s'est concrétisée par une réunion ouverte à des acteurs intervenant dans des régions limitrophes compte tenu du faible nombre de personnes mobilisables en Ile-de-France, et aussi du caractère « générique » (i.e. transposable à d'autres régions) de certains paramètres. Ont ainsi participé à la validation collective des conseillers AB de Chambres d'agriculture (Yonne, Oise, Aube), d'ARVALIS-Institut du végétal et d'AgroTransfert Ressources et Territoires.

Ce travail collectif a conduit au paramétrage de 18 cultures (Tableau 3) et 8 types de sol. Une typologie de huit types de sol a été établie par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne pour servir de base au paramétrage des rendements biologiques maximaux. Certains de ces huit types ont été subdivisés pour aboutir à des sous-classes homogènes sur le plan des caractéristiques pédologiques. Elles sont notamment mobilisées dans le calcul des fournitures en azote du sol. Cette typologie de sols a servi de

base au paramétrage des potentialités des différentes cultures retenues. Le Tableau 4 propose un extrait de ce paramétrage, pour trois espèces (blé tendre, colza et maïs) et 3 types de sol.

Tableau 3: Liste des cultures paramétrées dans PERSYST pour l'AB en Ile-de-France

Céréales à paille	Légumineuses ou associations avec légumineuses	Autres espèces
Blé tendre d'hiver meunier	Féverole d'hiver	Colza
Blé tendre d'hiver fourrager	Féverole de printemps	Sarrasin
Triticale	Association pois protéagineux – orge de printemps	Maïs
Avoine d'hiver	Association pois fourrager – triticale	Tournesol
Orge de printemps	Lentille	Pomme de terre
	Luzerne	Lin textile
		Chanvre

Tableau 4 : Extrait du paramétrage du rendement potentiel (bornes min – max de rendement et distributions de probabilités) pour trois cultures et trois types de sol.

	Blé tendre meunier		Colza		Maïs	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Terres humides Sols engorgés l'hiver les années excédentaires ¹ et normales en pluies ² . Ne se reprennent bien au printemps qu'après un hiver peu pluvieux	25	60	7	25	40	80
Terres profondes Pas de flétrissement les années à fin de printemps / début d'été secs Se reprennent toujours bien au printemps	40	75	10	30	55	100
Terres sèches Les cultures de printemps flétrissent les années à fin de printemps / début d'été secs Se reprennent toujours bien au printemps	30	55	7	25	35	65

3.3 Exemple d'adaptation : la gestion des adventices

L'effet des pratiques de gestion des adventices sur le rendement est une des améliorations majeures apportées à PERSYST. L'arborescence retenue dans l'outil intègre un risque de salissement par les adventices annuelles et les adventices vivaces à l'échelle du système de culture. Ces risques de salissement sont ensuite intégrés à l'échelle de l'itinéraire technique et contribuent à définir un risque de perte de rendement sur chaque culture de la succession, compte-tenu de pratiques de gestion annuelle mises en œuvre.

La Figure 3 formalise la représentation du risque « adventices annuelles » à l'échelle du système de culture développée dans PERSYST. Ce risque est défini par trois attributs de poids équivalents dans l'agrégation : (1) la composition de la rotation, (2) les pratiques de gestion de l'interculture à l'échelle du système de

¹Les années excédentaires en pluviométrie hivernale correspondent à des hauteurs d'eau supérieures à 350-400 mm d'octobre à mars

²Les années équilibrées en pluviométrie hivernale correspondent à des hauteurs d'eau comprises entre 250 et 350 mm d'octobre à mars

culture, (3) les interventions mécaniques de travail du sol ou de lutte physique à l'échelle du système de culture.

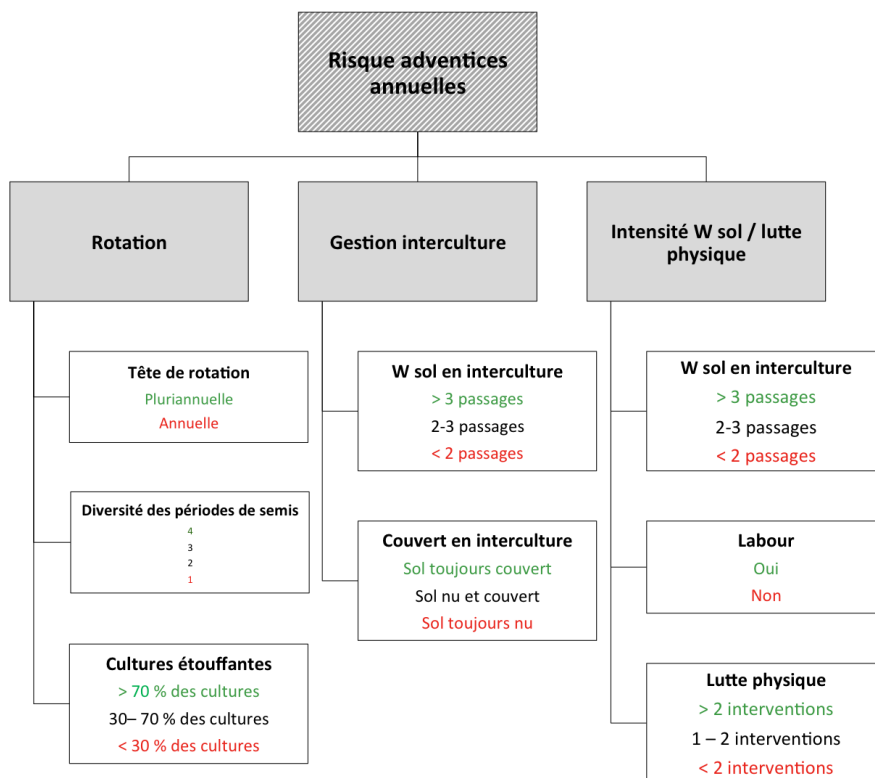


Figure3 : Représentation du risque « adventices annuelles » à l'échelle du système de culture

La composition de la rotation rend compte du caractère plus ou moins salissant de la rotation. Elle est caractérisée par trois attributs :

- La présence de cultures pluriannuelles dans la rotation ;
- La diversité des périodes de semis parmi les cultures de la rotation : automne (colza), hiver (céréales à paille et protéagineux d'hiver), printemps (céréales à paille et protéagineux de printemps) et été (maïs, tournesol...) ;
- La part de cultures étouffantes (luzerne, associations céréales-légumineuses, triticale, avoine, sarrasin) dans la rotation.

Le mode de gestion de l'interculture rend compte du risque de multiplication d'adventices en interculture. Il est caractérisé par deux attributs :

- Le nombre de déchaumages / façons superficielles réalisés en interculture (hors préparation du lit de semences combinée au semis) en moyenne à l'échelle du système de culture, hors périodes de cultures pluriannuelles ;
- La fréquence de présence d'un couvert (cultures intermédiaires ou repousses).

L'intensité des interventions mécaniques (travail du sol et lutte physique) rend compte de l'effet de ces interventions sur l'épuisement du stock semencier. Trois attributs le caractérisent :

- Le nombre de déchaumages / façons superficielles réalisés en interculture (hors préparation du lit de semences combinée au semis) en moyenne à l'échelle du système de culture ;
- La pratique du labour, sans prendre en compte sa fréquence à l'échelle du système de culture ;

- La réalisation ou non d'interventions de lutte physique pour lesquelles une distinction est faite entre herse étrille / houe rotative et bineuse.

Ce risque de salissement par les adventices annuelles à l'échelle du système de culture devient alors un des déterminants du risque de pertes de rendement sur chaque culture de la succession, compte tenu des itinéraires techniques mis en œuvre. La Figure 4 illustre la formalisation retenue de l'effet de l'itinéraire technique sur le rendement du blé tendre conduit en AB. Nous développons ci-dessous les pertes dues aux adventices. Le lecteur intéressé pourra se référer au document « utilisateur » (Ballot *et al.*, 2013) pour une présentation complète de l'ensemble des choix retenus pour toutes les cultures paramétrées.

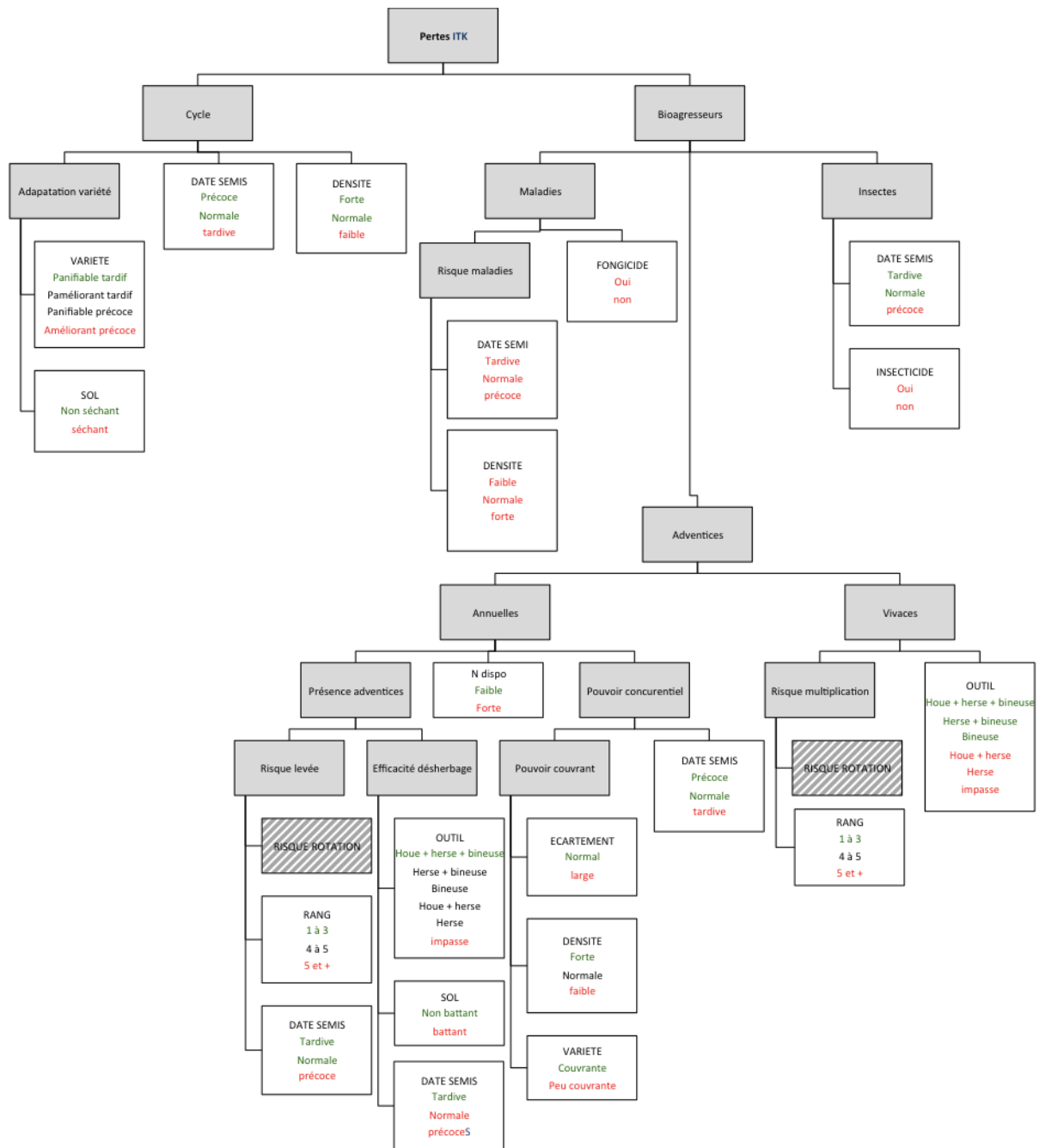


Figure 4 : Formalisation de l'effet de l'ITK sur les pertes de rendement sur blé tendre.

L'attribut « Pertes adventices » croise les pertes dues aux adventices annuelles et vivaces avec des poids fonction des cultures.

L'attribut « Pertes adventices annuelles » combine (1) le risque de présence d'adventices, (2) le pouvoir concurrentiel de la culture, (3) l'azote disponible (Tableau 5). La disponibilité en azote n'entre en jeu que dans les situations où le pouvoir concurrentiel de la culture est faible ; une forte disponibilité en azote dégrade alors la valeur de l'attribut. La valeur de l'attribut « Présence adventices » croise un risque de levée d'adventices et l'efficacité du désherbage mis en œuvre :

- Le risque de levée d'adventices est fonction (1) du risque évalué à l'échelle du système de culture (tel que présenté plus haut), (2) du rang de la culture dans la rotation, qui rend compte de son éloignement par rapport à la culture pluriannuelle précédente. L'effet d'une culture pluriannuelle sur le risque de levée d'adventices annuelles est considéré comme maximal sur les trois cultures suivantes. Il est considéré comme nul à partir de la 6^e culture ou en l'absence de cultures pluriannuelles dans la rotation et enfin (3) de la date de semis de la culture, qui rend compte de l'évitement des périodes de levée préférentielles des adventices ;

- L'efficacité du désherbage est évaluée en fonction (1) du type d'outil ou de combinaisons d'outils mis en œuvre (pas de désherbage mécanique, herse étrille seule, houe rotative et herse étrille, bineuse seule, houe / herse et bineuse) (2) du type de sol : la herse étrille non combinée à la houe rotative est considérée comme inefficace sur sols battants par exemple. L'efficacité des interventions de désherbage mécanique est considérée comme maximale lorsque herse / houe et bineuse sont combinées (désherbage en plein et fenêtres d'intervention larges pour le binage).

La valeur de l'attribut « Pouvoir concurrentiel de la culture » croise une caractérisation du pouvoir couvrant de la culture avec sa date de semis. Le pouvoir concurrentiel est considéré faible dès lors que le pouvoir couvrant est lui-même faible ou que le semis intervient après le 1^{er} novembre, pour rendre compte du moindre développement de la culture.

Tableau 5 : Fonction d'utilité définissant la valeur de l'attribut « Pertes adventices annuelles » pour le blé tendre d'hiver meunier

Présence adventices	Pouvoir concurrentiel	N dispo	Pertes annuelles	adventices
Moyenne ou Forte ou Très forte	Faible Faible	Forte -	Très élevées	
Forte ou Très forte Très forte	Moyen	-		
Moyenne Forte Très forte	Faible Moyen Fort	Faible - -	Elevées	
Faible Moyenne Forte	Faible Moyen Fort	Forte - -		
Très faible Faible Faible Moyenne Très faible	Faible Fort ou Moyen - Fort Fort ou Moyen	- - Faible - -		
			Très faibles	

3.4 Exemple de sorties et début de validation

A des fins de validation du paramétrage en Île-de-France, les rendements estimés par PERSYST ont été comparés à des valeurs définies dans le cadre du programme CAS-DAR 7055RotAB (Bonte *et al.*, 2010) pour des systèmes de culture type.

Pour la région Ile-de-France, trois cas-types sont disponibles, pour lesquels une rotation a été définie, ainsi que l'itinéraire technique de chaque culture et le rendement attendu sous forme d'une valeur moyenne, d'un minimum et d'un maximum. Ces informations ont permis de simuler ces trois systèmes de culture à l'aide de PERSYST en dix itérations et de comparer les valeurs de rendement obtenues aux valeurs attendues (Tableau 6).

Tableau 6: Rendements attendus culture par culture pour les trois cas-types définis en Ile-de-France dans le cadre du programme RotAB et Rendements simulés à l'aide de PERSYST

Culture	Rendement attendu	Rendement simulé
	Min – Moyenne - Max	Min – Moyenne - Max
Cas-type RotAB Ile-de-France 1 / Type de sol : Terres profondes		
Luzerne A1	10.5-11.5-12.5 t/ha	9-10-11 t/ha
Luzerne A2	12-13-14 t/ha	11-12-14 t/ha
Blé tendre meunier	50-60-70 q/ha	44-56-63 q/ha
Triticale	35-45-55 q/ha	36-56-66 q/ha
Avoine hiver	30-40-55 q/ha	39-54-63 q/ha
Féverole printemps	25-35-50 q/ha	26-41-50 q/ha
Blé tendre meunier	30-45-50 q/ha	32-48-54 q/ha
Cas-type RotAB Ile-de-France 2 / Type de sol : Terres intermédiaires séchantes		
Luzerne A1	6.5-7.5-8.5 t/ha	6-8-9 t/ha
Luzerne A2	9.7-10.7-11.7 t/ha	8-11-13 t/ha
Luzerne A3	9.7-10.7-11.7 t/ha	8-11-14 t/ha
Blé tendre meunier	40-48-60 q/ha	41-51-59 q/ha
Colza	10-18-25 q/ha	13-20-25 q/ha
Blé tendre meunier	35-43-50 q/ha	32-42-49 q/ha
Féverole hiver	20-27-40 q/ha	22-32-45 q/ha
Blé tendre meunier	35-45-50 q/ha	34-40-46 q/ha
Orge printemps	35-40-45 q/ha	32-40-53 q/ha
Cas-type RotAB Ile-de-France 3 / Type de sol – Terres intermédiaires humides		
Féverole printemps	25-35-50 q/ha	21-34-43 q/ha
Blé tendre meunier	40-45-55 q/ha	37-41-48 q/ha
Maïs grain	50-65-85 q/ha	58-65-73 q/ha
Association pois-triticale	10-33-40 q/ha	23-32-41 q/ha
Blé tendre meunier	35-40-50 q/ha	33-36-41 q/ha
Triticale	25-35-45 q/ha	30-34-38 q/ha

Une première observation des valeurs permet de constater que (i) les rendements simulés discriminent des situations contrastées (comme par exemple les blés s'intégrant dans des rotations avec ou sans luzerne) et (ii) que les valeurs simulées sont proches en valeur absolue des valeurs attendues, en dehors de quelques exceptions (triticale et avoine du premier cas-type par exemple). Les écarts constatés restent à investiguer pour identifier les corrections à apporter.

Une limite à ce premier travail de validation est que les valeurs de rendement attendu auxquelles sont comparées les résultats de simulation ont été définies sur la base de l'expertise des personnes mobilisées pour le paramétrage de PERSYST en Ile-de-France. La cohérence entre rendements attendus et simulés permet donc seulement de conclure que les formalismes et paramètres élémentaires permettent de reconstituer le rendement attendu par les experts dans une situation donnée ; reste à vérifier la fidélité des résultats à des rendements réellement obtenus sur des parcelles agricoles. Pour cela, un travail de comparaison est en cours sur les essais système de culture en AB (menés par Arvalis) de Boigneville (91) et La Motte (95) pour lesquels les pratiques et les rendements réalisés sont disponibles. Une seconde limite réside dans le fait que les valeurs de rendement auxquelles peuvent être comparées les sorties de PERSYST aujourd'hui – cas-types ou résultats d'essais – correspondent à des situations plutôt courantes et ne couvrent pas de situations plus prospectives. Pour s'assurer de la validité des résultats dans ce type de situations, reste l'appréciation à dire d'experts des valeurs simulées pour une grande diversité de situations.

Conclusion et perspectives

Le projet a permis de (i) finaliser le paramétrage en agriculture biologique en Ile-de-France de l'outil PERSYST sur 18 cultures et huit types de sol, et (ii) vérifier que les résultats obtenus avec ce paramétrage sont cohérents dans les situations les plus fréquentes. Un prototype opérationnel de PERSYST a été développé, permettant d'obtenir une estimation des performances de systèmes de culture en AB en prenant notamment en compte l'effet des pratiques de gestion des adventices et les apports sous forme organique. Enfin, un premier cercle d'utilisateurs potentiels a été constitué ; il a pu commencer à tester le prototype développé et paramétré dans quelques situations d'usage pressenties. Cette phase de test, encore en cours, consiste en l'utilisation du prototype par différents acteurs du développement agricole (Chambre d'Agriculture, GAB, Aquibrie, ARVALIS-Institut-du-végétal) dans des situations contrastées : accompagnement d'agriculteurs en AB à la réflexion sur leurs systèmes de culture, accompagnement d'agriculteurs conventionnels à la conversion, utilisation pour l'acquisition de références (évaluation de cas-types, évaluation préalable à la mise en place d'essais « système »). Cette phase de test permettra (i) d'établir un diagnostic sur les apports de l'outil dans les situations testées et (ii) d'intégrer les besoins identifiés et non couverts par le prototype dans les spécifications de l'application en préalable de son développement sous forme d'une version aboutie.

Le travail mené en Ile-de-France a par ailleurs permis de conserver une architecture générique à l'outil, c'est-à-dire le rendant paramétrable aisément dans d'autres régions françaises, mais aussi sans être adapté exclusivement à des systèmes de production conventionnels ou biologiques.

L'outil dans sa version aboutie pourrait alors trouver un domaine d'application dépassant largement les limites de l'Ile-de-France, sous réserve de son paramétrage dans d'autres régions.

Remerciements : PERSYSTa bénéficié du soutien de plusieurs projets de Recherche : ANR-ADD Praiterre, ANR-SysterraPopsy, ANR PNRB Ecobiom, SAS-Procethol 2G FuturoI. Son adaptation à l'agriculture biologique a été financée par le Conseil Régional Ile-de-France et l'Agence de l'Eau Seine-

Normandie dans le cadre du DIM Astrea (2010) et du Plan Bio (2012). Nous remercions par ailleurs les partenaires techniques pour leur contribution à l'adaptation et au paramétrage «Île de France» de PERSYST et en particulier la Chambre d'Agriculture de Seine et Marne pour avoir mis son expérience à disposition. Cette adaptation a largement bénéficié de leurs contributions.

Références bibliographiques

Ballot R., Guichard L., 2013. PERSYST-AB : Un outil d'évaluation des PERformances agronomiques, pour l'évaluation de la durabilité des SYStèmes de culture en Agriculture Biologique : Guide utilisateur & Paramétrage en Ile de France, janvier 2013, 118 pp

Bockstaller C., Girardin P., 2002. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO®, Document INRA-ARAA, pp. 133.

Bohanec M., Rajkovic V., 1990. DEX: An expert system shell for decision support. *Sistemica* 1, 145-157.

Bohanec M., Messean A., Scatosta S. et al., 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* 215 (1-3), 247-261.

Bohanec M., 2011. DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana. Disponible sur : <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>.

Boiffin J., Sebillotte M., 1982. Fertilité, potentialité, aptitudes culturales - Signification actuelle pour l'agronomie, Numéro spécial Bulletin Technique d'Information. Minist.Agric, Paris, 370/372, 345-353.

Bonte J.B., Aubert C., Fourrié L., Colomb B., 2010. Rotations en grandes cultures biologiques sans élevage – 8 fermes-types, 11 rotations – Repères agronomiques, économiques, techniques et environnementaux. ITAB, 124 pp. Disponible sur <http://www.itab.asso.fr/downloads/rotab/rotab-cas-types-avril2011.pdf>

Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Piltrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Violay T., 2010. Ecophyto R&D - Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides? Synthèse du rapport d'étude. INRA, France.

Francisco E.M., Anderson J.R., 1972. Chance And Choice West Of The Darling. *Aust. J. Agr. Econ.* 16, 82–93.

Girard N., Navarrete M., 2005. Quelles synergies entre connaissances scientifiques et empiriques ? L'exemple des cultures du safran et de la truffe. *Natures Sciences Sociétés* 13, 33-44

Guichard L., 2008. PERSYST, un outil d'évaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture. Poster présenté au colloque "Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?" Paris, 27 mars.

Guichard L., Attoumani-Ronceux A., Ballot R., Gombert J., Lesur C., Loyce C., Makowski D., Jeuffroy M.H.. Parameterizing cropping system models by using expert elicitation: the case of PerSyst, article soumis.

Guillou M., Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.L., 2013. Le projet agro-écologique : vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement, Propositions pour le Ministre, 163 pp.

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.

Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235–265.

Lamine C., Bellon S., 2009. Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the

crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1) 97-112.

Loyce C, Rellier J.P., Meynard J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system. *Agricultural Systems* 72 (1), 9-31.

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

Poursinoff A., 2008. L'agriculture biologique, une contribution majeure à l'éco-région, pour un plan d'action, Rapport Conseil Régional Ile de France, 160 pp.

Rossing W.A.H., Meynard J.M., Ittersum M.K. van, 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7, 271-283.

Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., et coll. 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28 (1), 163-174.

Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : Combe L., Picard D. (Eds). *Le point sur... les systèmes de culture*, INRA Editions, Paris, 165-196.

Stockle C.O., Donatelli M., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18 (3-4), 289-307.

Wang E., Robertson M.J., Hammer G.L., Carberry P.S., Holzworth D., Meinke H., Chapman S.C., Hargreaves J.N.G., Huth N.I., McLean G., 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121-140