



**HAL**  
open science

# Évaluation multicritère de prototypes de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants dans le Sud-Ouest de la France : approche comparative d'une démarche a priori et a posteriori

Yolaine Hily

► **To cite this version:**

Yolaine Hily. Évaluation multicritère de prototypes de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants dans le Sud-Ouest de la France : approche comparative d'une démarche a priori et a posteriori. Sciences agricoles. 2013. dumas-00906608

**HAL Id: dumas-00906608**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00906608>**

Submitted on 20 Nov 2013

**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.



**AGROCAMPUS OUEST**

**CFR Rennes**

65 rue de Saint Brieuc

CS 84215

35042 Rennes cedex

**Centre de recherche**

**INRA de Toulouse**

24 Chemin de Bordé Rouge

31326 Castanet Tolosan Cedex

## Mémoire de Fin d'Études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences  
Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du paysage.**

Année universitaire : 2012 - 2013

Spécialité : Ingénieur Agronome

Spécialisation ou option : Sciences et Productions Végétales (SPV),  
Option Ingénierie des Agrosystèmes

**Evaluation multicritère de prototypes de systèmes de culture  
innovants à bas niveau d'intrants dans le Sud-Ouest de la France :  
approche comparative d'une démarche a priori et a posteriori.**

Par : Yolaine HILY

Bon pour dépôt (version définitive)

Date : .../.../... Signature

Autorisation de diffusion : Oui  Non

**Devant le jury :**

Soutenu à Rennes le : 13/09/2013

*Sous la présidence de : Christine Bissuel*

Maîtres de stage : Eric Justes, co-encadrants : Jacques-Eric Bergez, Grégory Véricel

Enseignant référent : Matthieu Carof (enseignant chercheur en agronomie et systèmes de culture)

Autres membres du jury : Violaine Deytieux (Ingénieur de recherche), Dominique Poulain (Maître de Conférences d'Agronomie et Histoire de l'Agriculture)

*"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent  
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".*



## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### Cadre lié à la confidentialité :

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

#### Préciser les limites de la confidentialité <sup>(2)</sup> :

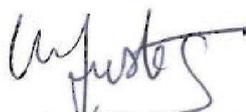
Confidentialité absolue :  oui  non

(ni consultation, ni prêt)

Si oui  1 an  5 ans  10 ans

Le maître de stage <sup>(4)</sup>,

Eme JUSTES



### Cadre lié à la diffusion du mémoire :

A l'issue de la période de confidentialité et/ou si le mémoire est validé diffusable sur la page de couverture, il sera diffusé sur les bases de données documentaires nationales et internationales selon les règles définies ci-dessous :

Diffusion de la version numérique **du mémoire** :  oui  non

Référence bibliographique diffusable <sup>(3)</sup> :  oui  non

Résumé diffusable :  oui  non

Mémoire papier consultable sur place :  oui  non

Reproduction autorisée du mémoire :  oui  non

Prêt autorisé du mémoire papier :  oui  non

.....  
Diffusion de la version numérique **du résumé** :  oui  non

↳ Si oui, l'auteur <sup>(1)</sup> complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) **Yolaine HILY**, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date : 13/09/2013

Signature :

Rennes/Angers, le

L'auteur <sup>(1)</sup>,

L'enseignant référent

ou son représentant

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme





# Evaluation multicritère de prototypes de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants dans le Sud-Ouest de la France

Approche comparative d'une démarche a priori et a posteriori

---

Yolaine HILY





# Remerciements

---

Tout d'abord, je tiens à remercier Grégory VERICEL, mon encadrant, pour sa disponibilité, sa patience tout au long des six derniers mois, mais aussi pour ses fameuses calculettes sans lesquelles ma tâche aurait été autrement plus compliquée. Passionné et passionnant, il a toujours su se rendre disponible pour répondre à mes questions, me conseiller dans l'élaboration de mes méthodes d'analyse et parfois me remettre sur la bonne voie.

Un grand merci à mes maîtres de stage, Jacques-Eric BERGEZ et Eric JUSTES pour leurs conseils avisés et l'attention qu'ils ont portée à mon sujet malgré leurs emplois du temps bien remplis.

Je tiens aussi à remercier Damien CRAHEIX et Simon GIULIANO pour le temps qu'ils m'ont accordé afin de répondre à mes interrogations sur la méthode d'évaluation MASC et sur les expérimentations de l'EI Purpan.

Je voulais particulièrement remercier Clémence RAVIER, Violaine DEYTIEUX et Matthieu HIRSCHY pour le soutien et l'aide précieuse qu'ils m'ont apportés afin de dompter le logiciel CRITER.

Je dois également beaucoup aux différents conseillers et chercheurs qui m'ont aidé à répondre à mes questions et dans ma recherche de données. Parmi eux, je remercie (EI Purpan), Didier RAFAILLAC (INRA Toulouse), Aline VANDEWALLE (CRAMP), Olivier THEROND (INRA Toulouse), Geneviève NGUYEN (ENSAT), Karim CHAIB (EI Purpan).

Merci à la direction d'AGROCAMPUS OUEST et à l'ensemble de l'équipe du Laboratoire Sciences du Végétal pour leur encadrement tout au long de ces trois années passées sur le site de Rennes ainsi que pour les enseignements qui m'ont été délivrés et qui me seront indispensables dans ma future vie professionnelle.

Enfin, je remercie toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de mon stage et à la réalisation de ce mémoire.



# Table des matières

---

Introduction .....	1
<b>Partie I : Contexte, état de l'art et objectifs du stage .....</b>	<b>.....</b>
I. La région Midi-Pyrénées : un territoire composite aux systèmes agricoles diversifiés.....	2
II. Innovation et conception de systèmes de culture.....	3
A. Démarche de conception-évaluation des systèmes de culture .....	3
B. Le projet MicMac Design : conception et évaluation multicritère quantitative de système de culture .....	4
III. Objectifs du stage et stratégie choisie .....	5
A. Problématique et hypothèses testées .....	5
B. Objectifs du stage .....	5
C. Stratégie mise en œuvre :.....	6
<b>Partie II : Matériels et méthodes .....</b>	<b>.....</b>
I. Présentation des cas d'étude et des données utilisées: .....	7
A. Les moyens mis en œuvre dans le cadre du projet.....	7
B. Choix de systèmes de référence pour l'évaluation .....	8
II. Méthodes d'évaluation employées .....	9
A. Travail de préparation des évaluations.....	9
B. Les indicateurs : objets élémentaires de l'évaluation .....	10
C. Le modèle MASC 2.0 : évaluation multicritères de la contribution des prototypes au développement durable .....	11
<b>Partie III : Présentation des résultats .....</b>	<b>.....</b>
I. Analyse de l'atteinte des objectifs des systèmes.....	13
A. Résultats pour les systèmes alternatifs à la rotation Blé dur/Tournesol .....	13
B. Résultats pour les systèmes alternatifs à la monoculture de maïs irrigué.....	15
II. Contribution des systèmes au développement durable .....	16
A. Evaluation des systèmes alternatif à la rotation Blé dur/Tournesol .....	16
B. Evaluation des systèmes alternatifs à la monoculture de maïs .....	19
III. Complémentarité des évaluations a priori et a posteriori : des résultats contrastés selon le degré de rupture des prototypes .....	21
A. Evaluations cohérentes des systèmes performants.....	21
B. Une baisse de performance prévisible pour des systèmes en rupture .....	21
C. Des aléas techniques imprévisibles a priori .....	22
<b>Partie IV: Discussion .....</b>	<b>.....</b>
I. Sur la méthode et les résultats de l'évaluation .....	23
A. Des prototypes performants mais encore perfectibles .....	23
B. L'évaluation <i>a priori</i> tient une place prépondérante dans la démarche de conception .....	23
II. Sur le modèle MASC 2.0 .....	24
A. Les limites du modèle .....	24
B. Un outil de synthèse mettant en valeur certains effets antagonistes .....	24
C. Un impact fort du choix de la pondération.....	24
III. Perspectives.....	25
Conclusion.....	26
<b>Annexes.....</b>	<b>.....</b>



# Liste des figures

---

<b>Figure 1</b> : Reliefs de la région Midi-Pyrénées .....	2
<b>Figure 2</b> : Réseau hydrographique de la région Midi-Pyrénées .....	2
<b>Figure 3</b> : Carte des orientations technico-économiques des communes de Midi Pyrénées, .....	2
<b>Figure 4</b> : La démarche de conception de systèmes de culture à dire d'experts, (d'après Deytieux et al et Lançon et al.).....	3
<b>Figure 5</b> : Schéma de synthèse de la démarche .....	6
<b>Figure 6</b> : Les systèmes de culture alternatifs à la rotation Blé dur/Tournesol testés sur le site de l'INRA de Toulouse.....	7
<b>Figure 7</b> : Alternatives à la monoculture de maïs testées sur le site de Lamothe (EIP Purpan).....	7
<b>Figure 8</b> : Dispositif expérimental de l'INRA de Toulouse-Auzeville.....	8
<b>Figure 9</b> : Dispositif expérimental de la ferme de Lamothe (EIP) .....	8
<b>Figure 10</b> : Evolution de l'indice IPAMPA moyen et de l'indice moyen des prix de vente depuis 2003.....	9
<b>Figure 11</b> : Arbre d'agrégation hiérarchique du modèle MASC 2.0 complété des pondérations par défaut (Craheix et al., Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0).....	11
<b>Figure 12</b> : Valeurs seuils permettant de discrétiser les valeurs obtenus pour la rentabilité d'un système de culture. ....	11
<b>Figure 13</b> : Exemple de fonction d'utilité : fonction permettant de déterminer la valeur de la qualité des produits à partir de la qualité sanitaire et de la qualité technologique des produits récoltés .....	11
<b>Figure 14</b> : Détermination des valeurs seuils : exemple de la Marge Semi Nette .....	12
<b>Figure 15</b> : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori de la référence Blé dur / Tournesol .....	16
<b>Figure 16</b> : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori du système BI CI .....	16
<b>Figure 17</b> : Comparaison des critères économiques du système BI CI et de la référence, évolutions entre a priori et a posteriori .....	17
<b>Figure 18</b> : Diagramme radar de la dimension sociale (a) et environnementale (b) : Comparaison de la référence avec le système BICI .....	17
<b>Figure 19</b> : Evolution du nombre de critères environnementaux et économiques améliorés (a) ou dégradés (b) en fonction de la complexité des prototypes. ....	19
<b>Figure 20</b> : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori de la référence MM Réf .....	19
<b>Figure 21</b> : Diagramme synoptique a priori (a) et a posteriori (b) pour le système MM4 .....	22
<b>Figure 22</b> : Illustration de l'effet de seuil : exemple de la quantité de Phosphore apportée (unités P) (pression phosphore) pour les systèmes BI et TBI.....	24



## Liste des tableaux,

---

<b>Tableau 1</b> : Avantages et limites des évaluations a priori et a posteriori .....	4
<b>Tableau 2</b> : Leviers mobilisés dans la conception des prototypes pour atteindre les objectifs :.....	7
<b>Tableau 3</b> : Objectifs généraux des systèmes de culture du projet (Systèmes d’Auzeville) déclinés en sous objectifs et indicateurs.....	9
<b>Tableau 4</b> : Méthode de traduction des règles de décision en Opérations culturelles pour les Itinéraires techniques a priori .....	10
<b>Tableau 5</b> : Indicateurs de la méthode INDIGO utilisés dans l’évaluation .....	10
<b>Tableau 6</b> : Evaluation de l’atteinte des objectifs par le système Bas intrants avec cultures intermédiaires a priori et pour la période 2011-12 : détail de la méthode .....	15
<b>Tableau 7</b> : Synthèse de l’analyse a priori et a posteriori de l’atteinte des objectifs pour les systèmes d’Auzeville.....	14
<b>Tableau 8</b> : Synthèse de l’analyse a priori et a posteriori de l’atteinte des objectifs pour les systèmes de l’EIP .....	15
<b>Tableau 9</b> : Quelques valeurs quantitatives obtenues pour les deux systèmes – Indicateurs environnementaux.....	17
<b>Tableau 10</b> : Synthèse des principales forces et faiblesses des prototypes d’après les résultats des évaluations a priori et a posteriori .....	18
<b>Tableau 11</b> : Synthèse des performances a posteriori des systèmes du dispositif de l’EI Purpan .....	20
<b>Tableau 12</b> : Comparaison partielle des résultats de l’évaluation a priori et a posteriori (2011-12) pour quelques systèmes du projet.....	21
<b>Tableau 13</b> : Comparaison des rendements estimés a priori et des rendements réalisés pour quelques systèmes .....	21
<b>Tableau 14</b> : Comparaison des résultats des évaluations a priori et a posteriori pour les prototypes TBI Asso CI, MM3 et MM4.....	22
<b>Tableau 15</b> : Extrait des variations dans l’évaluation <i>a posteriori</i> du système TBI CI en fonction des données utilisées .....	24
<b>Tableau 16</b> : Extrait de l’analyse d’atteinte des objectifs : comparaison des résultats pour la référence régionale et la référence locale (INRA) pour la monoculture de maïs irriguée .....	24
<b>Tableau 17</b> : Extrait de l’analyse de la dimension économique de la durabilité en fonction du scénario de prix .....	25



# Annexes

---

<b>Annexe I</b> : Les différents scénarios économiques et climatiques utilisés dans l'évaluation a priori.....	I
<b>Annexe II</b> : Objectifs généraux du dispositif de l'EIP déclinés en sous objectifs et indicateurs.....	II
<b>Annexe III</b> : Valeurs seuils utilisées pour l'évaluation a priori des systèmes du site d'Auzeville (arborescence principales), Craheix et al. 2012 (systèmes conduits en sec). Les seuils en violet foncé sont adaptés à la région Midi-Pyrénées.....	III
<b>Annexe IV</b> : Valeurs seuils utilisées pour l'évaluation a priori des systèmes du site d'Auzeville (arbres satellites), Craheix et al. 2012 (systèmes conduits en sec).....	IV
<b>Annexe V</b> : Autres valeurs seuils utilisées : a priori pour l'évaluation des monocultures de maïs, a posteriori pour évaluer les systèmes en sec ; a posteriori pour évaluer les monocultures.....	V
<b>Annexe VI</b> : Diagrammes synoptiques des évaluations à posteriori (2011-12) de la rotation blé dur tournesol (a) et de la monoculture de maïs (b).....	VI
<b>Annexe VII</b> : Diagramme synoptique correspondant à l'évaluation a posteriori (2011/12) du système BI CI	
<b>Annexe VIII</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système BI.....	VIII
<b>Annexe IX</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système TBI.....	IX
<b>Annexe X</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système TBI CI.....	X
<b>Annexe XI</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système TBI Asso.....	XI
<b>Annexe XII</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système TBI Asso CI.....	XII
<b>Annexe XIII</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système MM2.....	XIII
<b>Annexe XIV</b> : Diagrammes synoptiques correspondant à l'évaluation a priori (a) et a posteriori (2011-12) (b) du système MM3.....	XIV



## Liste des sigles :

---

**CRAMP**: Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées

**EIP** : Ecole d'Ingénieurs de Purpan

**INDIGO** : Indicateur de diagnostic global à la parcelle

**INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique

**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

**IPAMPA** : Indice des Prix d'Achat des Moyens de Production Agricole

**MICMAC** Design Modeling for Integrated Crop Management in low input farming, Assessment and Cropping system Design

**MAESTRIA**: Mise au point et évaluation de systèmes de cultures économes en intrants et durables

**MASC**: Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems

**VASCO** : Variétés et Systèmes de Culture pour une production agrO-écologique

**ZRE** : Zones de Répartition des Eaux

## Liste des abréviations :

---

**BI** : Système Bas Intrants

**BI CI** : Système Bas Intrants avec cultures intermédiaires

**Dvpt** : développement

**TBI** : Système Très Bas Intrants

**TBI CI** : Système Très Bas Intrants avec cultures intermédiaires

**TBI Asso** : Système Très Bas Intrants en cultures associées

**TBI Asso CI**: Système Très Bas Intrants en cultures associées avec cultures intermédiaires

**MB** : Marge Brute

**MM** : Monoculture de Maïs

**MNH3** : Maîtrise des émissions de NH3

**MN2O** : Maîtrise des émissions de N2O

**MPA** : Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air

**MPEP** : Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux profondes

**MPES** : Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux superficielles

**MPNO3** : Maîtrise des pertes de NO3

**MSO** : Maîtrise du statut organique

**MSN** : Marge Semi Nette

**PSPH** : Pression Phosphore

**GES** : Gaz à Effet de Serre

**Ha** : hectare

**IFT** : Indice de Fréquence de Traitement

**SdC** : Système de Culture



## Glossaire :

---

**Indicateur** : Les indicateurs sont des variables donnant des résultats simplifiés sur d'autres variables plus difficiles d'accès. Ils servent d'appui pour prendre une décision (Gras et al, 1989).

Les qualités attendues d'un indicateur sont qu'il soit objectif et scientifiquement fondé, pertinent par rapport à la problématique où il se situe, sensible, facilement accessible et immédiatement compréhensible. (Briquel et al, 2001).

**Itinéraire technique** (Sebillotte, 1974, 1978) : Combinaison logique et ordonnée des techniques appliquées à une culture en vue d'obtenir une production

**Système de culture** (1990, Sebillotte) : Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par :

- La nature des cultures et leur ordre de succession ;
- Les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures.

**Technique culturale** : Partie du processus de production pouvant être décrite de manière générique. Diffère de la pratique culturale.

**ZRE** : Les ZRE sont des zones (bassins, sous-bassins, fractions de sous-bassins hydrographiques ou systèmes aquifères) où sont constatées une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources en eau par rapport aux besoins.



## Introduction

---

L'apparition de phénomènes de grande ampleur telles que les crises alimentaires et la dégradation de l'environnement à travers le monde ont eu pour conséquence l'émergence du concept de développement durable défini comme un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs (Rapport Bruntland 1987). Ce nouveau mode de développement est fondé sur trois principales préoccupations : le maintien d'une économie viable, le développement de projets sociaux et la préservation de l'environnement, des ressources et des capacités de production (ONU, 1987).

Dans ce contexte, l'agriculture moderne se trouve confrontée à de nouveaux enjeux auxquels le modèle de production agricole intensif, fortement dépendant des intrants de synthèse et des énergies fossiles, ne peut pas répondre. En effet, il faudra maintenir, voire augmenter les volumes de production pour satisfaire la demande croissante (ONU, 2004) tout en réduisant l'utilisation des intrants dans l'optique de diminuer les risques environnementaux et d'améliorer la gestion des ressources.

Face à ces nouveaux enjeux, les acteurs du monde agricole se mobilisent pour concevoir et proposer des systèmes de culture innovants permettant de répondre aux objectifs du développement durable (Réau et Doré, 2008). Dans le cadre de cette démarche de conception de systèmes de culture, l'évaluation des systèmes tient une place prépondérante (Debaeke et al., 2008). Elle doit permettre de déterminer les performances socio-économiques et environnementales des systèmes mais également leur contribution au développement durable. Des questions se posent : Quelle méthode d'évaluation choisir ? Ces outils sont-ils adaptés aux systèmes en rupture ? A quelle échelle de temps et d'espace doit-on se placer ?

Afin de répondre à ces enjeux et à ces multiples questions, l'équipe VASCO de l'UMR AGIR du centre INRA de Toulouse Midi-Pyrénées coordonne le projet ANR MicMac-Design. Il a pour objectifs de concevoir, tester et évaluer des systèmes de culture innovants, durables et économes en intrants adaptés au contexte de la région Midi-Pyrénées afin de proposer une alternative aux deux systèmes les plus répandus dans la région : la rotation blé dur/tournesol conduite en sec et la monoculture de maïs irrigué. La démarche de conception de ces prototypes comprend une phase d'évaluation a priori et a posteriori mise en place au cours de mon stage. Cette analyse a été menée dans le but de déterminer les performances des prototypes de systèmes de culture du projet mais également d'apporter une contribution méthodologique afin de participer à l'amélioration des méthodes d'évaluation des systèmes innovants.

Dans ce mémoire, je propose une analyse des différents systèmes de culture du projet à travers une évaluation a priori et a posteriori de leur performances économiques, sociales et environnementales. La méthode repose sur l'utilisation de divers indicateurs dont la plupart sont regroupés au sein du modèle d'évaluation multicritères MASC 2.0. L'enjeu est de vérifier la capacité des prototypes de système de culture à répondre aux objectifs fixés par les concepteurs, d'identifier leurs atouts et leurs limites, mais également d'analyser l'intérêt de chaque méthode d'évaluation et leur complémentarité.

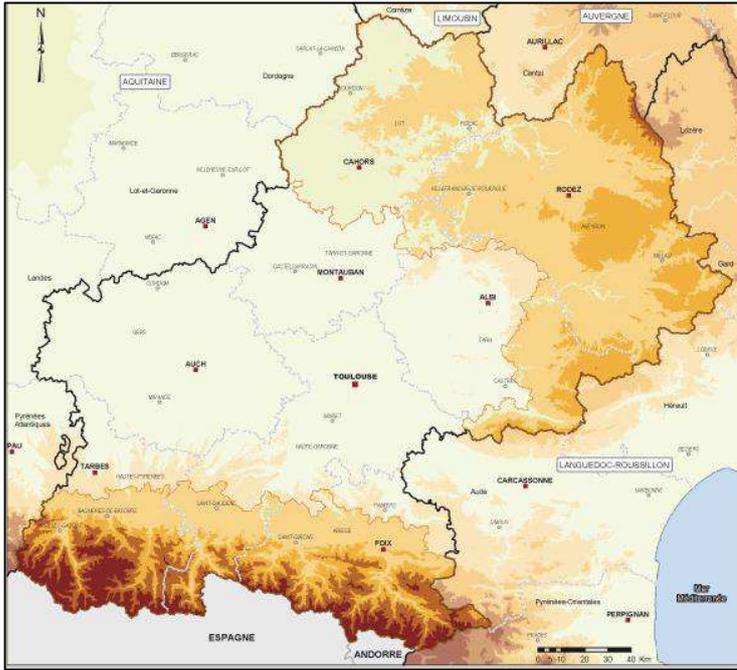
J'exposerai tout d'abord le contexte de l'étude et replacerai mon stage dans la démarche du projet ANR MicMac Design. Après une description des méthodes choisies, je présenterai les résultats des systèmes remarquables du point de vue méthodologique, de leur capacité à répondre aux enjeux régionaux et de leur contribution au développement durable. Enfin, je présenterai une analyse des méthodes employées, de leurs divergences et de leurs complémentarités.



## Partie I :

---

Contexte, état de l'art et objectifs du stage



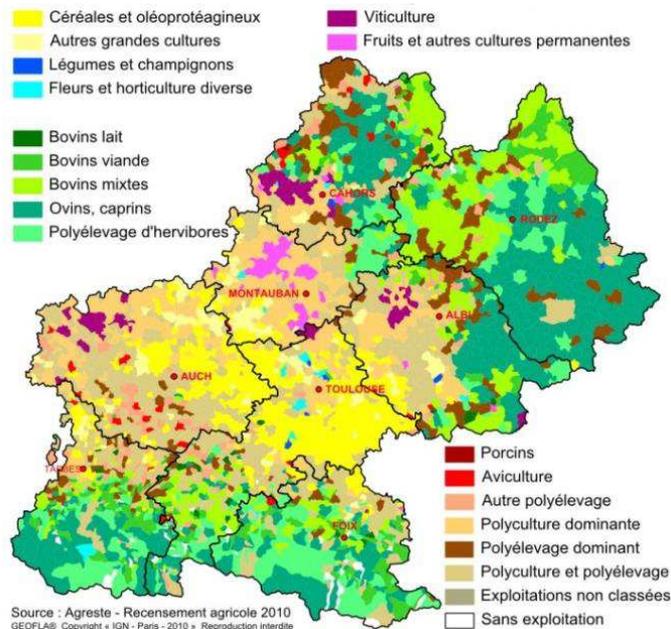
**Figure 1 : Reliefs de la région Midi-Pyrénées**

Source IGN, Auteur : Conseil Régional Midi-Pyrénées, Direction des études de la prospectives et de l'évaluation, réalisation Frédéric Bariant – Avril 2008



**Figure 2 : Réseau hydrographique de la région Midi-Pyrénées**

Source : SIGES Midi-Pyrénées



**Figure 3 : Carte des orientations technico-économiques des communes de Midi Pyrénées,**  
Source : Agreste, recensement agricole 2010

## **I. La région Midi-Pyrénées : un territoire composite aux systèmes agricoles diversifiés.**

---

La région Midi-Pyrénées, plus grande région française en termes de superficie et de SAU (2 340 000 ha), peut être décrite comme une mosaïque de petites régions et terroirs aux climats contrastés (influences océaniques, vents desséchants...), aux reliefs variés et au réseau hydrologique complexe (*figures 1 et 2*). Les paysages sont ainsi très différents, des zones de coteaux aux vallées alluviales, et chaque paysage représente donc des enjeux particuliers. En effet, les différents types de sols (argileux, argilo-limoneux, alluviaux...) et l'accès à l'eau orientent fortement les choix des producteurs en matière de systèmes de cultures. Cette diversité de conditions pédoclimatiques se traduit par l'existence d'une multitude de systèmes de production liés aux potentialités des terroirs (*figure 3*).

Les grandes cultures occupent 42% de la SAU. Les céréales sont fortement représentées, notamment le blé dur (110 000 ha) souvent associé en rotation au tournesol (213 000 ha), en particuliers dans la région du Lauragais. Les surfaces irriguées représentent 10% de la SAU totale de la région, la monoculture de maïs occupant plus de 3/4 de ces surfaces (155 000 ha pour 200 000 ha irrigués) (*source Agreste, statistiques agricoles annuelles*). Ces systèmes de culture extrêmement simples (seulement 1 ou 2 espèces cultivées) sont relativement faciles à maîtriser d'un point de vue technique et rentables mais ils atteignent leurs limites, en termes de production d'une part et en terme d'impact environnemental d'autre part.

La Région Midi-Pyrénées présente également divers enjeux en matière d'environnement, liés notamment à la protection de la ressource en eau. Tout d'abord, la gestion quantitative de la ressource est un enjeu majeur puisqu'un nombre important de systèmes agricoles en dépendent pour assurer un niveau de production satisfaisant (grandes cultures irriguées, arboriculture, culture maraîchères). De plus, la ressource en eau est partagée et doit bénéficier à tous. L'aspect quantitatif et surtout qualitatif ont donc une importance majeure dans la région, certains territoires étant placés en ZRE. La gestion des fuites de pesticides et de nitrates vers les eaux souterraines et superficielles constitue donc un second enjeu régional.

La diversité des environnements et des contraintes associée aux enjeux plus globaux nécessite de proposer et développer de nouveaux systèmes mobilisant des techniques innovantes ou bien combinant de manière originale des techniques déjà connues. Ces systèmes doivent être conçus de façon à répondre à l'ensemble des enjeux économiques, sociaux et environnementaux propres à chaque région après une analyse complète des atouts et des limites des systèmes existants.

Ainsi, en Midi-Pyrénées comme dans d'autres régions de France, les acteurs du monde agricole se mobilisent pour proposer des techniques et des modes de conduite innovants permettant de réduire l'impact de l'agriculture sur son environnement tout en maintenant un niveau de production élevé. Cependant, les références disponibles et les résultats d'essais sont encore peu nombreux. L'acquisition de ces références est une étape à part entière de la démarche de conception de systèmes alternatifs.

Dans le contexte particulier de la région Midi-Pyrénées, l'INRA de Toulouse a entrepris, au travers le projet ANR MicMac Design, une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants. Des prototypes ont été mis au point dans le but de répondre aux enjeux régionaux, notamment en matière de gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau.

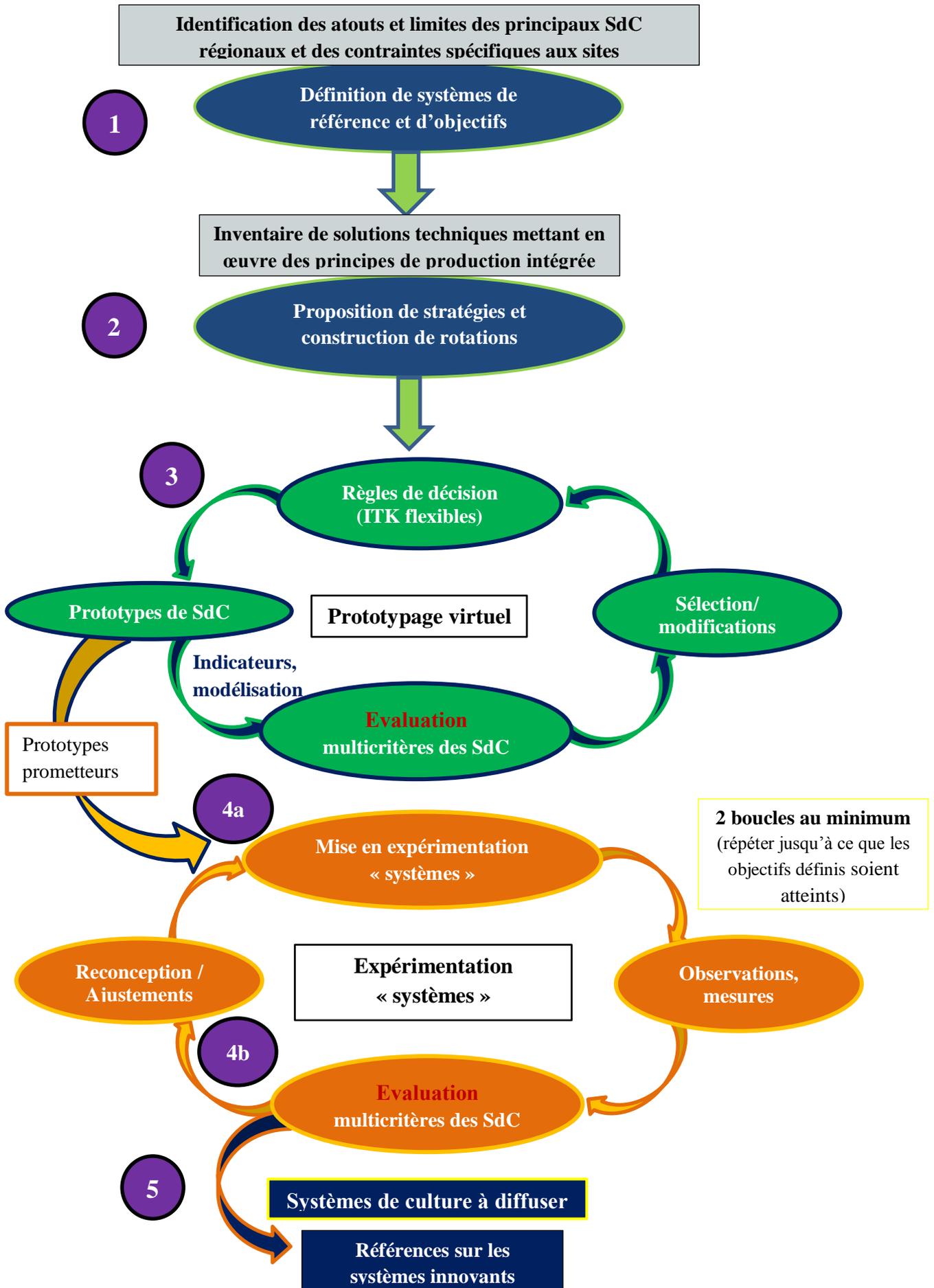


Figure 4 : La démarche de conception de systèmes de culture à dire d'experts, (d'après Deytieux et al et Lançon et al.).

## **II. Innovation et conception de systèmes de culture**

---

### **A. Démarche de conception-évaluation des systèmes de culture**

---

#### **1) Le prototypage, fondement de la démarche**

---

La démarche de conception de système de culture se construit autour d'un processus fondamental : le prototypage. Celui-ci comprend quatre phases :

- la conception de prototypes des systèmes de culture, à dire d'experts ou bien au sein de groupe d'agriculteurs (démarche participative) ;
- une mise en œuvre des prototypes ;
- une évaluation de leurs performances ;
- un ensemble d'améliorations apportées au prototype conçu proposées à partir de ses forces et faiblesses décelées au cours de l'évaluation.

Cette démarche est reconduite tant que le prototype n'atteint pas les objectifs fixés par les concepteurs (Lançon et al., 2002, Vereijken, 1997). Ce processus itératif est appelé boucle de progrès. Il existe deux types de prototypage : tout d'abord le prototypage virtuel s'appuyant sur des groupements d'experts (Lançon et al., 2007) et sur la modélisation (Bergez et al., 2010). pour tester les prototypes. Une évaluation a priori, dite « ex ante », permet de sélectionner les prototypes les plus prometteurs. Le prototypage au champ est un second type de prototypage. Il peut mobiliser des groupes d'agriculteurs (démarche de co-conception) et s'appuie sur des observations faites au champ et sur la mise en œuvre des prototypes en expérimentation « systèmes ». Une évaluation a posteriori, dite « ex post » permet d'évaluer les performances réelles du système.

Ces deux types de prototypages peuvent être conduits séparément mais sont grandement complémentaires. En effet, le prototypage virtuel permet de tester facilement et rapidement un grand nombre de systèmes et de sélectionner les plus prometteurs. Le prototypage au champ révèle ensuite les performances réelles des prototypes à partir desquelles des améliorations pourront être proposées.

#### **2) Déroulement de la démarche**

---

Une démarche de prototypage de systèmes de production, comprenant les deux boucles de progrès décrites précédemment, a été développée par Vereijken (1997) puis reformalisée (Debaeke et al., 2009). Elle s'applique à la conception de système de culture et s'organise en 5 grandes étapes reprises dans la *figure 4* :

- 1- Définition d'objectifs pour chaque prototype et en fonction de contraintes liés au contexte ;
- 2- Choix de la stratégie agronomique permettant de répondre à ce jeu d'objectifs et de contraintes ;
- 3- Formulation d'un ensemble cohérent de règles de décision permettant la mise en œuvre pratique et opérationnelle du système de culture ;
- 4- Expérimentation et évaluation des prototypes sélectionnés ;
- 5- Diffusion des systèmes innovants ;

Les étapes 1 à 3 permettent de définir les points clés sur lesquels reposera la démarche de conception dans son ensemble. Le prototype originel est ainsi engagé dans la première boucle de progrès. A l'aboutissement de la conception virtuelle, l'étape 4 inclut une seconde boucle de prototypage au champ où l'expérimentation « systèmes » tient une place prépondérante. Elle permet de confronter les prévisions des concepteurs à la réalité du terrain. L'objectif principal de l'expérimentation « système de culture » est ainsi d'évaluer le système de culture étudié (Debaeke et al., 2008) :

- En termes de faisabilité technique et de cohérence agronomique, en analysant la capacité des stratégies de gestion mises en œuvre à atteindre les états des sols et des cultures visés (bioagresseurs, nutrition des plantes) ;

**Tableau 1 : Avantages et limites des évaluations a priori et a posteriori**

	Avantages	Limites
Evaluation <i>a priori</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peu coûteux en temps et moyens</li> <li>- Remise en cause des systèmes dès leur conception, corrections possibles avant mise en expérimentation</li> <li>- Sélection des systèmes en fonction des enjeux et objectifs fixés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition théorique des systèmes, parfois éloignée de la réalité</li> <li>- Manque de références sur les systèmes les plus innovants</li> <li>- Manque de connaissances sur les liens pratiques/impacts</li> </ul>
Evaluation <i>a posteriori</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Révision de l'expertise</li> <li>- Quantification des impacts des systèmes à l'aide de mesures</li> <li>- Acquisition de nouvelles références</li> <li>- Prise en compte de divers degrés de complexité (différents contextes climatiques et économiques)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démarche lourde et longue à mettre en œuvre, coûteuse (mesures, expérimentation...)</li> <li>- Difficultés d'interprétation des résultats : confusion d'effet entre l'effet du climat, de la maîtrise technique...</li> <li>- Répétition dans le temps nécessaire (effets cumulatifs, variabilité climatique)</li> </ul>

- En termes d'étude de la capacité du système de culture dans son ensemble à atteindre les objectifs qui lui sont assignés lors de la conception (résultats techniques, socio-économiques...);
- En termes de contribution au développement durable, en s'intéressant aux performances économiques, sociales et environnementales du système de culture, au-delà des résultats techniques et des objectifs initiaux fixés par rapport à un seul enjeu local (qualité de l'eau par exemple).

L'étape 5 constitue l'aboutissement de la démarche après que le système de culture ait été validé.

### **3) Forces et faiblesses des méthodes d'évaluation de systèmes de cultures**

---

Les deux étapes de la conception de systèmes de culture mettent en œuvre des boucles de progrès au sein desquelles l'évaluation tient une place prépondérante. Ces deux phases d'évaluation sont complémentaires, chacune possédant des forces et des faiblesses (*tableau 1*).

#### **B. Le projet MicMac Design : conception et évaluation multicritères quantitative de système de culture**

---

##### **1) Objectifs du projet**

---

Le projet MicMac-Design a débuté en 2010 et réunit plusieurs organismes d'enseignement et de recherche ainsi que deux instituts techniques. Il vise à concevoir et à évaluer des systèmes de culture à bas niveau d'intrants conduits selon les principes de la production intégrée en couplant approche expérimentale et modélisation et à quantifier leurs impacts environnementaux (mesures d'émission de GES, analyse des concentrations de pesticides et de nitrates dans les eaux). ([Site internet du projet ANR MicMac Design](#))

Mon stage s'inscrit notamment dans deux objectifs du projet :

- Concevoir des prototypes de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants basés sur les principes de production végétale intégrée et de l'agro-écologie (niveau de rupture 2c, Rapport Ecophyto R&D, [Guichard et Savini, 2009](#)).
- Faire progresser l'évaluation quantitative multicritère des systèmes de culture.

Les références disponibles pour des systèmes de culture innovants en forte rupture avec les systèmes de référence sont rares, l'acquisition de références sur les systèmes du projet grâce à une expérimentation système s'inscrit donc dans le second objectif. Les deux dispositifs du projet ont été instrumentés en conséquence.

##### **2) Démarche de conception engagée**

---

La méthode employée pour le projet ANR MicMac Design s'inspire largement de la méthode de Vereijken et de ses évolutions successives ([Lançon et al., 2007 et 2008](#) ; [Debaeke et al., 2008 et 2009](#) ; [Guichard et Savini, 2009](#)). Elle reprend notamment les quatre premières étapes (*figure 4*). Concernant la 5<sup>ème</sup> étape, la diffusion de systèmes de culture innovants n'est pas un objectif prioritaire du projet, l'objectif étant plutôt d'acquérir des références sur ces systèmes. Aujourd'hui, le projet a atteint l'étape 4, mon stage s'inscrit précisément dans l'étape 4b.

Au début du projet, des ateliers de conception ont été faits afin de définir des objectifs généraux pour les futurs prototypes de SdC puis de concevoir ces derniers. Ces ateliers réunissaient essentiellement des experts. En effet, peu de références sont disponibles sur les systèmes de culture innovants en forte rupture avec les systèmes conventionnels, l'expertise est alors incontournable.

Les propositions de stratégies agronomiques sont donc fondées sur l'expertise des participants et sur les résultats d'essais factoriels menés sur le site de l'INRA de Toulouse (ex : choix des variétés en association).



Les prototypes conçus sont en forte rupture avec les systèmes existants et combinent des techniques innovantes et encore peu répandues. Les systèmes proposés doivent proposer une alternative durable à la rotation blé dur/tournesol et à la monoculture de maïs irrigué. L'accent a été porté sur l'aspect environnemental et les stratégies agronomiques mises en place devraient permettre de diminuer l'impact des systèmes par rapport aux systèmes de référence. De plus, l'aspect économique est aussi ciblé et les systèmes ont été conçus pour garantir un niveau de rentabilité satisfaisant.

Compte tenu des contraintes temporelles du projet, la mise en expérimentation des systèmes s'est faite dès 2010 sans démarche d'évaluation a priori préalable comme le suggérait la démarche initiale. On se pose aujourd'hui la question de l'utilité de cette étape.

### **III. Objectifs du stage et stratégie choisie**

---

#### **A. Problématique et hypothèses testées**

---

Comme nous l'avons présenté précédemment, le projet ANR MicMac Design comprend une démarche de conception à part entière qui inclut des phases d'évaluation des prototypes. Celles-ci posent plusieurs questions : on cherche naturellement à les évaluer mais on se pose également des questions d'ordre méthodologique sur la façon d'évaluer nos SdC et d'identifier les plus « prometteurs » (Quels prototypes permettent de répondre à nos objectifs ? Doivent-ils être améliorés ?). Mon stage contribue donc à la fois à la construction et à la mise en œuvre de la méthode d'évaluation, celle-ci étant testée sur le cas d'étude du projet ANR MicMac Design. Ma problématique est alors la suivante :

**Dans quelle mesure les méthodes d'évaluation a priori et a posteriori contribuent-elles à la caractérisation et à l'amélioration des prototypes de systèmes de culture innovants du projet ANR MicMac Design ?**

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées sur la méthode afin de répondre à cette question :

- 1- Dans le cadre de l'étude de systèmes de culture innovants, les prototypes virtuels conçus par expertise sont idéalisés et peuvent refléter une vision assez éloignée de la réalité. L'évaluation a priori risque d'être biaisée et une évaluation a posteriori est nécessaire pour compléter et/ou corriger cette vision première trop « optimiste ».
- 2- La mise en œuvre d'une évaluation a priori aurait permis de détecter certaines faiblesses du système, de corriger leur trajectoire avant la mise en œuvre expérimentale et ainsi d'optimiser la phase de test en conditions réelles.

De plus, plusieurs hypothèses sont posées sur les prototypes

- 3- Les prototypes du projet permettent d'améliorer la dimension environnementale de la durabilité par rapport à un système de référence tout en préservant la dimension économique et remplissent ainsi les objectifs fixés lors de leur conception.
- 4- L'amélioration par des systèmes innovants de certains critères de la durabilité identifiés comme objectifs se fait au détriment d'autres critères non pris en compte lors de la conception.

#### **B. Objectifs du stage**

---

Le stage s'est articulé autour de trois objectifs complémentaires :

- 1- Etudier la complémentarité des deux méthodes d'évaluation et ainsi apporter une contribution méthodologique et participer à l'amélioration de la démarche d'évaluation des systèmes de culture.
- 2- Evaluer les performances des prototypes de systèmes de culture du projet MicMac Design
- 3- Dégager leurs forces et leurs faiblesses, cibler les points à améliorer et ainsi participer au processus de conception-amélioration des systèmes de projet.

Agro-écologie

Enjeux spécifiques :  
Gestion de l'azote et des pesticides

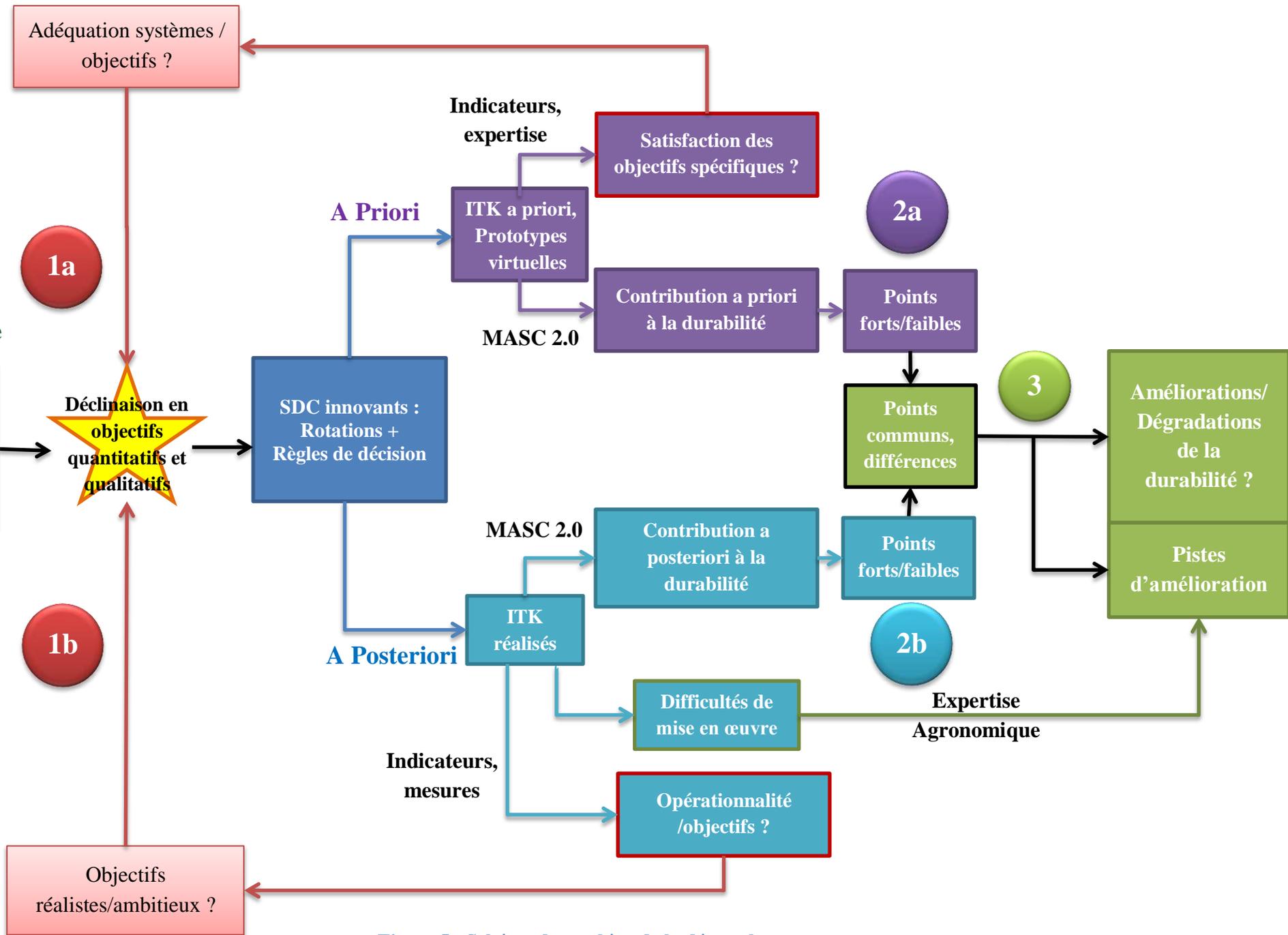


Figure 5 : Schéma de synthèse de la démarche

### C. Stratégie mise en œuvre :

---

La *figure 5* présente le cheminement suivi au cours du stage selon la stratégie que nous avons définie, celle-ci comprend quatre grandes étapes :

- 1- L'évaluation des systèmes par rapport aux objectifs spécifiques du projet : une réduction d'utilisation des intrants et une meilleure gestion de la ressource en eau ;
- 2-
  - a) Une évaluation multicritère *a priori* des performances des prototypes du point de vue de leur contribution à la durabilité grâce au modèle MASC 2.0 ;
  - b) Une deuxième phase d'évaluation multicritères *a posteriori* des performances des prototypes par rapport à la durabilité (**NB** : évaluation indépendante de la première)
- 3- Analyse des résultats confrontation des deux évaluations dans une optique méthodologique.



## Partie II :

---

### Matériels et méthodes



Figure 6 : Les systèmes de culture alternatifs à la rotation Blé dur/Tournesol testés sur le site de l'INRA de Toulouse



Figure 7 : Alternatives à la monoculture de maïs irrigué testées sur le site de l'EIP

Tableau 2 : Leviers mobilisés dans la conception des prototypes pour atteindre les objectifs :

Objectifs visés	Leviers	Systèmes concernés
Diversifier les cultures et mieux maîtriser les bioagresseurs	Allongement de la rotation	Tous les systèmes de l'INRA Toulouse
Conserver un bon niveau de rentabilité	Introduction de cultures rémunératrices (Sorgho)	Systèmes BI
Réduire des apports azotés	Introduction de légumineuses	Systèmes TBI et TBI Asso
Valoriser la variabilité génétique : réduire la sensibilité aux maladies et l'utilisation de fongicides	Utilisation de mélanges variétaux	Systèmes TBI
Réduire les apports azotés Réduire des fuites de nitrates dans les eaux de percolation	Utilisation de cultures intermédiaires	Tous les systèmes CI du projet, MM2, MM3 et MM4
Réduire l'utilisation des pesticides et leur transfert vers les eaux	Désherbage mécanique et localisation des traitements sur le rang	Tous les systèmes du projet
Réduire l'évaporation et donc les pertes en eau Améliorer la gestion des adventices (phénomènes de concurrence) et donc réduire la mécanisation et l'utilisation des pesticides	Mulch et couvert permanent	MM3 et MM4
Améliorer la structure du sol Réduire les coûts de mécanisation	Travail du sol minimal	MM3 et MM4

## **I. Présentation des cas d'étude et des données utilisées:**

---

### **A. Les moyens mis en œuvre dans le cadre du projet**

---

#### **1) Les systèmes du projet ANR MicMac Design**

---

Le projet MicMac Design comprend deux sites d'expérimentations permettant de tester des prototypes alternatifs à la rotation Blé dur /Tournesol à l'INRA de Toulouse d'une part et des systèmes alternatifs à la monoculture de maïs irrigué sur la ferme de l'EIP Purpan d'autre part. Chaque dispositif a été mis en place autour d'un objectif principal :

- La réduction de l'utilisation d'intrants (pesticides et engrais azotés) et le maintien d'un niveau de rentabilité satisfaisant à Toulouse-Auzeville ;
- L'amélioration de la gestion de la ressource en eau, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif pour les systèmes de la ferme de l'EIP.
- Pour les deux dispositifs, le maintien de la rentabilité des systèmes fait partie intégrante des objectifs généraux.

Les *figures 6 et 7* présentent les différents prototypes de systèmes de culture du projet issus des ateliers de conception. Les trois rotations de Toulouse-Auzeville sont déclinées avec ou sans cultures intermédiaires, six systèmes sont donc testés en expérimentation systèmes. Ces prototypes présentent un degré de complexité croissant, du système Bas intrant, relativement proche de la rotation de référence, au système Très bas intrants en association avec cultures intermédiaires qui représente le degré de rupture maximal.

Sur le site de l'EIP, le choix a été fait de tester des évolutions de la monoculture de maïs classique d'une part, des rotations (3 à 6 ans) d'autre part. Compte tenu des difficultés techniques rencontrées lors de la mise en place de l'expérimentation (2011) et du manque de recul (une seule année de données exploitables), ces rotations ne seront pas étudiées.

On peut constater que l'ensemble des systèmes du projet ont été conçus selon divers degrés de rupture avec les systèmes de références et selon les principes de la production intégrée, le *tableau 2* présente quelques leviers techniques et agronomiques mobilisés pour atteindre les différents objectifs.

#### **2) Dispositifs expérimentaux**

---

Sur le site de l'INRA d'Auzeville (*figure 8*), 3 blocs de 3 parcelles sont dédiés à l'expérimentation système du projet MicMac Design. Chaque culture de chaque prototype est représentée dans un des trois blocs de telle façon que les trois cultures du système soient étudiées chaque année. Le dispositif peut être assimilé à trois assolements triennaux. Chaque parcelle élémentaire est divisée en deux, l'une reçoit une culture intermédiaire (CI), l'autre reste en sol nu (SN) pendant l'interculture. La *figure 8* présente une parcelle de référence, il faut noter que celle-ci n'a été mise en place qu'à partir de cette année.

Sur le site de l'EIP (*figure 9*), chaque monoculture est répétée deux fois, comme chaque culture des systèmes expérimentés sur le dispositif. Le système de référence, MM Réf, est inclus dans le dispositif et également mis en œuvre sur deux parcelles.

#### **3) Collecte de données sur les parcelles expérimentales**

---

Les mesures et données recueillies au cours de l'expérimentation ont une place prépondérante dans l'évaluation des performances des systèmes étudiés. Les sites expérimentaux ont donc été instrumentés de façon à recueillir des données qui permettront de quantifier l'impact des prototypes sur leur environnement au cours du temps. Les parcelles sont équipées :

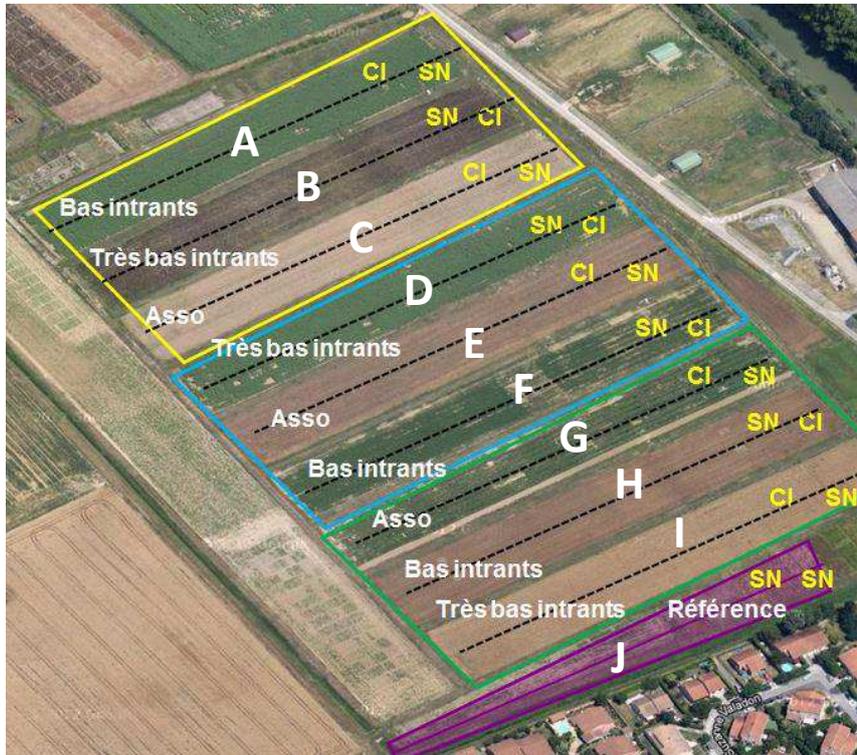


Figure 8 : Dispositif expérimental de l'INRA de Toulouse-Auzeville

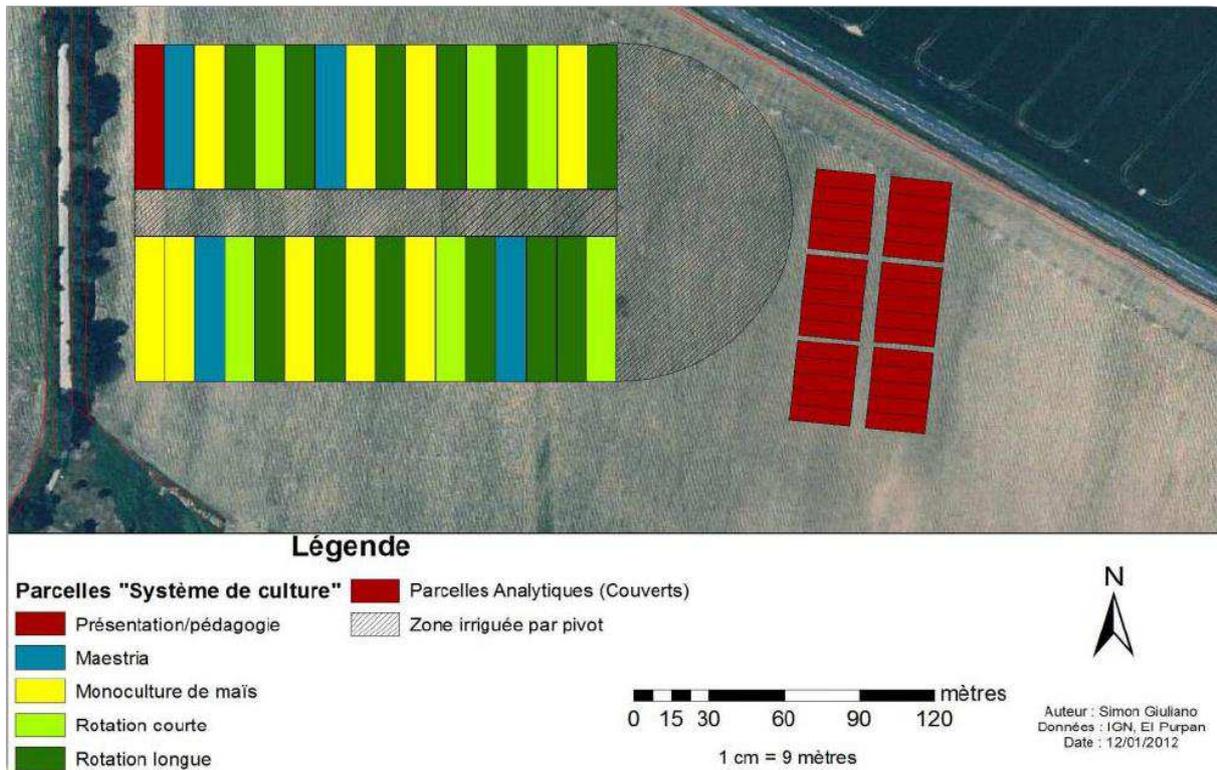


Figure 9 : Dispositif expérimental de la ferme de Lamothe (EIP)

- De plaques lysimétriques permettant de recueillir les eaux de percolation. On peut ainsi quantifier les pertes en nitrates et en pesticides via leurs concentrations dans l'eau et le volume d'eau drainée.
- D'enceintes de mesures d'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O) sur le site de Toulouse.

Un suivi régulier des cultures a également été mis en place grâce à des notations effectuées tout au long du cycle cultural (densité de plantes au m<sup>2</sup>, biomasses, teneurs en azote des plantes...). Enfin, ces mesures sont complétées par des notations sur les adventices et les ravageurs présents ainsi que sur les maladies. Ceci permet en outre de déclencher les traitements phytosanitaires lorsque le seuil de nuisibilité est dépassé.

## **B. Choix de systèmes de référence pour l'évaluation**

---

Selon [Goulet \(2008\)](#) une méthode d'évaluation de la durabilité doit être contextuelle c'est à dire prendre en compte l'ensemble des conditions naturelles, sociales et culturelles. Dans ce but et pour donner des repères pour l'évaluation des prototypes, des références ont été établies pour chaque phase d'évaluation et pour chaque dispositif.

### **1) A priori : référence locale / régionale**

---

Le projet doit être replacé dans son contexte. Tout d'abord régional : on veut comparer les prototypes aux systèmes les plus répandus dans la région, en l'occurrence, la rotation Blé dur/Tournesol et la monoculture de maïs irrigué, et évaluer leur capacité à répondre aux enjeux régionaux. Des itinéraires techniques ont été reconstitués sur la base des [Référentiels technico-économiques de la CRAMP \(2009\)](#).

Cette référence présente un avantage, elle reflète bien les pratiques et les performances du contexte régional dans lequel s'inscrivent les SdC étudiés. Mais il faut noter que les prototypes sont mis en œuvre dans un contexte pédoclimatique (sol profond à fort potentiel), socio-économique (unité expérimentale au fonctionnement différent d'une exploitation agricole) et technique (parc matériel de station expérimentale) particulier. Ceci rend difficile la comparaison des résultats des prototypes et de cette référence.

Par ailleurs, les prototypes sont mis en œuvre dans un contexte particulier, ici au sein de l'unité expérimentale de l'INRA de Toulouse-Auzeville. Les pratiques agricoles y sont légèrement différentes de celles des agriculteurs notamment parce qu'elles bénéficient de l'influence des travaux de recherche (utilisation de pesticides globalement plus faible). Une référence locale correspondant aux pratiques standards mises en œuvre sur les sites expérimentaux où sont étudiés les prototypes était donc nécessaire. Celle-ci a été établie à partir des historiques de pratiques de 2007 à 2010.

### **2) A priori : élaboration de scénarios**

---

D'après [Vereijken \(1997\)](#) et [Debaeke et al. \(2009\)](#), les prototypes doivent être testés dans des contextes variés et ciblés afin d'appréhender les variations de leurs performances. On cherche ici à tester la robustesse des systèmes en fonction des aléas climatiques et économiques. Les différents scénarios économiques et climatiques sont détaillés **annexe I**.

Le choix des années climatiques s'est effectué à l'aide de simulations réalisées avec le modèle de culture STICS ([Brisson et al., 2009](#)) sur les 18 dernières années. Les critères retenus étaient l'importance des phénomènes de drainage et de la pluviométrie car on suppose qu'ils influent directement sur les performances environnementales. Les données économiques correspondent aux prix recueillis sur le site de l'INRA d'Auzeville pour la période 2007-2010. Les scénarios ont été obtenus en croisant les prix des intrants (engrais, produits phytopharmaceutiques, eau et fuel) avec les prix de vente des productions.

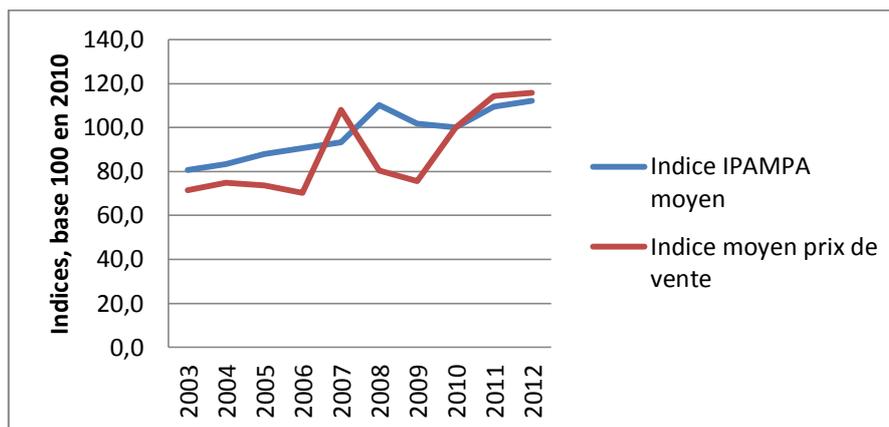


Figure 10: Evolution de l'indice IPAMPA moyen et de l'indice moyen des prix de vente depuis 2003.  
Source INSEE

Tableau 3 : Objectifs généraux des systèmes de culture du projet (Systèmes d'Auzeville) déclinés en sous objectifs et indicateurs.

Réduire l'IFT de la succession "Blé dur - Tournesol" de <b>50%</b> et <b>préserver la qualité de l'eau</b> vis à vis des pesticides	Réduction de l'usage des pesticides (Pratiques)	IFT Total
		IFT Herbicides
		IFT Fongicides
		IFT Insecticides
		Nombre moyen de traitements de semences
	Réduction de l'usage des pesticides (impacts environnementaux)	I-Phy eaux superficielles
		I-Phy eaux profondes
Maîtriser les fuites de <b>molécules azotées actives</b> vers l'environnement	Maîtrise des flux de nitrates vers les eaux souterraines	Azote nitrique lixivié (kg N/ha) INDIGO
	Maîtrise des pertes de N <sub>2</sub> O par volatilisation	N <sub>2</sub> O émis (kg N/ha) INDIGO
Maintenir la <b>viabilité économique</b> du système	Maintien de la rentabilité économique à court terme	Marge Brute (€/ha)
		Marge Semi Nette (€/ha)
	Maîtrise des charges liées à la fertilisation azotée	Quantité d'azote (kg N/ha)
	Garantie de la qualité des produits	Qualité des produits MASC 2.0
Maîtrise à moyen et long terme des bioagresseurs	Maîtrise des bioagresseurs MASC 2.0	

### **3) A posteriori : variation interannuelle du contexte**

---

D'un point de vue climatique, les trois années d'expérimentations sont très différentes. Alors que l'année 2010-11 est proche de la moyenne en ce qui concerne les précipitations (650 mm), l'année 2011-12 a été particulièrement sèche (480 mm). De plus, bien que la campagne 2012-2013 ne soit pas encore terminée, cette année peut déjà être qualifiée d'exceptionnelle, en effet, plus de 770 mm de pluies ont déjà été enregistrés pour la région toulousaine (pour la période s'étendant du 1<sup>er</sup> janvier au 5 août). Cette différence de climats permettra de tester les performances des systèmes en conditions réelles et variées.

D'un point de vue économique, les indices IPAMPA produits par l'INSEE indiquent que le prix des intrants a augmenté. Cependant, les prix agricoles se sont fortement accrus sur la période 2010-2013 et compensent l'augmentation du prix des intrants. On peut donc s'attendre à ce que la rentabilité des systèmes progresse sur la période d'étude. Cependant, ceci n'est qu'une tendance observée sur les dernières années, elle ne peut être généralisée (*figure 10*). Les prix utilisés pour l'évaluation sont les prix constatés lors de la vente des produits aux coopératives où adhèrent l'EIP et l'INRA de Toulouse-Auzeville. Ceci permettra de prendre en compte la variabilité interannuelle des prix pour notre cas d'étude.

## **II. Méthodes d'évaluation employées**

---

### **A. Travail de préparation des évaluations**

---

#### **1) Formalisation des objectifs des prototypes de systèmes de culture**

---

Lors des premiers ateliers de conception, les experts mobilisés ont défini des objectifs à atteindre pour chaque site et chaque système. Cependant, la plupart de ces objectifs étaient définis de façon littérale (par exemple : « valoriser les ressources naturelles abiotiques et biotiques via un système de production intégrée permettant de limiter les dommages dus aux bioagresseurs tout en réduisant l'impact des produits phytosanitaires ») sans systématiquement définir une valeur cible précise à atteindre, ce qui est insuffisant pour réaliser une évaluation objective. Seuls quelques-uns étaient déjà exprimés sous la forme d'une valeur seuil d'indicateur à atteindre (relative ou absolue, ex : « Réduire l'IFT de la succession "Blé - Tournesol" de 50% »).

Avant toute évaluation, un premier travail préalable de synthèse des différents objectifs était nécessaire et a été réalisé en concertation avec les concepteurs du projet. Il s'agissait de repréciser les objectifs généraux des systèmes mais également ceux associés à chaque prototype en les exprimant non plus de façon littérale mais à l'aide de différents indicateurs afin de juger de leur atteinte de façon objective. Ensuite, des seuils à atteindre ont été définis pour chaque indicateur et modulés en fonction du degré de rupture des prototypes avec les systèmes de référence. Cette modulation tient compte de la posture des concepteurs qui attendent des systèmes les plus en rupture une nette amélioration des performances environnementales et qui acceptent en contrepartie une dégradation modérée des performances économiques.

Le *tableau 3* présente les objectifs du dispositif de l'INRA de Toulouse associés aux sous objectifs et aux indicateurs correspondants. Le même tableau pour le site de l'EIP ainsi que les seuils à atteindre pour chaque prototype sont présentés en **annexe II**.

#### **2) Les itinéraires techniques : la base des évaluations**

---

Dans notre démarche d'évaluation, un système de culture doit être caractérisé par un ensemble d'indicateurs dont la plupart sont calculés/renseignés à partir de l'itinéraire technique. Pour l'étude a posteriori, les différents indicateurs ont pu être calculés directement à partir des itinéraires techniques réalisés. Pour l'étude a priori, nous ne disposons que de jeux de règles de décision définis pour chaque prototype lors de leur conception.

**Tableau 4 : Méthode de traduction des règles de décision en opérations culturales pour les itinéraires techniques a priori**

a)	<b>Période prévisionnelle</b>	<b>"Méta-règles de décision" :</b> Choix stratégiques fixés a priori	<b>Règles de décision :</b> Adaptations tactiques flexibles
Faux semis (1er passage)	à partir de mi-mars	Passage d'un outil travaillant le sol plus superficiellement que celui utilisé pour reprendre le labour	Herse étrille en anticipant les levées d'adventices (si reprise au vibroculteur et sol ressuyé limitant les marques de roues) ou herse rotative (si reprise au cultivateur) avant les semis



b)	<b>Opération</b>	<b>Date</b>	<b>Outils</b>	<b>Fréquence d'intervention</b>
	Faux semis	15-mars	Herse étrille	0,8
	Faux semis	15-mars	Herse rotative	0,2

**Tableau 5 : Indicateurs de la méthode INDIGO utilisés dans l'évaluation**

Impacts environnementaux	Indicateurs
Fuites de pesticides dans l'air	I-Phy air
Fuites de pesticides vers les eaux superficielles	I-Phy eaux superficielles
Fuites de pesticides vers les eaux profondes	I-Phy eaux profondes
Lixiviation des nitrates	I NO3
Emission de N2O	I N2O
Volatilisation de NH3	I NH3
Evolution du statut organique des sols	IMO
Consommation d'énergie	CEN
Efficience énergétique	EEN

Le choix a été fait de traduire chaque règle de décision en une opération culturale associée à une probabilité de réalisation. Le *tableau 4* présente un exemple de passage d'une règle (a) à une probabilité (b).

Les fréquences d'intervention ont été déterminées en s'appuyant sur des statistiques régionales (*Référentiel Technico-économique de la CRAMP, 2009*) et à dire d'experts. Chaque itinéraire technique a ensuite été validé par Grégory Véricel, ingénieur chargé de l'expérimentation système à l'INRA de Toulouse et par Simon Giuliano, responsable des expérimentations du site de l'EI Purpan.

## **B. Les indicateurs : objets élémentaires de l'évaluation**

---

### **1) Définitions et utilisation des indicateurs.**

---

Généralement, l'évaluation des performances d'un système agricole se fait à partir de résultats constatés suite à une mise en expérimentation au champ. Des mesures directes sont collectées et renseignent différents aspects, notamment en termes de rendements et de résultats économiques (ex : la marge brute). Certaines mesures peuvent également rendre compte de certains effets des systèmes. Par exemple, il est possible de recueillir les eaux de percolation et d'en déterminer la concentration en nitrate afin de quantifier les pertes d'azote nitrique. Cependant ces mesures directes sont parfois difficiles à obtenir et ne permettent pas forcément de rendre compte de la globalité des performances d'un système, notamment en matière d'environnement.

L'utilisation d'indicateurs, variables permettant de synthétiser d'autres variables plus difficiles d'accès, permet d'appréhender certains aspects qui ne sont pas directement mesurables, ces données étant facilement accessibles et compréhensibles (*Briquel et al, 2001*). Il est parfois plus simple et moins coûteux de mettre en œuvre de telles démarches. De plus, on ne peut se passer de tels outils pour évaluer *a priori* les performances d'un prototype.

Dans le cadre de mes évaluations, l'essentiel des résultats obtenus s'appuient sur l'utilisation d'indicateurs. On peut notamment citer les indicateurs agro-environnementaux de la méthode INDIGO (*Bockstaller et al., 2008*). Ceux-ci permettent d'évaluer des risques environnementaux (pollutions dues aux pesticides, pertes d'azote...), à l'échelle de la rotation, à partir d'une description détaillée des pratiques culturales.

### **2) La méthode INDIGO : indicateurs de risque environnementaux**

---

La méthode INDIGO (*Bockstaller et al., 2008*) traite essentiellement de la dimension environnementale de la durabilité. Elle permet de réaliser un diagnostic et d'estimer l'impact environnemental d'un système sur son environnement à partir d'une description précise des pratiques agricoles mises en œuvre. Le *tableau 5* présente les indicateurs utilisés pour ce mémoire. Chaque indicateur INDIGO est traduit par une note de 1 à 10,1 correspondant à un risque important, 10 à un risque proche de zéro. La valeur de 7 correspond au seuil correspondant à un niveau de risque acceptable. Le logiciel CRITER 2 (*Manuel utilisateur*) a été utilisé pour obtenir ces indicateurs.

Afin d'aborder les performances des prototypes avec un regard élargi, une démarche d'évaluation multicritères avec le modèle MASC 2.0 a été mise en œuvre. L'utilisation d'indicateurs permet de condenser l'information, ceci explique leur utilisation dans cette démarche d'évaluation multicritère.

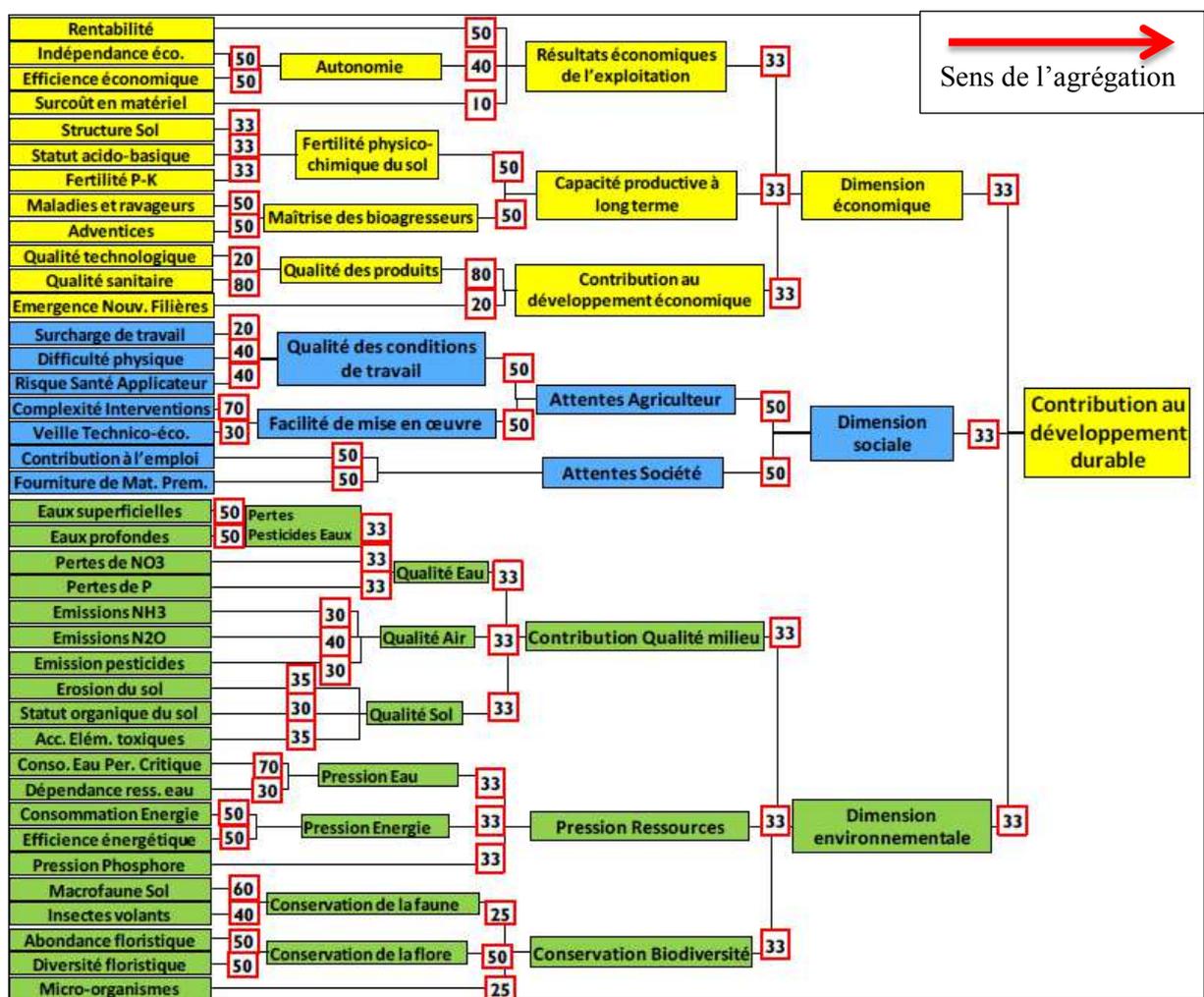


Figure 11 : Arbre d'agrégation hiérarchique du modèle MASC 2.0 complété des pondérations par défaut (Craheix et al., Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0)

Très faible	200	Faible à moyenne	400	Moyenne à élevée	600	Très élevée
-------------	-----	------------------	-----	------------------	-----	-------------

Figure 12 : Valeurs seuils permettant de discrétiser les valeurs obtenus pour la rentabilité d'un système de culture.

Qualite sanitaire	Qualite technonologique et esthetique des produits	Qualite des produits
80%	20%	
1 <b>faible</b>	*	<b>tres faible</b>
2 moyenne	<=moyenne	<b>faible a moyenne</b>
3 moyenne	<b>eleeve</b>	<b>moyenne a elevee</b>
4 <b>eleeve</b>	<b>faible</b>	<b>moyenne a elevee</b>
5 <b>eleeve</b>	>=moyenne	<b>tres elevee</b>

Figure 13 : Exemple de fonction d'utilité : fonction permettant de déterminer la valeur de la qualité des produits à partir de la qualité sanitaire et de la qualité technologique des produits récoltés

## C. Le modèle MASC 2.0 : évaluation multicritère de la contribution des prototypes de systèmes de culture au développement durable

---

### 1) Rappel sur les objectifs de l'évaluation

---

Sadok et al. (2009) ont montré l'intérêt d'utiliser des outils d'aide à la décision multicritère pour évaluer la durabilité. Ces outils permettent d'éclater un concept complexe en concepts plus simples et compréhensibles. On peut ainsi résoudre des problèmes simples qui permettront eux même de répondre à une question plus globale par agrégation (Bohanec, 2011).

De nombreuses méthodes d'évaluation multicritères existent pour aborder les différentes dimensions du développement durable à diverses échelles. On peut notamment citer la méthode IDEA à l'échelle de l'exploitation agricole ou bien la méthode SALCA (reposant sur l'Analyse du Cycle de Vie), cette dernière n'abordant que la dimension environnementale à l'échelle du processus de production agricole.

La méthode MASC est cependant une des seules à utiliser l'échelle du système de culture tout en abordant les trois dimensions de la durabilité. Cette méthode a donc été choisie pour évaluer les prototypes du projet ANR MicMac Design.

### 2) Principe et fonctionnement du modèle (Craheix et al. 2012)

---

Le principe de fonctionnement du modèle MASC 2.0 est fondé sur un arbre d'agrégation hiérarchique (présenté en *figure 11*) mis en œuvre grâce au logiciel d'aide à la décision DEXi (Bohanec, 2011) qui permet de décomposer tout problème décisionnel complexe en sous-problèmes plus faciles à résoudre. Chaque critère de l'arbre est exprimé de façon qualitative sous la forme « fort », « moyen », « faible ».

L'arborescence regroupe deux sortes de critères :

- Les critères basiques (feuilles de l'arbre, à gauche de la *figure 11*) caractérisent le système de culture étudié. Ils sont exprimés de façon qualitative et généralement obtenus grâce à des indicateurs. Trois types d'indicateurs sont utilisés pour renseigner les critères basiques :
  - o Des indicateurs fondés sur des variables calculées à partir de références technico-économiques ou agroenvironnementales. Les variables calculées sont ensuite discrétisées à l'aide de valeurs seuils permettant de traduire les valeurs quantitatives en valeurs qualitatives. Par exemple, la *figure 12* présente la discrétisation de la variable « Rentabilité » (exprimée en €/ha).
  - o Les critères renseignés à dire d'experts (ex : Complexité de mise en œuvre des systèmes)
  - o Les indicateurs renseignés grâce à des « arbres satellites » qui reposent sur le même principe d'agrégation que le modèle MASC, ont été construits par les concepteurs du modèle en intégrant des connaissances expertes et un critère basique complexe (ex : critère « Maîtrise des adventices » obtenu par agrégation de plusieurs indicateurs l'effet du labour ou des méthodes de lutte).
- Les critères agrégés (nœuds de l'arbre) synthétisent pas à pas l'information contenue dans les critères basiques jusqu'au niveau d'agrégation le plus élevé permettant de juger de la contribution du système au développement durable. Cette agrégation se réalise selon des fonctions d'utilité telles que celles présentées en *figure 13*.

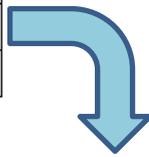
### 3) Adaptation du modèle à la région Midi-Pyrénées : choix des valeurs seuil et des pondérations

---

Le modèle MASC a été conçu de façon à ce que l'utilisateur puisse l'adapter au contexte du projet d'évaluation grâce aux pondérations de l'arbre et aux valeurs seuils permettant de discrétiser les variables quantitatives.

MSN

1er quartile	682
Médiane	814
3ème quartile	974



MSN	Très faible	650	Faible à moyenne	800	Moyenne à élevée	950	Très élevée
-----	-------------	-----	------------------	-----	------------------	-----	-------------

Figure 14 : Détermination des valeurs seuils : exemple de la Marge Semi Nette

Pour évaluer les prototypes du projet MicMac Design, les pondérations par défaut ont été utilisées, aucun aspect de la durabilité n'étant particulièrement mis en avant dans notre contexte.

Afin d'adapter le modèle au contexte de la région Midi-Pyrénées, la discrétisation de certaines variables quantitatives a été modifiée : la Marge Semi Nette caractérisant la rentabilité des systèmes, l'efficacité économique, la Demande en eau et la Consommation d'eau en période critique. Les valeurs seuils des trois premières variables ont été déterminées en fonction de l'ensemble des valeurs rencontrées (*figure 14*). Les seuils de la Consommation d'eau en période critique ont été déterminés lors d'une précédente évaluation de systèmes de culture en région Midi-Pyrénées (*Mémoire A. Dingli, 2011*) (valeurs seuils en **annexe III à IV**).

L'ensemble des outils et méthodes présentés précédemment ont été utilisés afin d'évaluer les systèmes du projet ANR MicMac Design. L'objectif de cette démarche est d'évaluer les prototypes par rapport aux objectifs du projet mais également de déceler des effets collatéraux dégradant ou améliorant des aspects de la durabilité non pris en compte lors de la conception des systèmes de culture innovants.

Les deux dispositifs testant deux types de systèmes différents, des alternatives à la rotation blé dur/tournesol d'une part, à la monoculture de maïs irrigué d'autre part, les résultats en termes de performances et d'atteinte des objectifs seront, dans un premier temps, présentés séparément. Dans un second temps, j'utiliserai les résultats obtenus pour illustrer des tendances observées et/ou des points d'ordre méthodologique.



## Partie III :

---

### Présentation des résultats

**Tableau 6: Evaluation de l'atteinte des objectifs par le système Bas intrants avec cultures intermédiaires a priori et pour la période 2011-12 : détail de la méthode**

	A priori				A posteriori			
	Référence locale a priori	Objectifs	Valeurs cibles	BI CI a priori	Référence 11-12	Objectifs	Valeurs cibles	BI CI 2011-12
IFT Total	1,6	-50%	0,8	0,8	2,0	-50%	1,0	0,4
IFT Herbicide	0,9	</= référence	0,9	0,3	1,5	</= référence	1,5	0,4
IFT Fongicide	0,6	</= référence	0,6	0,3	0,5	</= référence	0,5	0
IFT Insecticide	0	</= référence	0	0,1	0	</= référence	0	0
Nombre moyen de traitements de semences	1	</= référence	1,0	0,7	1	</= référence	1,0	0,7
I-Phy eaux superficielles	9,2	7	7	9,4	9,4	7	7	10
I-Phy eaux profondes	8,2	7	7	8,2	8,5	7	7	9,8
Azote nitrique lixivié (kg N/ha) INDIGO	0,46	-30%	0,32	0,25	1,47	-30%	1,03	0,5
N2O émis (kg N/ha) INDIGO	1,45	-20%	1,16	1,23	1,63	-20%	1,31	0,8
Marge Brute (€/ha)	863	-5% accepté	819	952	1180	-5% accepté	1121	1406
Marge Semi Nette (€/ha)	645	-5% accepté	613	694	943	-5% accepté	895	1102
Quantité d'azote (kg N/ha)	113	-20%	90	104	110	-20%	87	88
Qualité des produits MASC 2.0	Moyenne à élevée	Elevée	Elevée	Elevée	Faible à moyenne	Elevée	Elevée	Elevée
Maîtrise des bioagresseurs MASC 2.0	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Faible à moyenne

Légende : Vert = objectif atteint, Orange = objectif non atteint

Dans un objectif de concision, seule une partie des évaluations des systèmes sera présentée dans la suite du mémoire. Un système est décliné en détail pour exposer la méthode d'analyse des résultats (BI CI, scénario « marché moyen » pour l'évaluation *a priori* et moyenne des campagnes 2011 et 2012 pour l'évaluation *a posteriori*), suivi d'une synthèse pour tous les systèmes du dispositif. Les diagrammes détaillés sont consultables en **annexes VI à XIV**. Les prototypes des deux dispositifs (EIP et Auzeville) ne sont pas comparables entre eux (objectifs et contexte pédo-climatique différents, SdC de référence différents), et seront donc décrits séparément.

Dans une première partie, les résultats *a priori* et *a posteriori* seront analysés en tant que tels afin de répondre aux hypothèses 3 et 4 portant sur les performances des systèmes innovants puis dans une seconde partie les résultats *a priori* et *a posteriori* seront confrontés pour répondre aux hypothèses 1 et 2 portant sur la méthodologie de l'évaluation.

La campagne 2012-2013 n'étant pas encore arrivée à son terme, les données présentées traduisent les résultats obtenus pour les prototypes de système de culture du projet au cours de la période 2011-2012, ces résultats ne représentant pas une rotation complète, leur analyse ne permettra de dégager que des tendances.

## **I. Analyse de l'atteinte des objectifs des systèmes**

---

Le paragraphe suivant correspond à la mise en œuvre de l'étape 1 présentée dans la *figure 5*.

### **A. Résultats pour les systèmes alternatifs à la rotation Blé dur/Tournesol**

---

#### **1) Détail de la méthode : étude du système BI CI**

---

Les objectifs du système BI CI ont été centrés sur une réduction de l'utilisation des intrants de 50% et une baisse de la quantité d'azote épanchée et perdue par lixiviation. Le *tableau 6* présente la démarche d'analyse de l'atteinte des objectifs pour les systèmes du projet : chaque système se voit attribuer un vecteur de valeurs cibles correspondant à l'expression numérique des objectifs à atteindre (cf : description de cette étape de formalisation dans la Partie 2, II, A, 1). Les valeurs atteintes (*a priori* ou réellement atteinte *a posteriori*) sont ensuite comparées à ces valeurs cibles.

**A priori :** Les colonnes 2 à 5 du *tableau 6* présentent l'analyse de l'atteinte des objectifs *a priori*, les valeurs ont été obtenues à partir des « Itinéraires techniques fréquentiels ». On constate que la plupart des objectifs du système sont atteints. Seuls l'IFT insecticide et la dose d'azote dépassent les valeurs cibles.

**A posteriori :** Les colonnes 6 à 9 du *tableau 6* mettent en évidence que la quasi-totalité des objectifs sont atteints pour le système BI CI. Seul l'objectif de maîtrise des bioagresseurs n'a pas été atteint (pas de changement par rapport à la référence) et reste à améliorer.

En comparant les résultats *a priori* et *a posteriori*, il semble que le système soit **plus performant que prévu**. Les prévisions d'utilisation d'insecticides et de fertilisation azotée ont été vraisemblablement surestimées dans l'ITK fréquentiel. On peut attribuer ces écarts à la méthode de construction des itinéraires techniques *a priori*. En effet, les règles de décisions sur lesquelles se basent les ITK sont exhaustives et prévoient, par exemple, l'utilisation d'insecticides en cas de « forte attaque » (fréquence difficile à déterminer).

**En conclusion**, le système Bas Intrants avec cultures intermédiaires atteint globalement les objectifs fixés, *a priori* et *a posteriori*, qu'ils soient économiques (bonne rentabilité économique) ou environnementaux (nette diminution de l'utilisation de pesticides). Ce système répond donc aux objectifs globaux du projet ANR MicMac Design.

#### **2) Synthèse des réponses des systèmes du projet**

---

La démarche présentée dans le paragraphe précédent a été appliquée aux autres systèmes innovants. Le *tableau 7* récapitule système par système les résultats de cette analyse en déclinant pour chaque indicateur : la valeur cible (objectif à atteindre) et les valeurs prises par l'indicateur, *a priori* (colonne de gauche) et *a*

	Référence		BI		BI CI		TBI		TBI CI		TBI Asso		TBI Asso CI	
	A priori	A post.	A priori	A post.	A priori	A post.	A priori	A post.	A priori	A post.	A priori	A post.	A priori	A post.
IFT Total	-		-50% par rapport à la référence				-75% par rapport à la référence							
	1,6	2,0	0,8	0,3	0,8	0,4	0,6	1,2	1,0	0,8	0,8	0,7	0,8	0,5
IFT Herbicide	-		< ou = IFT H de la référence											
	0,9	1,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,8	0,6	0,4	0,1	0,3	0,1	0
IFT Fongicide	-		< ou = IFT F de la référence											
	0,6	0,5	0,3	0	0,3	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2
IFT Insecticide	-		< ou = IFT I de la référence											
	0	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,4	0,3	0,4	0,3
Nombre moyen de traitt de semences	-		< ou = Nombre de TS de la référence											
	1	1	0,7	0,7	0,7	0,7	1	0,9	1	0,9	1	1	1	1
I-Phy eaux superficielles	-		I-Phy eaux sup > 7				I-Phy eaux sup > 8							
	9,2	9,4	9,4	10	9,4	10	9,4	9,7	9,4	10	9,7	9,7	9,7	10
I-Phy eaux profondes	-		I-Phy eaux sup > 7				I-Phy eaux sup > 8							
	8,2	8,5	8,2	9,8	8,2	9,8	8,7	9,5	8,7	9,8	9,7	9,7	9,7	10
Azote nitrique lixivié (kg N/ha) INDIGO	-		-20%		-30%		-33%		-40%		-50%		-60%	
	0,45	1,47	0,25	1,07	0,25	0,5	0,09	1,94	0,05	0,9	0,05	1,89	0	1,4
N2O émis (kg N/ha) INDIGO	-		-20%				-35%				-50%			
	1,45	1,63	1,45	1,06	1,23	0,8	1,60	1,63	1,57	3,6	1,07	3,82	1,02	1,9
Marge Brute (€/ha)	-		-5% accepté				-15% accepté				-20% accepté			
	863	1180	970	1345	952	1406	834	1115	789	1081	964	1033	939	971
Marge Semi Nette (€/ha)	-		-5% accepté				-15% accepté				-20% accepté			
	645	943	711	1058	694	1102	605	850	468	712	714	749	662	605,
Quantité d'azote apportée (kg N/ha)	-		-20%				-35%				-50%			
	113	110	117	88	104	88	50	36	48	51	52	34	53	40
Qualité des produits MASC 2.0	-		Elevée											
	Moy./ El.	Fa./Moy.	Elevée	Elevée	Elevée	Elevée	Elevée	Moy./ El.	Elevée	Moy./ El.	Fa/Moy	Fa/Moy	Fa/Moy	Fa/Moy
Maîtrise des bioagresseurs MASC 2.0	-		Moyenne à élevée											
	Fa/Moy	Fa/Moy	Fa/Moy	Fa/Moy	Moy./ El.	Fa/Moy	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.	Moy./ El.

Tableau 7 : Synthèse de l'analyse a priori et a posteriori de l'atteinte des objectifs pour les systèmes d'Auzeville

*posteriori* (colonne de droite). Le code couleur est le suivant : vert quand l'objectif est atteint, orange quand il ne l'est pas.

**Analyse a priori :** De façon générale, tous les prototypes présentent, en valeur absolue, une diminution significative des IFT totaux ainsi qu'une amélioration des indicateurs I-Phy par rapport à la référence. De façon relative et en terme d'objectifs, alors que les systèmes BI, BI CI et TBI atteignent leurs objectifs en matière de réduction de l'utilisation de pesticides, les systèmes TBI CI, TBI Asso et Asso CI, plus en rupture, ne permettent pas de réduire l'IFT total de 75%. Le système BI, pour lequel on observe une réduction de l'IFT total de 50%, égale dans certains cas leurs performances (Asso et Asso CI) et présente même de meilleurs résultats (TBI CI). Deux raisons peuvent expliquer cela : tout d'abord, l'objectif de réduction de l'IFT pour les systèmes TBI est plus élevé (-75% contre 50% pour les systèmes BI). De plus, les légumineuses, plantes peu concurrentielles pour les adventices et sensibles aux maladies et ravageurs, rendent difficile une réduction trop importante de l'utilisation de pesticides qui pourrait entraîner une baisse du résultat économique. Aucun système n'atteint les objectifs liés à l'IFT insecticides (cf § I.A.1.).

On remarque que les systèmes BI n'atteignent pas les objectifs de réduction de la fertilisation azotée, contrairement aux systèmes dont les rotations comportent des légumineuses. On notera également qu'aucun prototype n'atteint les objectifs de réduction des émissions de N<sub>2</sub>O (sauf BI CI).

**Analyse a posteriori :** Les systèmes BI et BI CI se révèlent plus performants qu'à travers l'analyse *a priori* puisque seule la maîtrise des bioagresseurs n'atteint pas le niveau souhaité. En revanche, les systèmes plus en rupture ont des résultats contrastés : les systèmes TBI, TBI CI, TBI Asso et TBI Asso CI n'atteignent pas leurs objectifs ni pour l'IFT, ni pour les émissions de N<sub>2</sub>O, les pertes en nitrate ou la qualité des produits.

Les systèmes TBI CI, TBI Asso et Asso CI ne satisfont pas non plus aux exigences économiques : bien que tous les systèmes semblent atteindre leurs objectifs en termes de marge brute (*a priori* comme *a posteriori*), le bilan par rapport à la marge semi nette permet d'aborder l'impact des charges de mécanisation des prototypes. Les systèmes innovants requièrent un nombre plus important d'interventions et ceci impacte directement la marge semi nette qui semble réduite *a posteriori*.

Les objectifs sur les aspects à moyen terme, la qualité des produits et la maîtrise des bioagresseurs, sont globalement satisfaits. Seuls les systèmes en cultures associées ne garantissent pas une qualité des produits satisfaisante. Les difficultés rencontrées pour trier les grains et ainsi satisfaire aux exigences d'organismes collecteurs expliquent ce résultat.

L'analyse *a posteriori* confirme les résultats en matière de réduction de l'IFT : les systèmes les plus en rupture n'atteignent pas leur objectif de réduction de l'IFT de 75% (ligne 2 du [tableau 7](#)) (sauf Asso CI) et sont même moins performants que les systèmes BI et BI CI qui permettent une réduction significative de 80% de l'IFT total par rapport à la référence. On remarque que les résultats de TBI sont nettement dégradés par rapport à l'analyse a priori : cela peut s'expliquer par une mauvaise maîtrise du désherbage mécanique sur l'une des parcelles en 2011 et la nécessité d'utiliser davantage d'herbicides l'année suivante pour pallier à ce problème.

On constate donc quelques divergences entre les analyses *a priori* et *a posteriori* : la première approche ayant tendance à sous-estimer par rapport à la deuxième les performances des systèmes les plus proches de la référence (objectifs en termes d'IFT insecticide, d'émissions de N<sub>2</sub>O et de fertilisation azotée non atteints a priori mais atteints a posteriori pour BI et BI CI). En revanche, on constate que les systèmes TBI et TBI Asso, ont un niveau d'émission de N<sub>2</sub>O équivalent voire supérieur à la référence. Ceci peut directement être associé aux légumineuses introduites dans ces rotations.

**En conclusion**, les systèmes du dispositif de Toulouse –Auzeville répondent globalement aux objectifs de **réduction d'utilisation d'intrants**. En revanche, les **objectifs économiques** ne sont que partiellement atteints. Les systèmes les moins en rupture sont les plus performants, tant du point de vue économique que du point de vue de la gestion des pesticides et des fuites de molécules azotées. La rentabilité des systèmes les plus en rupture est diminuée par rapport au système de référence. **Un premier bilan sur l'atteinte des objectifs laisse supposer que les prototypes n'atteindront pas tous les objectifs fixés au début du projet.**

	<b>MM Réf</b>		<b>MM2</b>		<b>MM3</b>		<b>MM4</b>	
	<b>A priori</b>	<b>A Post.</b>	<b>A priori</b>	<b>A Post.</b>	<b>A priori</b>	<b>A Post.</b>	<b>A priori</b>	<b>A Post.</b>
Qt d'eau d'irrigation (mm)	-		<b>-25%</b>				<b>&lt; ou = référence</b>	
	190	280	180	220	180	234	180	287
Azote nitrique lixivié (kg N/ha) INDIGO	-		<b>-66%</b>					
	0	1.06	0	1,09	0	1,07	0	1,15
I-Phy eaux superficielles	-		<b>I-Phy eaux superficielles &gt;= 7</b>					
	9,0	9,0	9,8	9,8	8,9	9,6	9,5	9,5
I-Phy eaux profondes	-		<b>I-Phy eaux profondes &gt;= 7</b>					
	7,7	7,6	9,1	9,9	7,7	9,1	9,6	8,6
IFT total	-		<b>-66%</b>				<b>-25%</b>	
	1,7	1,8	1,3	0,85	2,0	2,58	1,4	1,43
IFT Herbicide	-		<b>-66%</b>				<b>&lt; ou = référence</b>	
	1,7	1,8	1,3	0,85	2,0	2,58	1,4	1,43
Marge Brute (€/ha)	-		<b>&gt; ou = référence</b>		<b>-15% accepté</b>		<b>-25% accepté</b>	
	1213	1281	1122	1455	913	764	927	479
Marge Semi Nette (€/ha)	-		<b>-15% accepté</b>		<b>&gt; ou = référence</b>		<b>-15% accepté</b>	
	955	787	785	954	710	331	684	-5
Rendement	-		<b>-10% accepté</b>		<b>-15% accepté</b>		<b>-25% accepté</b>	
	115	112	105	114	95	82	90	58
Charges de mécanisation	-		<b>&lt; ou = référence</b>		<b>-25%</b>		<b>&lt; ou = référence</b>	
	258	494	337	500	203	433	243	484
Charges opérationnelles irrigation	-		<b>-25%</b>		<b>-20%</b>			
	179	196	169	154	169	164	169	201

**Tableau 8 : Synthèse de l'analyse a priori et a posteriori de l'atteinte des objectifs pour les systèmes de l'EIP**

## B. Résultats pour les systèmes alternatifs à la monoculture de maïs

---

Les prototypes testés sur le site de l'EIP proposent des alternatives à la monoculture de maïs irrigué de référence (ici MM Réf). Les objectifs principaux concernaient la **gestion quantitative et qualitative de l'eau**. Le *tableau 8* présente le bilan de l'atteinte des objectifs pour les systèmes de l'EIP : en première approche, on constate que peu d'objectifs sont atteints pour les trois monocultures *a priori* comme *a posteriori*.

*A priori*, les systèmes MM2 et MM3 n'atteignent que quatre de leurs objectifs, en matière de pertes en nitrates, de rendement et de réduction des risques liés aux fuites de pesticides (I-Phy). Le système MM4 semble être prometteur puisque seuls les objectifs liés à la diminution d'utilisation des pesticides (IFT) et aux charges (Marge semi nette et charges opérationnelles) ne sont pas satisfaits.

*A posteriori*, le système MM2 semble plus performant et présente des rendements supérieurs à la référence, ceci ajouté aux réductions d'utilisation d'intrants explique ses très bonnes performances économiques (Marge Brute de 1455€/ha contre 1281 pour MM Réf). Les **pertes en nitrate** des trois systèmes, calculées par CRITER, sont du même ordre de grandeur que celles de la référence et restent à un **niveau très faible**, ces résultats sont surprenants dans la mesure où aucun effet des cultures intermédiaires n'apparaît. Une erreur du logiciel est très probablement à l'origine de ces valeurs. En revanche, le prototype MM3 se satisfait plus qu'aux objectifs de réduction des risques liés aux pesticides, tout comme MM4 qui répond à deux objectifs supplémentaires en matière d'irrigation et de charges de mécanisation. Ces deux systèmes présentent de faibles rendements impactant directement leurs performances économiques, également très faibles (marge semi nette négative pour MM4 !). Il faut noter que ces systèmes utilisent des techniques innovantes (strip-till notamment) et délicates à mettre en œuvre. De plus, d'autres difficultés dues au climat peuvent expliquer ces résultats.

Le **suivi des concentrations de pesticides** dans les eaux de percolations a donné des résultats significatifs sur le site de l'EIP (Alletto et al, 2013). Les résultats montrent un effet significatif du système MM2 sur les pertes en pesticides. La technique de localisation des traitements sur le rang étant particulièrement utilisée pour ce système, il semblerait que ce soit une solution pour diminuer les pertes de pesticides. En revanche, les fuites de pesticides des systèmes MM3 et MM4, utilisant le strip-till, sont plus importantes. Les auteurs expliquent ces résultats par la création de **zones d'écoulement préférentielles (non prévisibles par la méthode INDIGO)**.

**En conclusion**, le système MM2 représente, *a posteriori*, une amélioration de la monoculture de maïs de référence, grâce à l'usage d'une variété semi-précoce de maïs productive et à la réduction d'utilisation d'intrants et notamment d'eau d'irrigation, ce qui se traduit par de bons résultats économiques. Les systèmes MM3 et MM4 présentent quelques améliorations d'un point de vue environnemental mais leurs performances économiques sont très inférieures à celles de la référence.

Le système **MM2 répond donc bien aux objectifs globaux du projet**, tant économiques qu'environnementaux même si l'objectif de réduction de l'IFT de 2/3 fixé par les concepteurs – sans doute très optimiste - n'est pas atteint. Les systèmes MM3 et MM4 se sont révélés plus complexes à mettre en œuvre que prévu et leurs résultats économiques s'en ressentent fortement, ils sont donc relativement loin des objectifs fixés. Ils ont tout de même permis de **mettre en lumière des processus** de transfert de pesticides que les concepteurs n'avaient pas anticipé (création de zone d'écoulements préférentiels par le strip-tiller).

### Conclusion partielle :

Cette première partie pointe des divergences entre les analyses *a priori* et *a posteriori* mais permet tout de même de dégager deux groupes de prototypes : (i) les systèmes proches des systèmes de référence (BI, BI CI et MM2) atteignent globalement les objectifs du projet, (ii) les systèmes plus en rupture (TBI, TBI Asso, MM3 et MM4) qui n'atteignent que partiellement leurs objectifs, les objectifs économiques étant rarement atteints. Ces premiers résultats sont à compléter, notamment à l'aide de l'évaluation multicritère MASC.

Faible à moyenne	2 /4	Rentabilité											
Moyenne à élevée	3 /4	Indépendance économique											
Moyenne à élevée	3 /4	Efficacité économique	3 /4	Autonomie économique	3 /4	Résultats économiques de l'exploitation							
Faible	3 /3	Surcoût en matériel											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise du statut acido-basique du sol											
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'état structural du sol	4 /4	Maîtrise de la fertilité physico-chimique	3 /4	Capacité productive à long terme	4 /15	Dimension économique					
Très élevée	4 /4	Maîtrise de la fertilité phosphotassique											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des maladies et ravageurs											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des adventices	2 /4	Maîtrise des bioagresseurs									
Moyenne	2 /3	Qualité sanitaire											
Elevée	3 /3	Qualité technologique et esthétique des produits	3 /4	Qualité des produits	3 /4	Contribution au développement économique							
Null	1 /3	Contribution à l'émergence de nouvelles filières											
Moyenne à élevée	3 /4	Contribution à l'emploi											
Faible à moyenne	2 /4	Fourniture de matières premières											
Faible à moyenne	3 /4	Complexité des itinéraires techniques											
Faible	3 /3	Temps de veille technico-économique	4 /4	Facilité de mise en oeuvre	4 /4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	5 /15	Dimension sociale					
Moyenne	2 /3	Surcharge de travail											
Faible	3 /3	Risque pour la santé de l'applicateur	4 /4	Qualité des conditions de travail	4 /4								
Faible	3 /3	Difficulté physique											
Moyenne à élevée	3 /4	Eaux profondes	4 /4	Contribution à la qualité de l'eau	4 /4	Contribution à la qualité du milieu							
Très élevée	4 /4	Eaux superficielles	4 /4										
Très élevée	4 /4	Maîtrise des pertes de NO <sub>3</sub>											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des pertes de P											
Très élevée	4 /4	Maîtrise des émissions de NH <sub>3</sub>											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de N <sub>2</sub> O	3 /4	Contribution à la qualité de l'air	2 /4								
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air											
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise du statut organique	1 /4	Préservation de la qualité du sol									
Très faible	1 /4	Maîtrise de l'érosion											
Faible	3 /3	Consommation d'eau d'irrigation en période											
Faible	3 /3	Dépendance vis à vis de la ressource en eau	4 /4	Pression Eau	3 /4	Pression sur les ressources							
Moyenne	2 /3	Consommation en énergie											
Faible	1 /3	Efficacité énergétique	2 /4	Pression Énergie									
Faible à moyenne	3 /4	Pression Phosphore											
Faible à moyenne	2 /4	Conservation des insectes volants											
Très faible	1 /4	Conservation de la macrofaune du sol	1 /4	Conservation de la macrofaune	2 /4	Conservation de la biodiversité							
Moyenne à élevée	3 /4	Abondance floristique											
Faible à moyenne	2 /4	Diversité floristique	3 /4	Conservation de la flore									
Faible à moyenne	2 /4	Conservation des micro-organismes											

Figure 15 : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori de la référence Blé dur / Tournesol

Moyenne à élevée	3 /4	Rentabilité											
Très élevée	4 /4	Indépendance économique											
Très élevée	4 /4	Efficacité économique	4 /4	Autonomie économique	3 /4	Résultats économiques de l'exploitation							
Elevée	1 /3	Surcoût en matériel											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise du statut acido-basique du sol											
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'état structural du sol	4 /4	Maîtrise de la fertilité physico-chimique	4 /4	Capacité productive à long terme	5 /15	Dimension économique					
Très élevée	4 /4	Maîtrise de la fertilité phosphotassique											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des maladies et ravageurs											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des adventices	3 /4	Maîtrise des bioagresseurs									
Elevée	3 /3	Qualité sanitaire											
Elevée	3 /3	Qualité technologique et esthétique des produits	4 /4	Qualité des produits	4 /4	Contribution au développement économique							
Null	1 /3	Contribution à l'émergence de nouvelles filières											
Moyenne à élevée	3 /4	Contribution à l'emploi											
Moyenne à élevée	3 /4	Fourniture de matières premières											
Très élevée	1 /4	Complexité des itinéraires techniques											
Faible	3 /3	Temps de veille technico-économique	1 /4	Facilité de mise en oeuvre	2 /4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	3 /15	Dimension sociale					
Faible	3 /3	Surcharge de travail											
Faible	3 /3	Risque pour la santé de l'applicateur	4 /4	Qualité des conditions de travail									
Faible	3 /3	Difficulté physique											
Moyenne à élevée	3 /4	Eaux profondes	4 /4	Contribution à la qualité de l'eau	4 /4	Contribution à la qualité du milieu							
Très élevée	4 /4	Eaux superficielles	4 /4										
Très élevée	4 /4	Maîtrise des pertes de NO <sub>3</sub>											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des pertes de P											
Très élevée	4 /4	Maîtrise des émissions de NH <sub>3</sub>											
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de N <sub>2</sub> O	4 /4	Contribution à la qualité de l'air	4 /4								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air											
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques											
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise du statut organique	2 /4	Préservation de la qualité du sol									
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise de l'érosion											
Faible	3 /3	Consommation d'eau d'irrigation en période											
Moyenne	2 /3	Dépendance vis à vis de la ressource en eau	4 /4	Pression Eau	3 /4	Pression sur les ressources							
Moyenne	2 /3	Consommation en énergie											
Moyenne	2 /3	Efficacité énergétique	3 /4	Pression Énergie									
Moyenne à élevée	2 /4	Pression Phosphore											
Moyenne à élevée	3 /4	Conservation des insectes volants											
Très faible	1 /4	Conservation de la macrofaune du sol	1 /4	Conservation de la macrofaune	1 /4	Conservation de la biodiversité							
Faible à moyenne	2 /4	Abondance floristique											
Faible à moyenne	2 /4	Diversité floristique	2 /4	Conservation de la flore									
Moyenne à élevée	3 /4	Conservation des micro-organismes											

Figure 16 : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori du système BI CI

## II. Contribution des systèmes au développement durable

---

Le paragraphe suivant correspond à la mise en œuvre de l'étape 2 présentée dans la [figure 5](#).

### A. Evaluation des systèmes alternatif à la rotation Blé dur/Tournesol

---

#### 1) Etude de la référence

---

##### a) Etude a priori :

D'après la [figure 15](#), on constate que la référence « Blé dur/Tournesol » est déjà performante de par sa Contribution au développement durable (note globale de 5/7). Sa **dimension économique** est élevée (4/5). Et équilibrée entre les trois critères Résultats de l'exploitation, Capacité productive à long terme et Contribution au développement économique, (note de 3/4 pour ces trois critères). Certains critères économiques sont perfectibles, notamment la Contribution à l'émergence de nouvelles filières (note minimale de 1/3 soit très faible). La note de la référence pour la **dimension sociale** est très élevée (5/5). Ici, la marge d'amélioration est peu importante puisque la plupart des critères atteignent déjà des valeurs très élevées.

Enfin, la **dimension environnementale** de la référence constitue sa principale faiblesse. L'ensemble des critères sont perfectibles. Les principaux points à améliorer sont la Maîtrise de l'érosion et la Contribution à la biodiversité (2/4, soit faible). L'utilisation fréquente de pesticides et la présence d'un labour tous les deux ans impactent négativement la biodiversité (notamment la macrofaune du sol) et peuvent expliquer cette mauvaise note.

##### b) Etude a posteriori :

Le diagramme synoptique de l'évaluation *a posteriori* (présenté en **annexe VI**) comporte quelques points de divergence avec l'*a priori* : la **dimension économique** est améliorée (5/5 au lieu de 4/5), ceci s'explique par une très faible utilisation d'intrants et par des rendements supérieurs en 2011-12 aux rendements moyens pour le site de l'INRA de Toulouse-Auzeville (de 2007 à 2010 pris pour construire la référence). La **dimension sociale** reste inchangée. Enfin, la **dimension environnementale** est également améliorée (3/5 contre 2/5) du fait d'une moindre utilisation de pesticides. On peut se poser la question de la validité de la référence *a posteriori*. En effet, les parcelles utilisées pour construire cette référence n'appartiennent pas à MicMac Design (distantes d'un kilomètre environ), la gestion de ces parcelles est différente de celle de l'essai, en effet, celles-ci ne représentent pas d'enjeux particuliers pour l'unité expérimentale de l'INRA.

**En conclusion**, malgré les légères divergences entre l'*a priori* et l'*a posteriori*, l'évaluation montre que la référence blé dur/ tournesol semble déjà **performante** du point de vue de sa Contribution au développement durable. La note de la dimension environnementale montre cependant de larges possibilités d'amélioration.

#### 2) Etude du système Bas Intrants avec cultures intermédiaires

---

##### a) Evaluation a priori

L'étude de la [figure 16](#) permet de dire que le système BI CI est performant par rapport à sa Contribution au développement durable (note de 5/7). Cette performance globale est améliorée d'un point par rapport à la référence notamment grâce à l'amélioration des notes des dimensions économique et environnementale – la note de la dimension sociale étant quant à elle légèrement dégradée. La **dimension économique** du système BI CI apparaît comme très bonne (5/5), en raison d'un bon Résultat économique (4/5) mais surtout grâce aux deux autres critères, la Capacité productive à long terme et la Contribution au développement économique (4/4). Le prototype est donc plus performant que sa référence. Ses seules faiblesses sont un surcoût en matériel très élevé (achat d'une bineuse, d'une herse étrille et d'un kit de pulvérisation) et une faible Contribution à l'émergence des filières (le blé dur, le tournesol et le sorgho sont déjà bien implantés dans la région). La **dimension sociale** est considérée comme moyenne (3/5), la faible satisfaction des attentes de l'agriculteur (2/4) due à la complexité de mise en œuvre du système innovant en est la principale cause. Le prototype présente donc une note dégradée par rapport à la référence pour ce critère. En revanche, la **dimension environnementale**, bien que moyenne (3/4), est améliorée par rapport au système classique, notamment grâce à une très bonne Contribution à la qualité du milieu (4/4). On observe toutefois une dégradation de la Conservation de la biodiversité, imputable au critère d'abondance floristique. La pertinence de ce critère sera discutée plus loin dans ce mémoire.

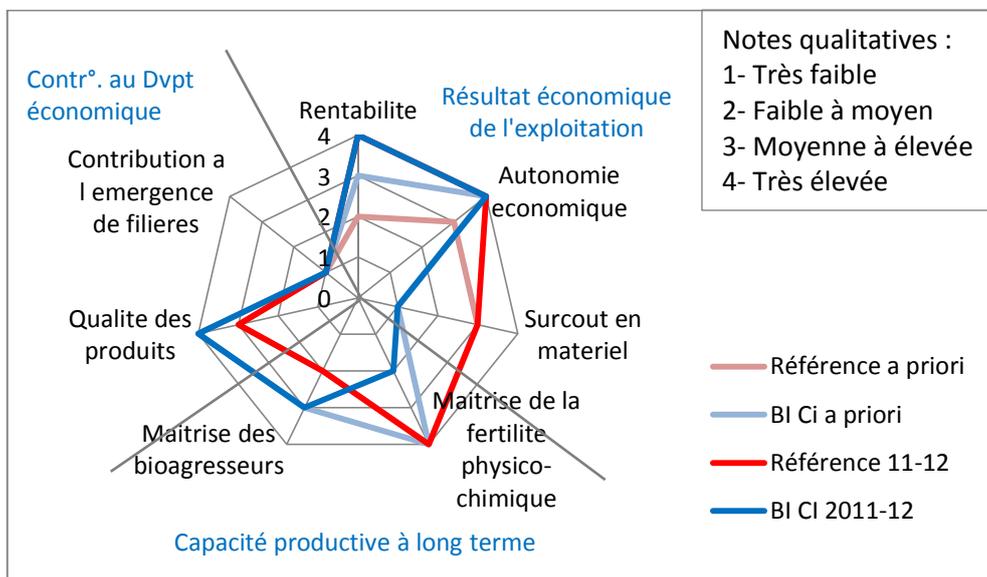


Figure 17 : Comparaison des critères économiques du système BI CI et de la référence, évolutions entre a priori et a posteriori

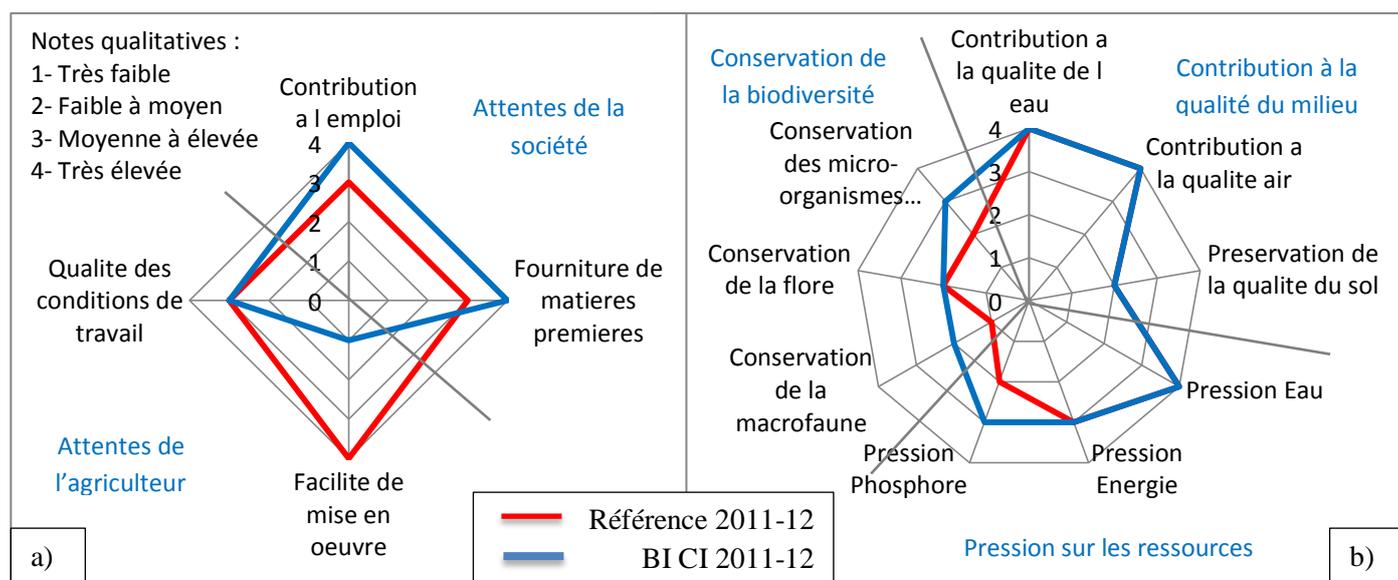


Figure 18 : Diagramme radar de la dimension sociale (a) et environnementale (b) : Comparaison de la référence avec le système BI CI

Tableau 9 : Quelques valeurs quantitatives obtenues pour les deux systèmes – Indicateurs environnementaux.

Critères basiques	Indicateurs	Référence 11-12		BI CI 2011-12	
		Valeur quantitative	Classes qualitatives	Valeur quantitative	Classes qualitatives
<b>MPEP</b>	I-Phy eaux profondes	8,6	Moy./Elevée	9,8	Très élevée
<b>MPNO3</b>	Quantité de NO3 lixiviée (kg N/ha)	1,5	Très élevée	0,5	Très élevée
<b>MNH3</b>	Quantité de NH3 volatilisée (kg N/ha)	3,0	Très élevée	4,2	Très élevée
<b>MN2O</b>	Quantité de N2O émise (kg N/ha)	1,6	Moy./Elevée	0,8	Moy./Elevée
<b>MPA</b>	I-Phy air	9,2	Très élevée	10,0	Très élevée
<b>MSO</b>	IMO	4,5	Faible/Moy.	5,1	Faible/Moy.
<b>PSPH</b>	Quantité de P inorganique épandue (kg)	49	Moy./Elevée	31	Faible
	Nombre d'herbicides à spectre large	1,04	Elevée	0,34	Faible/Moy.
	Nombre moyen d'insecticides utilisés	0,75	Moyen	0,6	Faible

Pour conclure, le système BI CI semble être légèrement plus durable que la référence. On notera cependant qu'il améliore les dimensions économique et environnementale aux dépens de la dimension sociale.

#### b) Evaluation a posteriori :

Tout comme pour le système de référence, le système innovant BI CI est plus performant que prévu *a priori*. Le diagramme synoptique complet de l'analyse a posteriori est présenté en **annexe VII**, les *figures 17 et 18* présentent les notes obtenues pour les critères du second niveau d'agrégation: bien que les notes des critères de rang inférieur soient améliorées par rapport à l'évaluation a priori (4/4 contre 3/4 pour le Résultat économique, 3/4 contre 4/4 pour la Capacité productive à long terme), la **dimension économique** n'est pas améliorée puisqu'elle était déjà au maximum (5/5) et se fait même rejoindre par la référence. On constate que la **dimension sociale** est bonne (4/5) *a posteriori*, bien que la satisfaction des attentes et de l'agriculteur reste faible (2/4), elle reste inférieure à celle de la référence. Enfin, la **dimension environnementale** est très bonne (5/5), améliorant ainsi la note par rapport à la référence, notamment grâce à une Contribution à la qualité du milieu très élevée et une pression sur les ressources très faible. Cette évolution est notamment due à la réduction de l'utilisation de pesticides, chiffrée dans le *tableau 9* (deux dernières lignes). L'ensemble des valeurs présentées dans le tableau permettent de constater des améliorations, mêmes légères pour quelques critères basiques de la dimension environnementale qui n'apparaissent pas dans le diagramme synoptique.

**En conclusion**, le système BI CI semble être, *a priori* et *a posteriori*, **plus performant que la référence**. En effet, le prototype présente une note de Contribution au développement durable équivalente voire supérieure à la référence. Ceci s'explique par ses très bonnes performances économiques, équivalentes à la référence mais présentant une amélioration des critères de long terme (Capacité productive à long terme et contribution au développement économique). On notera également les très bonnes performances environnementales en matière de Conservation de la qualité du milieu et de Pression sur les ressources qui conduisent à une dimension environnementale améliorée par rapport à la rotation blé dur/tournesol classique. Le système innovant permettrait donc d'améliorer les performances environnementales du système de référence et de conserver ses performances économiques (rentabilité) et sociales (bons rendements) tout en apportant quelques **améliorations (Maîtrise des adventices, Qualité sanitaire, Risques santé applicateur...)**. Les modifications apportées au système de référence (culture intermédiaires, diminution de l'utilisation des pesticides) ont donc des conséquences visibles et qui semblent bénéfiques. Cependant, elles apportent un degré de complexité supplémentaire qui pourrait être un obstacle à son adoption des prototypes par des agriculteurs.

Le système BI CI répond donc pleinement aux objectifs du projet MicMac Design, améliorer les performances environnementales tout en maintenant les performances économiques à un niveau élevé.

### **3) Synthèse des performances des systèmes du projet**

---

Dans les tableaux de synthèse suivants, les performances des systèmes seront résumées en fonction de leurs notes pour les trois dimensions de la Durabilité. Une analyse similaire à celle décrite dans le paragraphe précédent (non détaillée ici) a été mise en œuvre pour obtenir ces résultats. L'ensemble des diagrammes synoptiques des prototypes du projet sont présentés **en annexe VI à XIV**.

Tableau 10 : Synthèse des principales forces et faiblesses des prototypes d'après les résultats des évaluations a priori et a posteriori

		Contr° Dvpt Durable	Dim° économique	Dim° sociale	Dim° Env't	Forces	Faiblesses	Divergences A priori/A posteriori	Hypothèse 3
		/7	/5	/5	/5				
<b>Référence Blé dur Tournesol</b>	A priori	5	4	5	2	Résultat économique, Dimension sociale	Qualité du sol, Conservation biodiversité	Contribution à la qualité du milieu	
	A Post.	6	5	5	3				
<b>BI</b>	A priori	7	5	5	4	Dimension économique, dimension sociale, qualité du milieu	Complexité de mise en œuvre, surcoût en matériel	Conservation biodiversité	V
	A Post.	7	5	5	5				
<b>BI CI</b>	A priori	5	5	3	3	Dimension économique, qualité du milieu	Complexité de mise en œuvre, surcoût en matériel	Conservation biodiversité	V
	A Post.	7	5	4	5				
<b>TBI</b>	A priori	7	5	5	4	Dimension économique, dimension sociale, qualité du milieu	Conservation biodiversité	-	V
	A Post.	6	5	5	3				
<b>TBI CI</b>	A priori	4	3	3	3	Contribution au développement économique, Qualité du milieu	Résultat économique, satisfaction attentes agriculteurs, conservation de la biodiversité	-	F
	A Post.	3	3	3	2				
<b>TBI Asso</b>	A priori	4	4	3	3	Capacité de production à long terme, Pression sur les ressources	Satisfaction attentes agriculteurs Conservation biodiversité	Résultat économique	F
	A Post.	4	3	3	3				
<b>TBI Asso CI</b>	A priori	5	4	3	4	Qualité du milieu	Résultat économique, Satisfaction agriculteur, Conservation de la biodiversité	Pression sur les ressources, Capacités de production long terme	F
	A Post.	3	2	3	3				

**Rappel :**

**Hypothèse 3 :** le prototype répond aux objectifs économiques du projet tout en améliorant les performances environnementales de la référence

Légende : V= Vraie,

F= Fausse

Le **tableau 10** présente une synthèse des évaluations a priori et a posteriori réalisées pour tous les prototypes du dispositif d'Auzeville, la démarche d'analyse étant identique à celle mise en œuvre pour le système BI CI. Les évaluations *a priori* et *a posteriori* sont relativement concordantes et ont permis de dégager les principales **forces** (colonne 7) et **faiblesses** (colonne 8) des systèmes étudiés. Lorsque les notes d'un critère clé ne sont pas identiques a priori et a posteriori, celui-ci est indiqué dans la colonne « Divergences » (colonne 10).

On peut tout d'abord noter une première tendance : l'apparition d'une **rupture** (matérialisée par la ligne rouge) entre les **systèmes proches de la référence**, dont la Contribution au développement durable est équivalente voire supérieure à celle de la rotation classique, et les systèmes plus en rupture dont la contribution globale est plus faible.

Le seuil de rupture semble également correspondre à un seuil de performances économiques et sociales. En effet, les systèmes TBI CI, TBI Asso et Asso CI présentant un **degré de rupture avec la référence plus important**, obtiennent des notes **inférieures à la référence**, en particulier pour les **deux** premières dimensions de la durabilité. Ces systèmes se caractérisent par une dégradation du Résultat économique et de la Satisfaction des attentes de l'agriculteur. Des rendements inférieurs à ceux obtenus par la référence conduite de façon conventionnelle, la complexité de ces systèmes et une surcharge de travail expliquent en partie la dégradation de ces critères. Cette baisse des performances économiques et sociales peut être considérée comme un des **effets collatéraux** des nombreuses innovations apportées dans les systèmes les plus en rupture.

L'analyse des performances des systèmes comparées avec celles de la référence permet de détecter de tels **effets collatéraux** aux objectifs recherchés lors de la conception. Bien que certains soient liés à un type de système, plusieurs effets communs à tous les prototypes ressortent particulièrement. De façon générale, tous les systèmes innovants impliquent un **surcoût en matériel** par rapport à la référence (lié à l'achat d'une bineuse, d'une herse étrille ou à l'adaptation du semoir à la technique de l'herbi-semis, outils peu fréquents dans les exploitations agricoles). De plus, les prototypes présentent un degré de **complexité de mise en œuvre** et une **surcharge de travail** supérieure à la référence qui augmente avec le degré de rupture par rapport à celle-ci. En effet, certaines stratégies agronomiques testées dans le projet sont encore peu utilisées et/ou coûteuses en temps de travail, par exemple les cultures associées ou le désherbage mécanique. Leur mise en œuvre simultanée induit une nette dégradation de la satisfaction des attentes de l'agriculteur. Enfin, l'effet collatéral le plus marquant est une dégradation de la **conservation de la Biodiversité** pour les systèmes les plus en rupture, s'expliquant souvent par une utilisation ponctuelle de pesticides sur des protéagineux ou bien par la diminution de l'Abondance floristique. L'importance de ce critère sera cependant discutée plus tard.

### **Conclusion :**

La référence étant déjà très performante, seuls les aspects environnementaux pouvaient être significativement améliorés, en particulier la **conservation de la biodiversité**. Seuls les deux **systèmes BI** permettent de répondre au premier problème, ceci grâce à la réduction significative de l'utilisation de pesticides (réduction de 65% de l'IFT total, et de 63% de l'IFT « herbicide à large spectre » *a posteriori*). Les systèmes TBI et TBI Asso apportent quelques améliorations pour certains critères environnementaux, mais au vue de la dégradation des critères sociaux et économiques, cette réponse ne semble pas adaptée aux objectifs de projet MicMac Design.

**L'hypothèse 3** sur la satisfaction des objectifs du projet est donc validée seulement pour les systèmes BI et BI CI.

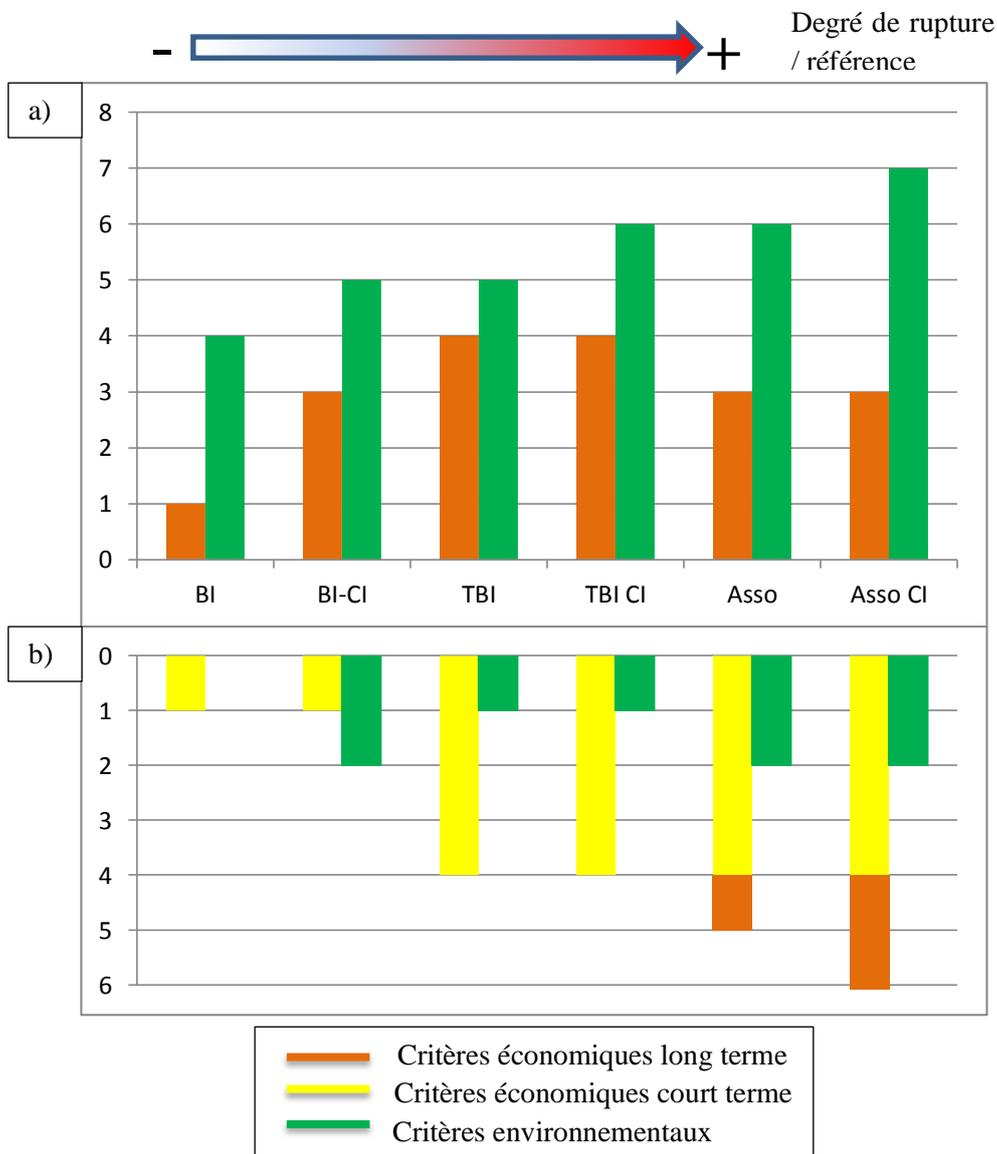


Figure 19 : Evolution du nombre de critères environnementaux et économiques améliorés (a) ou dégradés (b) en fonction de la complexité des prototypes.

Très élevée	4 / 4	Rentabilité		4 / 4	Résultats économiques de l'exploitation	2 / 5	Dimension économique	2 / 7	Contribution au développement durable
Très élevée	4 / 4	Indépendance économique							
Très élevée	4 / 4	Efficacité économique							
Faible	3 / 3	Surcoût en matériel							
Moyenne à élevée	3 / 4	Maîtrise du statut acido-basique du sol		3 / 4	Capacité productive à long terme	2 / 5	Dimension économique	2 / 7	
Très élevée	4 / 4	Maîtrise de l'état structural du sol							
Faible à moyenne	2 / 4	Maîtrise de la fertilité phosphotassique							
Faible à moyenne	2 / 4	Maîtrise des maladies et ravageurs		1 / 4	Contribution au développement économique	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Très faible	1 / 4	Maîtrise des adventices							
Faible	1 / 3	Qualité sanitaire		1 / 4	Satisfaction des attentes de la	3 / 4	Dimension sociale	2 / 7	
Élevée	3 / 3	Qualité technologique et esthétique des produits							
Nulle	1 / 3	Contribution à l'émergence de nouvelles filières							
Très élevée	4 / 4	Contribution à l'emploi		3 / 4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	5 / 5	Dimension sociale	2 / 7	
Faible à moyenne	2 / 4	Fourniture de matières premières							
Moyenne à élevée	2 / 4	Complexité des itinéraires techniques							
Faible	3 / 3	3 / 4	Facilité de mise en oeuvre	4 / 4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	4 / 4	Dimension sociale	2 / 7	
Faible	3 / 3								Temps de veille technico-économique
Faible	3 / 3	4 / 4	Qualité des conditions de travail	4 / 4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	4 / 4	Dimension sociale	2 / 7	
Faible	3 / 3								Surcharge de travail
Faible	3 / 3	4 / 4	Qualité des conditions de travail	4 / 4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur	4 / 4	Dimension sociale	2 / 7	
Faible	3 / 3								Risque pour la santé de l'opérateur
Moyenne à élevée	3 / 4	3 / 4	Contribution à la qualité de l'eau	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Eaux profondes
Très élevée	4 / 4	3 / 4	Contribution à la qualité de l'eau	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Faible à moyenne	2 / 4								Eaux superficielles
Faible à moyenne	2 / 4	2 / 4	Contribution à la qualité de l'air	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Maîtrise des pertes de NO <sub>x</sub>
Faible à moyenne	2 / 4	2 / 4	Contribution à la qualité de l'air	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Maîtrise des pertes de P
Faible à moyenne	2 / 4	2 / 4	Contribution à la qualité de l'air	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Maîtrise des émissions de NH <sub>3</sub>
Faible à moyenne	2 / 4	2 / 4	Contribution à la qualité de l'air	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Maîtrise des émissions de N <sub>2</sub> O
Faible à moyenne	2 / 4	2 / 4	Contribution à la qualité de l'air	2 / 4	Contribution à la qualité du milieu	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne à élevée	3 / 4								Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air
Très élevée	4 / 4	2 / 4	Préservation de la qualité du sol	2 / 4	Préservation de la qualité du sol	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Faible à moyenne	2 / 4								Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques
Moyenne à élevée	3 / 4	2 / 4	Préservation de la qualité du sol	2 / 4	Préservation de la qualité du sol	2 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Moyenne	2 / 3								Maîtrise de l'érosion
Moyenne	2 / 3	2 / 4	Pression Eau	1 / 4	Pression sur les ressources	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Élevée	1 / 3								Consommation d'eau d'irrigation en période
Élevée	1 / 3	2 / 4	Pression Énergie	1 / 4	Pression sur les ressources	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Élevée	1 / 3								Dépendance vis à vis de la ressource en eau
Très élevée	1 / 4	1 / 4	Conservation de la macrofaune	1 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Très faible	1 / 4								Consommation en énergie
Très faible	1 / 4	1 / 4	Conservation de la macrofaune	1 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Très élevée	4 / 4								Pression Phosphore
Très faible	1 / 4	1 / 4	Conservation de la macrofaune	1 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Très élevée	4 / 4								Conservation des insectes volants
Très faible	1 / 4	2 / 4	Conservation de la flore	1 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Très élevée	4 / 4								Abondance floristique
Très faible	1 / 4	2 / 4	Conservation de la flore	1 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	
Faible à moyenne	2 / 4								Diversité floristique
Faible à moyenne	2 / 4	Conservation des micro-organismes		2 / 4	Conservation de la biodiversité	1 / 4	Dimension économique	2 / 7	

Figure 20 : Diagramme synoptique de l'évaluation a priori de la référence MM Réf

En revanche, les premières constatations faites lors de l'analyse *a priori* et *a posteriori* de l'atteinte des objectifs se confirment avec les résultats expérimentaux, à savoir que, les systèmes en forte rupture avec la référence ont des performances économiques faibles et sans doute rédhibitoires vis-à-vis de leur potentiel d'adoption par les agriculteurs. L'hypothèse est donc rejetée pour ces systèmes (colonne 10 du [tableau 10](#)).

**L'hypothèse 4** se vérifie quel que soit le système étudié. En effet, même pour les systèmes les plus performants (BI et BI CI), les **améliorations** constatées ont des **effets collatéraux indésirables** qui peuvent conduire à des difficultés d'adoption (complexité des systèmes et surcharge de travail liée au désherbage mécanique) surtout que les résultats économiques sont très dégradés pour les systèmes très innovants.

Globalement, une amélioration de la dimension environnementale s'accompagne très souvent d'une dégradation des dimensions économique et sociale. Ceci n'est pas vérifié pour les systèmes BI mais il faut remarquer que ceux-ci restent assez proches du système de référence. Cependant, comme le montre la [figure 19](#), une amélioration des critères environnementaux s'accompagne d'une amélioration des critères économiques à long terme. On remarquera que cette tendance est associée au **degré de rupture** des prototypes avec le système de référence : plus la rupture est marquée, plus on améliore les critères environnementaux et les critères de performances économiques à long terme et plus on dégrade les critères de performances économiques à court terme et au final la contribution au développement durable est affectée

## **B. Evaluation des systèmes alternatifs à la monoculture de maïs irrigué**

---

### **1) Etude de la référence MM Réf**

---

#### a) Etude a priori :

La [figure 20](#) montre clairement les nombreuses faiblesses de la monoculture de maïs irrigué. En effet, la note globale de contribution à la durabilité globale est de 2/7 soit faible. Cette note repose sur des lacunes visibles aux niveaux d'agrégation inférieurs : la note de la **dimension économique** est faible (2/5). Malgré un Résultat économique très élevé (4/4), la Contribution au développement économique est très faible (1/4), notamment à cause de la très faible Qualité des produits (1/4). Ce critère exprime le risque de contamination des produits par des mycotoxines. D'après l'arbre satellite de MASC correspondant, un système en monoculture représente un risque maximal pour ce critère, même dans le cas d'un labour régulier. **La dimension sociale** de la référence MM Réf est très élevée, en effet, elle répond aux attentes de la société (3/4) comme à celles des agriculteurs (4/4). Les rendements de la référence assurent une Fourniture de matières premières satisfaisante (3/4) et bien que la monoculture de maïs irriguée présente des travaux avec des périodes de pointe, la surcharge de travail reste acceptable (2/3). **La dimension environnementale** demeure le point faible de la monoculture de maïs. Le critère de Conservation de la qualité du milieu est faible (2/4) alors que les critères de Pression sur les ressources et de Conservation de la biodiversité sont très faibles (1/4). **Tous les critères basiques sont améliorables.**

#### b) Etude a posteriori :

Le diagramme correspondant aux résultats *a posteriori*, visible en **annexe VI**, est strictement identique aux résultats *a priori*. En effet, l'itinéraire fréquentiel qui a été construit et a servi de support à l'évaluation a priori est extrêmement proche des pratiques observées. Les conclusions sont les mêmes qu'*a priori*.

**En conclusion**, la monoculture de maïs MM Réf est souvent considérée efficace économiquement mais a de nombreuses lacunes. Bien que ce système réponde aux attentes sociales, sa **dimension économique** est tout de même perfectible, en particulier les critères appartenant à la **Contribution au développement économique** (Qualité des produits). Le risque reflété par ce dernier critère est cependant surévalué par rapport à la réalité. Enfin, la dimension environnementale est largement améliorable pour tous les aspects, de la Qualité des eaux à la Pression sur la ressource en eau en passant par la Conservation de la biodiversité.

Tableau 11 : Synthèse des performances a posteriori des systèmes du dispositif de l'EI Purpan

		Contr° Dvpt Durable	Dim° économique	Dim° sociale	Dim° Evt	Forces	Faiblesses	Divergences A priori/A posteriori	Hypothèse 3
		/7	/5	/5	/5				
MM Réf	A priori	2	2	5	1	Dimension sociale	Contribution au développement économique	-	
	A Post.	2	2	5	1		Dimension environnementale		
MM2	A priori	2	3	2	2	Résultat économique, qualité du milieu	Contribution au développement économique, dimension sociale	Dimension sociale	V
	A Post.	3	3	3	2				
MM3	A priori	2	2	2	4	Qualité du milieu	Contribution au développement économique	Dimension économique, pression sur les ressources	V/F
	A Post.	1	1	2	3				
MM4	A priori	2	2	2	4	Qualité du milieu	Contribution au développement économique, dimension sociale	Dimension économique, pression sur les ressources	V/F
	A Post.	1	1	1	2				

**Rappel :**

**Hypothèse 3 :** le prototype répond aux objectifs économiques du projet tout en améliorant les performances environnementales de la référence

V= Vraie, F= Fausse

## 2) Synthèse des performances des systèmes du dispositif de l'EIP.

---

Le *tableau 11* présente les résultats des évaluations, en termes de performances de la référence et des monocultures de maïs innovantes. La même méthode que celle décrite dans le paragraphe précédent pour les systèmes d'Auzeville a été employée. Les résultats obtenus sont quelque peu surprenants :

On peut observer **deux types de résultats** : le système MM2, qui semblait quelconque *a priori*, se révèle plus performant que la référence *a posteriori* (Contribution au développement durable de 3/7 au lieu de 2/7). En revanche, les systèmes MM3 et MM4 qui semblaient prometteurs *a priori* (maintien de la dimension économique à 2/5 mais nette amélioration de la dimension environnementale de 2 à 4/5) se révèlent être bien moins performants que la référence après expérimentation, surtout en termes économiques.

Le prototype MM2 met en œuvre diverses techniques innovantes, notamment la localisation des traitements sur le rang et l'implantation d'une culture intermédiaire, en plus du choix d'une variété de maïs demi-précoce à la place d'une variété tardive. En revanche, un labour systématique est toujours pratiqué. Ce système **se différencie peu de la référence MM Réf.** On constate cependant que ce système permet d'améliorer, *a posteriori*, la **dimension économique** de la monoculture (3/5 au lieu de 2/5), ceci s'explique notamment par un très bon Résultat économique. De plus, la diminution des doses de pesticides utilisées permet d'améliorer plusieurs critères environnementaux et donc d'améliorer la **dimension environnementale** (2/5 contre 1/5). En revanche, ce système étant plus complexe à mettre en œuvre, ceci a pour conséquence de dégrader le critère de **Satisfaction des attentes de l'agriculteur**, donc la dimension sociale (2/5 *a priori*, 3/5 *a posteriori* contre 5/5 pour la référence). De ces observations, on peut conclure que le prototype **MM2 satisfait aux exigences du projet** et valide l'hypothèse 3. En effet, MM2 permet d'améliorer la dimension économique du système, en particulier le Résultat économique, tout en améliorant les performances environnementales de la monoculture de maïs irrigué.

Les faibles performances *a posteriori* des systèmes MM3 et MM4 (**Contribution au développement durable Très faible**) sont le résultat d'une forte dégradation des dimensions économique et sociale. Des rendements très inférieurs à la référence et une complexité de mise en œuvre manifeste ne permettent pas de répondre aux exigences de la société et de l'agriculteur, la dimension sociale est dégradée dans son ensemble (respectivement 2/5 et 1/5 pour MM3 et MM4 contre 5/5 pour la référence).

En revanche, on remarque que ces deux systèmes permettent d'améliorer la dimension environnementale (performances *a priori* nettement supérieures à l'*a posteriori*, 4/5 contre 2/5), notamment grâce à l'arrêt du labour qui contribue à la Conservation de la macrofaune du sol et des microorganismes et donc à la Conservation de la biodiversité. Ces deux systèmes ne satisfont pas aux conditions économiques de l'hypothèse 3 et donc à celles du projet.

**En conclusion**, le système MM2 répond aux exigences du projet et permet d'améliorer les performances environnementales de la monoculture de maïs tout en conservant des performances économiques élevées. Les deux prototypes les plus innovants présentent des performances économiques fortement dégradées par rapport à la référence et ne satisfont donc pas aux exigences du projet. On remarquera les importantes divergences des évaluations *a priori* et *a posteriori* de MM3 et MM4.

Après avoir caractérisé les performances des systèmes *a priori* et *a posteriori*, nous allons nous intéresser à la complémentarité des deux évaluations afin de répondre aux hypothèses 1 et 2. Il s'agit de vérifier si, oui ou non, une évaluation *a priori* donne une vision optimiste et « idéalisée » de la réalité et de déterminer si des améliorations auraient éventuellement pu être apportées aux prototypes suite à une première évaluation *a priori* et avant leur mise en œuvre au champ.

**Tableau 12: Comparaison partielle des résultats de l'évaluation a priori et a posteriori (2011-12) pour quelques systèmes du projet.**

	Contribution au Dvpt durable	Dimension éco.	Dimension soc.	Dimension env.
<b>BI</b>				
A priori	7	5	5	4
A posteriori	7	5	5	5
<b>BICI</b>				
A priori	5	5	3	3
A posteriori	7	5	4	4
<b>TBI</b>				
A priori	7	5	5	4
A posteriori	7	5	5	3
<b>TBI CI</b>				
A priori	4	3	3	3
A posteriori	3	3	3	2
<b>Asso</b>				
A priori	4	4	3	3
A posteriori	4	3	3	3
<b>MM2</b>				
A priori	2	3	2	2
A posteriori	3	3	3	2

**Tableau 13 : Comparaison des rendements estimés a priori et des rendements réalisés pour quelques systèmes**

Culture	Objectifs de rendement (q/ha)	Rendements moyens réalisés (q/ha)
<b>BI</b>		
Blé dur	55	55.7
Sorgho	75	84.7
Tournesol	30	31.9
<b>BI CI</b>		
Blé dur	55	58.9
Sorgho	75	82.4
Tournesol	30	36.5
<b>TBI Asso</b>		
Blé dur/pois	30/24	38/15.9
Tournesol/Soja	15/17	15.7/5.6
Triticale/Féverole	24/30	40.6/13.6
<b>TBI Asso CI</b>		
Blé dur/pois	30/24	38.6/13
Tournesol/Soja	15/17	15.3/5.6
Triticale/Féverole	24/30	41.8/13.5
<b>MM2</b>		
Maïs	105	115.4
<b>MM3</b>		
Maïs	95	82.9
<b>MM4</b>		
Maïs	90	62.8

### III. Complémentarité des évaluations a priori et a posteriori : des résultats contrastés selon le degré de rupture des prototypes

---

Tout au long de la deuxième partie de ce mémoire, j'ai abordé les méthodes d'évaluation *a priori* et *a posteriori* ainsi que leur place dans le processus de conception de système de culture innovants. Celles-ci permettent respectivement de prévoir les performances des prototypes puis d'aborder leurs performances réelles suite à une expérimentation. Après avoir caractérisé les performances des prototypes du projet dans la première partie des résultats, cette seconde partie doit permettre de répondre aux deux premières hypothèses, c'est-à-dire préciser la complémentarité entre les deux phases d'évaluation.

L'analyse des résultats des évaluations *a priori* et *a posteriori* a permis de dégager deux tendances : on constate que (i) les systèmes les plus proches des systèmes de référence atteignent les résultats fixés et obtiennent de bons résultats en matière de Contribution au développement durable, (ii) que les systèmes les plus en rupture n'atteignent que partiellement leurs objectifs alors que les résultats de l'évaluation de leur Contribution au développement durable sont relativement mauvais. Nous allons donc chercher à savoir si ces résultats étaient prévisibles et si tel est le cas, si des améliorations auraient pu être apportées aux prototypes avant leur mise en expérimentation. Le paragraphe suivant correspond à la mise en œuvre de l'étape 3 présentée dans la figure 5.

#### A. Evaluations cohérentes des systèmes performants

---

Le [tableau 12](#) permet de comparer les résultats obtenus a posteriori avec ceux de l'évaluation a priori. On constate que les résultats des évaluations a priori concordent avec l'a posteriori pour les prototypes BI, BI CI et MM2. Les systèmes MM2 et BI CI améliorent même leurs résultats par rapport à l'a priori. D'après le [tableau 13](#), on constate que les rendements réalisés sont supérieurs aux objectifs de rendements déterminés *a priori*. Or le rendement réalisé impacte plusieurs critères d'évaluation, la Rentabilité (dimension économique), le critère de Fourniture de matières premières (dimension sociale) mais également la Maîtrise du statut organique du sol (dimension environnementale). Ceci ajouté à une diminution significative des doses de pesticides par rapport aux prévisions explique que les résultats de l'évaluation *a posteriori* soient supérieurs aux prévisions qui n'étaient pas particulièrement optimistes.

Les évaluations *a priori* et *a posteriori* étant concordantes pour ces systèmes, une évaluation a priori aurait pu suffire pour estimer la réponse de ces systèmes aux objectifs du projet ainsi que leurs performances en matière de Contribution au développement durable. Toutefois, l'expérimentation a permis de vérifier in situ, sur le moyen terme à l'échelle d'une rotation, que les techniques disponibles alternatives à l'usage des pesticides étaient efficaces pour obtenir une bonne maîtrise de bioagresseurs malgré un IFT divisé par plus de 2. Cette démonstration est importante dans le contexte du plan Ecophyto 2018.

#### B. Une baisse de performances prévisible pour des systèmes en rupture

---

Les systèmes TBI, TBI CI et TBI Asso présentent, *a priori* et *a posteriori*, des résultats inférieurs à ceux de la référence. Le [tableau 12](#) permet de montrer ces résultats. Le système en association voit sa dimension économique améliorée (baisse de la rentabilité mais amélioration de l'autonomie économique malgré des rendements relativement éloignés des prévisions ([tableau 13](#))). On peut tirer les mêmes conclusions des analyses *a priori* et *a posteriori*, c'est-à-dire que les prototypes les plus en rupture avec la référence n'atteignent pas les objectifs fixés.

Les résultats *a priori* sont confirmés par ceux obtenus *a posteriori*, les références disponibles et l'expertise des concepteurs ont donc permis d'évaluer correctement les prototypes malgré leur degré de rupture important. Certains effets collatéraux auraient donc pu éventuellement être corrigés durant la phase de conception des prototypes avant la mise en expérimentation système. Toutefois ici l'expérimentation a permis de quantifier certains effets et surtout de mettre en évidence des difficultés de maîtrise technique non décelables a priori.

**Tableau 14 : Comparaison des résultats des évaluations *a priori* et *a posteriori* pour les prototypes TBI Asso CI, MM3 et MM4**

	Contribution au Dvpt durable	Dimension éco.	Dimension soc.	Dimension env.	Points de divergence
<b>TBI Asso CI</b>					
A priori	<b>5</b>	4	3	4	2 critères basiques améliorés, 5 dégradés
A posteriori	<b>3</b>	2	3	3	
<b>MM3</b>					
A priori	<b>2</b>	2	2	4	10 critères basiques améliorés, 6 dégradés
A posteriori	<b>1</b>	1	2	3	
<b>MM4</b>					
A priori	<b>2</b>	2	2	4	1 critère basique amélioré, 13 dégradés
A posteriori	<b>1</b>	1	1	2	

**a)**

Moyenne à élevée	3 /4	Rentabilité								
Faible à moyenne	2 /4	Indépendance économique		2 /4	Autonomie économique		3 /4	Résultats économiques de l'exploitation		
Faible à moyenne	2 /4	Efficience économique								
Moyen	2 /3	Surcoût en matériel								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise du statut acido-basique du sol								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise de l'état structural du sol		4 /4	Maîtrise de la fertilité physico-chimique		2 /4	Capacité productive à long terme	2 /5	Dimension économique
Très élevée	4 /4	Maîtrise de la fertilité phosphopotassique								
Très faible	1 /4	Maîtrise des maladies et ravageurs		1 /4	Maîtrise des bioagresseurs					
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des adventives								
Faible	1 /3	Qualité sanitaire		1 /4	Qualité des produits		1 /4	Contribution au développement économique		
Elevée	3 /3	Qualité technologique et esthétique des produits								
Null	1 /3	Contribution à l'émergence de nouvelles filières								
Très élevée	4 /4	Contribution à l'emploi					2 /4	Satisfaction des attentes de la société		
Très faible	1 /4	Fourniture de matières premières								
Très élevée	1 /4	Complexité des itinéraires techniques		1 /4	Facilité de mise en oeuvre				2 /5	Dimension sociale
Faible	3 /3	Temps de veille technico-économique					2 /4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur		
Faible	3 /3	Surcharge de travail								
Faible	3 /3	Risque pour la santé de l'applicateur		4 /4	Qualité des conditions de travail					
Faible	3 /3	Difficulté physique								
Très élevée	4 /4	Eaux profondes	4 /4	Maîtrise des pertes pesticides						
Très élevée	4 /4	Eaux superficielles					4 /4	Contribution à la qualité de l'eau		
Très élevée	4 /4	Maîtrise des pertes de NO <sub>3</sub>								
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des pertes de P								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de NH <sub>3</sub>					4 /4	Contribution à la qualité de l'air	4 /4	Contribution à la qualité du milieu
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de N <sub>2</sub> O		3 /4						
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air								
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques					4 /4	Préservation de la qualité du sol		
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise du statut organique								
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'érosion								
Moyenne	2 /3	Consommation d'eau d'irrigation en période critique		2 /4	Pression Eau			Pression sur les ressources	4 /5	Dimension environnementale
Elevée	1 /3	Dépendance vis à vis de la ressource en eau								
Moyenne	2 /3	Consommation en énergie		3 /4	Pression Énergie		2 /4			
Elevée	3 /3	Efficience énergétique								
Très élevée	1 /4	Pression Phosphore								
Faible à moyenne	2 /4	Conservation des insectes volants		3 /4	Conservation de la macrofaune			Conservation de la biodiversité		
Moyenne à élevée	3 /4	Conservation de la macrofaune du sol								
Moyenne à élevée	3 /4	Abondance floristique		2 /4	Conservation de la flore		3 /4			
Très faible	1 /4	Diversité floristique								
Moyenne à élevée	3 /4	Conservation des micro-organismes								

**b)**

Très faible	1 /4	Rentabilité								
Très faible	1 /4	Indépendance économique		1 /4	Autonomie économique		1 /4	Résultats économiques de l'exploitation		
Très faible	1 /4	Efficience économique								
Moyen	2 /3	Surcoût en matériel								
Très faible	1 /4	Maîtrise du statut acido-basique du sol								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise de l'état structural du sol		2 /4	Maîtrise de la fertilité physico-chimique		1 /4	Capacité productive à long terme	1 /5	Dimension économique
Très élevée	4 /4	Maîtrise de la fertilité phosphopotassique								
Très faible	1 /4	Maîtrise des maladies et ravageurs		1 /4	Maîtrise des bioagresseurs					
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise des adventives								
Faible	1 /3	Qualité sanitaire		1 /4	Qualité des produits		1 /4	Contribution au développement économique		
Elevée	3 /3	Qualité technologique et esthétique des produits								
Null	1 /3	Contribution à l'émergence de nouvelles filières								
Très élevée	4 /4	Contribution à l'emploi					2 /4	Satisfaction des attentes de la société		
Très faible	1 /4	Fourniture de matières premières								
Très élevée	1 /4	Complexité des itinéraires techniques		1 /4	Facilité de mise en oeuvre				1 /5	Dimension sociale
Faible	3 /3	Temps de veille technico-économique					2 /4	Satisfaction des attentes de l'agriculteur		
Elevée	1 /3	Surcharge de travail								
Moyen	2 /3	Risque pour la santé de l'applicateur		2 /4	Qualité des conditions de travail					
Faible	3 /3	Difficulté physique								
Moyenne à élevée	3 /4	Eaux profondes	4 /4	Maîtrise des pertes pesticides						
Très élevée	4 /4	Eaux superficielles					3 /4	Contribution à la qualité de l'eau		
Très élevée	4 /4	Maîtrise des pertes de NO <sub>3</sub>								
Très faible	1 /4	Maîtrise des pertes de P								
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de NH <sub>3</sub>					4 /4	Contribution à la qualité de l'air	4 /4	Contribution à la qualité du milieu
Moyenne à élevée	3 /4	Maîtrise des émissions de N <sub>2</sub> O		3 /4						
Très élevée	4 /4	Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air								
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques					3 /4	Préservation de la qualité du sol		
Faible à moyenne	2 /4	Maîtrise du statut organique								
Très élevée	4 /4	Maîtrise de l'érosion								
Elevée	1 /3	Consommation d'eau d'irrigation en période critique		1 /4	Pression Eau			Pression sur les ressources	2 /5	Dimension environnementale
Elevée	1 /3	Dépendance vis à vis de la ressource en eau								
Elevée	1 /3	Consommation en énergie		1 /4	Pression Énergie		1 /4			
Faible	1 /3	Efficience énergétique								
Très élevée	1 /4	Pression Phosphore								
Faible à moyenne	2 /4	Conservation des insectes volants		3 /4	Conservation de la macrofaune			Conservation de la biodiversité		
Moyenne à élevée	3 /4	Conservation de la macrofaune du sol								
Moyenne à élevée	3 /4	Abondance floristique		2 /4	Conservation de la flore		2 /4			
Très faible	1 /4	Diversité floristique								
Faible à moyenne	2 /4	Conservation des micro-organismes								

**Figure 21 : Diagramme synoptique *a priori* (a) et *a posteriori* (b) pour le système MM4**

### C. Des aléas techniques imprévisibles *a priori*

---

Les systèmes MM3 et MM4 ainsi que le système TBI Asso CI obtiennent des résultats nettement inférieurs à ceux des références et n'atteignent pas leurs objectifs *a posteriori*. Bien que ces systèmes n'atteignent pas *a priori* leur objectifs (voir Partie III, I, A et B) et que les résultats des évaluations *a priori* soient nettement inférieurs à ceux des références, les résultats *a posteriori* sont encore plus dégradés par rapport à *l'a priori*. On doit donc se demander d'où proviennent ces écarts importants entre les prévisions et la réalité.

En détaillant et en comparant les diagrammes synoptiques *a priori* et *a posteriori* comme sur la *figure 21* pour le système MM4, on remarque que les critères dégradés entre les deux évaluations concernent surtout :

- le résultat économique et/ou la fourniture de matière première
- la pression sur les ressources et en particulier la pression énergie.

Le *tableau 14* nous permet d'expliquer le premier point. En effet, les rendements obtenus pour les systèmes MM3 et MM4 sont nettement inférieurs aux rendements de référence d'une part et aux objectifs de rendement d'autre part. Il faut savoir que l'équipe technique de l'unité expérimentale de l'EIP a rencontré de nombreuses difficultés pour mettre en œuvre ces deux prototypes, davantage d'interventions culturales ont été réalisées, entraînant une augmentation des charges et une surconsommation d'énergie. Ceci permet d'expliquer l'écart entre l'évaluation *a priori* et *a posteriori* pour les monocultures de maïs.

Le système TBI en association avec cultures intermédiaires présente également des résultats inférieurs aux prévisions (*tableau 14*) et notamment pour la dimension économique. Les rendements assez faibles pour l'association tournesol/soja participent à une baisse de la rentabilité du système mais des coûts ont également été engagés pour les cultures intermédiaires. En effet, des interventions supplémentaires (et non prévues) ont été nécessaires pour gérer leur destruction, entraînant des frais supplémentaires et donc une dégradation des critères économiques calculés à partir des produits et des charges (ceci impactant négativement les critères Rentabilité, Autonomie et Efficience économique).

## CONCLUSION

Globalement, les deux méthodes employées pour évaluer les performances des prototypes de systèmes de culture sont cohérentes et traduisent les effets des techniques innovantes employées. Les références disponibles et l'expertise des concepteurs ont permis de mener à bien ces évaluations pour la plupart des systèmes. **Certains points clés auraient donc pu être améliorés avant le début de l'expérimentation système si l'évaluation *a priori* avait été mise en œuvre dès 2010.** Cependant, certaines techniques n'ont pas été totalement maîtrisées lors de l'expérimentation et influencent les résultats obtenus. **Ces aléas n'étaient pas prévisibles *a priori* et n'ont pu être révélés que grâce à la mise en œuvre de l'expérimentation système.** Ces prototypes en rupture avec les systèmes de référence mobilisent tous des techniques innovantes et complexes. Leur mise en œuvre ne s'étant pas toujours déroulée comme escompté, les résultats *a posteriori* s'en ressentent. Ces « incidents de parcours » n'étaient pas prévisibles *a priori*. Ils illustrent l'importance de la maîtrise technique et le risque pris par les agriculteurs en changeant pour des systèmes en rupture où une phase d'appropriation et d'apprentissage technique est nécessaire. Il faut dire que la monoculture de maïs conventionnelle a profité de plus de 50 ans d'amélioration continue de son itinéraire technique...



Partie IV:

---

Discussion



## **I. Sur la méthode et les résultats de l'évaluation**

---

### **A. Des prototypes performants mais encore perfectibles**

---

#### **1) Des performances environnementales manifestes**

---

Les résultats des évaluations montrent que les stratégies agronomiques mises en place pour répondre aux objectifs environnementaux du projet ANR MicMac Design ont un impact positif avéré sur les critères environnementaux. En effet, tous les systèmes innovants présentent un impact environnemental réduit par rapport à la référence (sauf exceptions et incidents techniques) qui se traduit par une amélioration significative des critères environnementaux du modèle MASC. En ce sens, on peut dire que la conception a bien atteint les objectifs premiers de ces systèmes de culture innovants.

Les résultats les plus visibles sont liés à la réduction de doses de pesticides utilisées (visible pour les systèmes BI, Partie III, I, B, 2). La technique du strip till est intéressante du point de vue de la conservation des organismes vivants du sol mais sa mise en œuvre semble complexe et mal adaptée aux sols argileux de la région sur le plan technique (effets sur les transferts de pesticides, cf Partie III, I, B).

#### **2) Des effets collatéraux à prendre en compte**

---

Les résultats des évaluations a priori et a posteriori des prototypes de SdC ont permis de révéler divers effets collatéraux non envisagés initialement, alors que les conséquences en matière de complexité des systèmes étaient attendues, de même qu'une dégradation des performances économiques. En revanche, la grande majorité des systèmes sont très peu performants du point de vue de la conservation de la biodiversité. Ce résultat encourage à réaliser des mesures pour quantifier ce critère qui semble parfois discutable.

### **B. L'évaluation a priori tient une place prépondérante dans la démarche de conception**

---

#### **1) Des références fiables pour la majorité des systèmes**

---

On a pu constater que les résultats des évaluations *a priori* et *a posteriori* sont cohérents pour tous les prototypes exceptés pour MM3 et MM4. Cela signifie que (i) la méthode des itinéraires techniques « fréquents » permet d'estimer correctement *a priori* les performances des systèmes étudiés, (ii) les références disponibles (rendements, niveau de fertilisation) ainsi que l'expertise des concepteurs sont suffisamment précises pour évaluer correctement les performances de prototypes de systèmes de culture a priori, sans qu'une mise en expérimentation systématique soit absolument nécessaire.

En revanche, les systèmes utilisant des techniques innovantes relativement « anecdotiques » mais prometteuses d'un point de vue de leur usage en France (par exemple la technique de semis par strip-till) obtiennent des résultats nettement inférieurs aux prévisions. Il faut se demander quelle part de cet écart est directement imputable au prototype de système de culture, idéalisé par les concepteurs mais finalement trop complexe à mettre en œuvre en pratique et quelle part peut être attribuée à un manque de maîtrise technique temporaire. En effet, la durée de la période d'apprentissage nécessaire pour maîtriser cette technique très innovante a incontestablement été sous-estimée. Dans tous les cas, le manque de maîtrise technique ne permet pas de conclure définitivement sur les performances des systèmes MM3 et MM4.

#### **2) Rôle de l'évaluation a priori dans la précision des stratégies agronomiques**

---

Les résultats des évaluations *a priori* et *a posteriori* ainsi que leur confrontation montrent que les systèmes les plus innovants ne permettent pas d'atteindre des performances équivalentes à la référence, même avec une analyse multicritère permettant potentiellement de valoriser, d'autres critères que le seul résultat économique. Or, les résultats obtenus par une évaluation *a priori* montrent qu'une dégradation de cet ordre pouvait être prévue et donc éventuellement corrigée avant la mise en place de l'essai système. Une réflexion autour d'une évaluation a priori aurait permis d'imaginer des solutions ou de travailler davantage à la formalisation du paramétrage des règles de décision. Outre les résultats qu'elle peut apporter, la démarche



d'évaluation *a priori* est un support de réflexion permettant de pointer certains détails qui prennent toute leur importance dans les résultats *a posteriori*. Par exemple, le choix de l'introduction de la féverole dans la rotation TBI peut être discuté : les traitements contre les insectes et maladies plus fréquents et la rentabilité plus faible (450€/ha de MSN contre 1000€/ha pour le tournesol ou le blé dur) impactent fortement les performances du système. Le choix de cette culture ne semble pas très adapté aux objectifs définis pour le projet; il se justifie uniquement si des effets non appréhendables *a priori*, car mal connus, tels que des effets cumulatifs sont envisagés.

### **3) Un choix des données et un manque de recul qui peuvent être problématiques**

---

L'expérimentation « système » étant lourde et coûteuse à mettre en place, on serait tenté de vouloir tester des systèmes en un an sur un jeu de parcelles respectant les effets précédents avec des couples « précédant-suivant » mimant la rotation. Cependant, il semble indispensable de tester un prototype dans de multiples situations, climatiques en particulier (Debaeke et al., 2009). Le *tableau 15* présente les fortes différences entre l'évaluation des pratiques de 2011 (année de mise en place de l'essai) et 2012 mais également entre les deux parcelles. D'après Vereijken, 4 à 6 ans sont nécessaires pour cerner à minima les performances de systèmes innovants. Les rotations seront reconduites pour trois ans supplémentaires, le cumul des données et de l'expérience acquise au cours des trois dernières années devraient conforter l'évaluation *a posteriori* de ces systèmes innovants faite ici au bout d'une première rotation.

La question du choix des systèmes références pour l'évaluation peut également se poser (Deytieux et al., 2012). Des références régionales ont été construites en parallèle de nos références locales, d'après le *tableau 16* on constate que les objectifs définis à partir de ces références sont plus facilement atteints par les prototypes que lorsqu'ils sont définis par rapport à la référence locale.

## **II. Sur le modèle MASC 2.0**

---

### **A. Les limites du modèle**

---

Certaines limites du modèle ont déjà été pointées par les concepteurs du modèle MASC 2.0 (Craheix et al., 2012), notamment (i) la flexibilité du modèle qui limite les comparaisons possibles entre les différents projets d'évaluation de systèmes, et (ii) le caractère laborieux du calcul des indicateurs (utilisation du logiciel CRITER 2.0 présentant encore de nombreux dysfonctionnements). Certains indicateurs sont même impossibles à obtenir sans utiliser un logiciel (exemple : les indicateurs I-Phy utilisant la logique floue), on a donc un effet « boîte noire » indéniable, ceci rendant difficile l'interprétation de certains résultats. Suite à notre travail, il semblerait que l'utilisation du modèle MASC 2.0 révèle une nouvelle limite : l'utilisation de seuils pour discrétiser les variables quantitatives et les traduire en valeurs qualitatives induits des différences d'évaluation entre des systèmes proches mais appartenant à deux classes distinctes. Un exemple de cet effet seuil est présenté en *figure 22*.

### **B. Un outil de synthèse mettant en valeurs certains effets antagonistes**

---

Le modèle permet de mettre en évidence certains effets antagonistes. Par exemple, l'arrêt du labour aura pour conséquences une amélioration de la biodiversité du sol d'une part, mais également une augmentation de la pression des bioagresseurs d'autre part. On peut donc constater, que par construction dans le modèle MASC, il est difficile, voire impossible, de concilier la maîtrise des bioagresseurs optimale avec une amélioration de la biodiversité. Ce point nécessite incontestablement une réflexion conceptuelle car des travaux ont montré que cet antagonisme n'était pas systématique *in situ*.

### **C. Un impact fort du choix de la pondération**

---

#### **1) Exemple d'un indicateur particulièrement discutable : l'abondance floristique**

---

Tout d'abord, ce critère appartenant au critère de conservation de la biodiversité est contestable en lui-même : il se trouve être l'exact opposé du critère de maîtrise des adventices. Ceci signifie qu'il est donc impossible de maîtriser les adventices ET de favoriser la biodiversité. Or des modes de gestion des espaces

**Tableau 17 : Extrait de l'analyse de la dimension économique de la durabilité en fonction du scénario de prix**

Dimension économique	Marché défavorable	Marché 2008	Marché moyen	Marché 2010	Marché très favorable
<b>Référence MP</b>	2	2	3	4	4
<b>Référence locale</b>	2	3	4	5	5
<b>BI</b>	3	4	5	5	5
<b>BI CI</b>	4	4	5	5	5
<b>TBI</b>	3	5	5	5	5

extra parcellaires permettent de favoriser l'abondance floristique tout en maîtrisant la flore adventice sur la parcelle cultivée. De même, l'utilisation de cultures intermédiaires en mélanges d'espèces pourrait sans doute contribuer efficacement à ce critère (Sarthou et al., 2012, in Justes et al., 2012 ; étude-expertise INRA sur les Cultures Intermédiaires).

En étudiant les poids des différents critères, on s'aperçoit ensuite que celui-ci explique à lui seul 8% de la dimension environnementale, composée de 20 critères basiques. L'abondance floristique, *a priori* sans importance particulière, pèse sur l'évaluation de cette dimension simplement par construction du modèle.

## **2) Effet de la pondération : étude de la dimension économique**

---

L'utilisation de différents scénarios économiques devait avant tout servir à étudier les variations dans les performances des prototypes en fonction des conditions de prix. Or, ceci a constitué une analyse de sensibilité de la dimension économique du modèle. D'après le *tableau 17*, on serait tenté de croire que les systèmes innovants sont plus résilients, en termes économiques, que la référence. Or, les systèmes innovants sont mieux évalués que la référence grâce à la prise en compte de critères de long terme (contribution au développement économique et capacité de production à long terme) mieux notés que de la référence. Les poids des trois critères dans l'explication de la dimension économique sont identiques (33%), les deux derniers critères tamponnent donc les variations du résultat économique. Dans le cadre de cette étude, le choix a été fait d'utiliser les pondérations par défaut du modèle MASC, notre objectif étant de déterminer les effets collatéraux des différents stratégies agronomiques et non pas de déterminer un classement par rapport à des enjeux particuliers. Ces observations ne permettraient pas de conclure sur les différentes performances des systèmes.

## **III. Perspectives**

---

Tout au long des évaluations, seuls des indicateurs calculés à partir des données économiques ou bien estimés à partir des pratiques culturales ont été utilisés. Or, le modèle MASC peut tout à fait être adapté et des indicateurs remplacés par des données réelles ou d'autres indicateurs. Par exemple, de nombreuses données et mesures collectées au cours de l'expérimentation du projet ANR MicMac-Design pourraient être mobilisées dans une évaluation avec le modèle MASC. Par exemple, les suivis réalisés par rapport aux maladies, ravageurs et adventices pourraient être valorisés grâce à la mise au point d'arbres satellites. Ce travail pourrait être fait prochainement par l'équipe de Toulouse. De même, les données recueillies sur les émissions de GES pourraient directement remplacer les indicateurs INDIGO afin d'avoir une quantification exacte des émissions de protoxyde d'azote. Cependant les calculs de flux de gaz sont encore en cours (nécessité de corrections instrumentales dues à des calibrations capteur par capteur) et le dispositif ne comporte pas de mesure témoin, les résultats obtenus ne sont donc actuellement pas directement valorisables. Sans pour autant instrumenter tout le dispositif de Toulouse-Auzeville, des mesures sur la rotation de référence seraient nécessaires pour valoriser les mesures dans le cadre d'une évaluation MASC.

La question du nombre d'années nécessaires pour observer un effet significatif d'effets cumulatifs ou détecter des évolutions suite à l'expérimentation se pose pour chaque type de mesure. En effet, différentes trajectoires pourraient être observées (évolution régulière d'un indicateur, stabilisation due à la maîtrise des techniques innovantes, fluctuations liées au climat). Ainsi, l'évolution de l'IFT Herbicides pourrait être un bon indicateur de la maîtrise des adventices : une augmentation régulière serait synonyme d'une infestation progressive des parcelles par les adventices qui pourrait s'expliquer par une efficacité limitée du désherbage mécanique par rapport à des interventions chimiques. Un tel effet ne peut être observé sur une unique rotation de trois ans, sauf en cas de gros problème dès la première année de la rotation. Les données obtenues grâce aux plaques lysimétriques pourraient également remplacer les indicateurs I-Phy et I-NO<sub>3</sub>, à condition que les données puissent être exploitées (certaines matières actives détectées dans les échantillons n'ont pas été utilisées au cours du projet alors que les matières actives les plus récentes n'apparaissent pas encore). De plus, les 3 années ont été marquées par un faible niveau de drainage (sauf durant le printemps dernier, mais les dosages sont encore en cours). Une période de mesure plus longue s'avère donc nécessaire pour acquérir un recul suffisant et des références fiables permettant d'ajuster les indicateurs existants.



## Conclusion

---

Un des objectifs du projet ANR MicMac-Design est de concevoir et d'évaluer des prototypes de systèmes de culture répondant à des enjeux globaux, notamment ceux du développement durable, mais également à des enjeux régionaux. Dans cette optique une démarche de conception a été développée et différents prototypes ont vu le jour. Ces systèmes innovants mobilisent diverses stratégies agronomiques dont l'efficacité a été testée précédemment en essais de type factoriel. Il s'agit maintenant de valider les performances d'un ensemble de stratégies (rotations et ITK) et leur impact sur l'environnement au sein de l'essai système.

Plusieurs phases d'évaluation ont été menées dans le cadre de ce mémoire, tant du point de vue des objectifs spécifiques à chaque prototype définis par les chercheurs lors de leur conception, que du point de vue de la contribution des prototypes de systèmes de culture au développement durable. Les résultats de ces évaluations permettent de caractériser les prototypes et traduisent des niveaux de performance divers variant en fonction de leur degré de rupture avec les systèmes « référence » (la rotation Blé dur/Tournesol et la monoculture de maïs). On peut également juger de l'effet des stratégies agronomiques sur les résultats : par exemple, la réduction des doses de pesticides et l'introduction de cultures intermédiaires permettent d'améliorer sensiblement les performances environnementales d'un système de culture. Cependant, la plupart des systèmes innovants et notamment ceux que l'on peut qualifier de « très en rupture » (association de cultures, usage du strip-till, ...), présentent des performances économiques réduites par rapport à la référence, ceci pourrait être rédhibitoire par rapport à leur adoption par des agriculteurs.

La diversité des stratégies agronomiques employées dans ces différents systèmes permettrait de répondre à différents enjeux régionaux ponctuels. Par exemple, les systèmes TBI seraient intéressants pour des exploitations biologiques, alors que les systèmes BI pourraient être proposés à des agriculteurs en agriculture « conventionnelle » souhaitant améliorer les performances environnementales de leur exploitation et réduire leur propre exposition aux pesticides tout en maintenant leur revenu.

La caractérisation des systèmes permet également de mettre en œuvre une démarche d'évaluation afin de dégager l'intérêt de chacune de ces méthodes mais également d'aborder leur complémentarité. Ainsi, l'évaluation *a priori* constitue (i) un moyen d'estimer le niveau de performances potentiel des prototypes à condition qu'un minimum de références –même seulement expertes- soient disponibles, avant la mise en expérimentation (ii) un support de réflexion pour les concepteurs leur permettant d'aborder avec précision la construction des prototypes.

L'expérimentation « système » associée à une démarche d'évaluation *a posteriori* permet évidemment de définir les performances des systèmes de façon opérationnelle et ainsi de confirmer ou infirmer les prévisions réalisées *a priori*. Toutefois, un tel dispositif « système » permet aussi de révéler certaines difficultés techniques associées aux prototypes ainsi que des conséquences liées aux techniques innovantes et que les concepteurs ne pouvaient pas prévoir (exemple : difficultés et conséquences environnementales liées à l'utilisation d'un strip-tiller).

Ainsi, la confrontation des résultats obtenus par ces deux méthodes a permis de montrer leur complémentarité et la cohérence des méthodes employées. Cette confrontation sera enrichie lorsque tous les résultats expérimentaux seront disponibles au bout de la troisième culture de la rotation triennale.

L'évaluation multicritère occupe donc une place prépondérante dans le processus de conception de systèmes de culture innovants. Ceci peut être une nouvelle façon de valoriser des mesures réalisées sur les essais « système ». Cependant, plusieurs limites sont associées à sa mise en œuvre, notamment l'obtention des données, laborieuse et complexe. Des outils génériques doivent être développés afin d'apporter des solutions d'évaluation rapides et permettre de faciliter le calcul des nombreux indicateurs nécessaires au diagnostic multicritère.



# Bibliographie

---

Alletto L., Giuliano S., Perdrieux F., Rametti G., Benoit P., Véricel G., Justes E. (2013) Comparison of the environmental performances of four maize monocropping systems : a three years monitoring of pesticides leaching. In Pesticide behaviour in soils, water and air, York, 2-4 septembre 2013 (à venir)

Baudet M. (2012). Application du MASC 2.0 à un dispositif expérimental : éléments d'analyse du modèle et ouverture sur l'évaluation des services écosystémiques à l'échelle du système de culture. Mémoire de stage de Master Sciences et Technologies du Vivant et de l'Environnement, spécialité « De l'Agronomie à l'Agroécologie », AgroParis Tech, Grignon, 50p.

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

Bockstaller C., Girardin P. (2008). Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. UMR Nancy-Université -INRA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar, Colmar, 119p.

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, pp223-235.

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

Bockstaller C, Guichard L, Makowski D., Aveline A. Girardin P., Plantureux S. (2008) Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for sustainable development*, 28, pp139-149.

Briquel V., Vilain L., Bourdais J-L., Girardin P., Mouchet C., Viaux P., (2001), La méthode IDEA (indicateurs de durabilité des exploitations agricoles) : une démarche pédagogique. *Ingénierie*, n°25, pp 29-39.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., (2009) Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. Editions Quae, Versailles (France) 304pp.

Colomb B., Carof M., Aveline A., Bergez J.-E. (2013) Stockless organic farming : strength and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model. *Agronomy for sustainable development*, 33, pp593-608.

Craheix D., Angevin F., Bergez E.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T. (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritères pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques*, 20, pp35-48.

Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Sadok W., Doré T (2011). MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0. INRA – AgroParisTech – GIS GC HP2E, 133 p.

CRITER, Manuel d'utilisateur



Debaeke P., Petit M-S., Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J-M, Reau R., Verjux N., (2008). Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes ? In Reau R., Doré T., (EDS) 2008. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri, Dijon, France.

Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovation agronomiques*, 20, pp49-78.

Dingli A. (2012). Evaluation multicritère ex-ante de systèmes de culture économes en intrants sur un réseau d'exploitations agricoles de Midi-Pyrénées. Mémoire de fin d'études, cursus ingénieur, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, 109p.

Guichard L. Savini I. (2009). ECOPHYTO R&D : Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires, Volet 1, Tome II : Analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures, p133

Lançon, J., Reaux, R., Cariolle, M., Munier-Jolain, N., Omon, B., Petit, M.-S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'expert de systèmes de culture innovants ? In: Reau, R. et Doré, T. (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri Editions, 71-107.

Lançon J., Wery J., Rapidel B, Deguine J.-P., Fok M., Dugue P., Gaborel C., Gérardaux E., 2002. Prototypage d'itinéraires techniques adaptés à une diversité de situations de culture du cotonnier. 28p.

Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gérardaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., Fadegnon, B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for sustainable development*. 27, 101-110

Sadok W., Angvin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messean A., Doré T. (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*, 27, pp163-174.

Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messean 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, pp447-461.

Sarthou et al., (2012), in Justes et al., 2012 ; Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France).

Sebillotte M. (1990) Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes, in: Combe L., Picard D. (Eds.), Un point sur les systèmes de culture, INRA éditions, Paris, pp. 165–196

Vereijken P. (1997) A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (IEAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 7, pp235-250.



# Annexes

---



**Annexe I :** Les différents scénarios économiques et climatiques utilisés dans l'évaluation a priori

Scénarios	Description du scénario	Données économiques			Données météo
		Prix des intrants	Prix de vente	Primes	
Marché 2008	Prix faibles : les prix des intrants et les prix de vente sont inférieurs aux prix moyens, les prix sont ceux de l'année 2008.	2008	2008	2008	1998-1999
Marché 2010	Prix forts : Les prix des intrants et les prix de vente sont supérieurs aux prix moyens, les prix sont ceux de l'année 2010.	2010	2010	2010	1998-1999
Marché moyen	Prix moyens : scénario économique moyen servant de référence aux autres scénarios (moyenne des prix des intrants, prix de vente et primes de 2007 à 2010)	2007-2010	2007-2010	2007-2010	1998-1999
Marché très favorable	Combinaisons de prix des intrants faibles (carburant compris) et de prix de vente élevés (primes correspondantes), le scénario a été construit à partir des années 2008 et 2010 --> Scénario le plus favorable	2008	2010	2010	1998-1999
Marché défavorable	Combinaisons de prix des intrants élevés (carburant compris) et de prix de vente faibles (primes correspondantes), le scénario a été construit à partir des années 2008 et 2010 --> Scénario le plus défavorable	2010	2008	2008	1998-1999
Climat sec	Année sèche : pluviométrie faible (425 mm), faible drainage	2007-2010	2007-2010	2007-2010	2005-2006
Climat médian	Année médiane : année médiane du point de vue pluviométrie et drainage sur la période 1995-2010	2007-2010	2007-2010	2007-2010	1998-1999
Climat humide	Année humide : pluviométrie abondante (746 mm) et drainage important	2007-2010	2007-2010	2007-2010	2008-2009



**Annexe II** : Objectifs généraux du dispositif de l'EIP déclinés en sous objectifs et indicateurs

Améliorer la gestion <b>quantitative</b> de l'eau	Réduction de l'irrigation	Qt d'eau d'irrigation
Gestion <b>qualitative</b> de l'eau : Réduire les flux de <b>nitrate</b> s vers les eaux souterraines		NO3- lixiviés (kgNo3-/ha) INDIGO
Gestion <b>qualitative</b> de l'eau : Réduire les flux de <b>molécules herbicides</b> vers les eaux souterraines / pesticides	Réduction des impacts environnementaux	I-Phy eaux sup
		I-Phy eaux prof
	Amélioration des pratiques	IFT total
		IFTM
		IFT Molluscicides.
Maintenir la <b>viabilité économique</b> du système	Rentabilité économique	Marge Brute
		Marge Semi Nette
	Maintenir un "bon niveau" de Rdt	Rendement attendu
	Maintenir les charges de mécanisation	Charges méca
	Réduire les charges liées à l'irrigation	Charges irrigation



**Annexe III** : Valeurs seuils utilisées pour l'évaluation a priori des systèmes du site d'Auzeville (arborescence principales), Craheix et al. 2012 (systèmes conduits en sec). Les seuils en violet foncé sont adaptés à la région Midi-Pyrénées.

		Valeurs seuils adaptées au projet d'évaluation						
Critères basiques		Borne inférieure		Borne intermédiaire		Borne supérieure		
Rentabilité	MSN	Très faible	500	Faible à moyenne	650	Moyenne à élevée	800	Très élevée
Indépendance économique	IND	Très faible	20	Faible à moyenne	40	Moyenne à élevée	60	Très élevée
Efficience économique	EFF	Très faible	110	Faible à moyenne	130	Moyenne à élevée	150	Très élevée
Surcout en matériel	MAT	Elevé	expertise	Moyen	expertise	Faible		
Maîtrise du statut acido-basique	MSAB	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise de l'état structural	MES	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise de la fertilité P-K	MFPP	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise des maladie et des ravageurs	MMR	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise des adventices	MADV	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Qualité sanitaire	QS	Faible	2	Moyenne	1	Elevée		
Qualité technologique	QTEP	Faible	1,5	Moyenne	2	Elevée		
Contribution à l'émergence de nouvelle filière	CENF	Nulla	0	Elevée	0,5	Très élevée		
Contribution à l'emploi	EMP	Très faible	3	Faible à moyenne	6	Moyenne à élevée	9	Très élevée
Fourniture de matières premières	FMP	Très faible	0,7	Faible à moyenne	0,8	Moyenne à élevée	0,9	Très élevée
Complexite des itinéraires techniques	CIT	Très faible	0,8	Faible à moyenne	1,6	Moyenne à élevée	2,4	Très élevée
Temps de veille technico-économique	TVTE	Elevé	6	Moyen	3	Faible		
Surcharge de travail	ST	Elevée	supérieure	Moyenne	equivalente	Faible	inférieure	
Risque pour la santé de l'applicateur	TOX	Elevé	2	Moyen	1	Faible		
Difficulté physique	DIFF	Elevée	6,6	Moyen	3,3	Faible		
Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux profondes	PES	Très faible	4	Faible à moyenne	7	Moyenne à élevée	9	Très élevée
Maîtrise des pertes de pesticides dans les eaux superficielles	PEP	Très faible	4	Faible à moyenne	7	Moyenne à élevée	9	Très élevée
Maîtrise des pertes de NO3	MPNO3	Très faible	60	Faible à moyenne	40	Moyenne à élevée	20	Très élevée
Maîtrise des pertes de P	MPPH	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise des émissions de NH3	MNH3	Très faible	40	Faible à moyenne	20	Moyenne à élevée	7	Très élevée
Maîtrise des émissions de N2O	MN2O	Très faible	6	Faible à moyenne	3	Moyenne à élevée	1	Très élevée
Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air	MPPA	Très faible	4	Faible à moyenne	7	Moyenne à élevée	9	Très élevée
Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques	MAET	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Maîtrise du statut organique	IMO	Très faible	4	Faible à moyenne	7	Moyenne à élevée	9	Très élevée
Maitrise de l'érosion	MERO	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Conso. en eau d'irrigation en période critique	IRRC	Elevée	200	Moyenne	150	Faible		
Dépendance vis-à-vis de la ressource en eau	DPEAU	Elevée	expertise	Moyenne	expertise	Faible		
Consommation en énergie	CEN	Elevée	16000	Moyenne	9000	Faible		
Efficience énergétique	EEN	Faible	600	Moyenne	900	Elevée		
Pression Phosphore	PSPH	Très élevée	60	Moyenne à élevée	40	Faible à moyenne	20	Très faible
Conservation des insectes volants	CMIV	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Conservation de la macrofaune du sol	CMS	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Abondance floristique	ABOF	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Diversité floristique	DF	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Conservation des micro-organismes	CMOS	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée



**Annexe IV** : Valeurs seuils utilisées pour l'évaluation a priori des systèmes du site d'Auzeville (arbres satellites), Craheix et al. 2012 (systèmes conduits en sec).

Arbres satellites			Borne inférieure		Borne intermédiaire		Borne supérieure	
Statut acido-basique initial (pH)	pH	Faible	6	Moyen	7	Elevé		
Pouvoir tampon du sol (CEC)	CEC	Faible	8	Moyen	14	Elevé		
Effet des pratiques acidifiantes	EPA	Très faible	3	Faible à moyen	5	Moyen à élevé	7	Très élevé
Effet des amendements basiques	EAB	Très faible	150	Faible à moyen	250	Moyen à élevé	350	Très élevé
Proportion de cultures récoltées en mauvaises conditions	CRMC	Très faible	0	Faible à moyenne	20	Moyenne à élevée	40	Très élevée
Effet des équipements limitant le tassement	ELT	Faible	expertise	Elevé				
Aptitude du sol à la fissuration	ASF	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Régénération mécanique de la structure	RMS	Très faible	expertise	Faible à moyenne	expertise	Moyenne à élevée	expertise	Très élevée
Bilan annuel moyen de P	BCAP	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes
Recyclage du P par les résidus de récolte	RIP	Faible	30	Moyen	60	Elevé		
Pouvoir tampon du sol P	PTP	Faible	expertise	Moyen	expertise	Elevé		
Etat de la fertilité initiale de K	EPIK	Faible	expertise	Moyen	expertise	Elevé		
Bilan annuel moyen de K	BCAK	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes
Recyclage du K par les résidus de récolte	RIK	Faible	50	Moyen	90	Elevé		
Pouvoir tampon du sol K	PTK	Faible	expertise	Moyen	expertise	Elevé		
Effet du travail du sol	ETS	Très faible	expertise	Faible à moyen	expertise	Moyen à élevé	expertise	Très élevé
Effet des méthodes de lutte (maladies et ravageurs)	EMLMR	Faible	1,5	Moyen	2,5	Elevé		
Effet de la diversité des périodes d'implantation	EDPI	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes
Effet du labour	ELAB	Faible	expertise	Elevé				
Effet des méthodes de lutte (adventices)	EMLA	Faible	4	Moyen	5	Elevé		
Quantité de P apportée en moyenne	QAP	Faible	40	Moyenne	100	Elevée		
Méthode d'incorporation des amendements	MIA	Faible	expertise	Moyenne	expertise	Elevée		
Etat de fertilité initiale P	EFIP	Faible	expertise	Moyen	expertise	Elevé		
Sensibilité du milieu	SENS	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes
Défauts de couverture du sol en périodes à risque (érosion)	DCPR	Faible	20	Moyen	40	Elevé		
Demande en eau des cultures	DMEAU	Elevée	750	Moyenne	600	Faible		
Autonomie de la ressource en eau	AUTEA	Très élevée	100	Elevée	85	Moyenne	75	Faible
IFT Insecticides	IFTI	Nul	0	Faible	0,75	Moyen	1,5	Elevé
Effet du travail du sol	ETS	Très faible	expertise	Faible à moyen	expertise	Moyen à élevé	expertise	Très élevé
IFT Insecticides	IFTI	Nul	0	Faible	0,75	Moyen	1,5	Elevé
Effet de la diversité des périodes d'implantation (flore)	EPI	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes	5 classes
Utilisation d'herbicides à spectre large	UHSL	Nulle	0	Faible à moyenne	1	Elevée		
Gestion des bords de champs	GBC	Faible	expertise	Moyenne	expertise	Elevée		
Effet des apports de matières organiques	IMO	Très faible	4	Faible à moyen	7	Moyen à élevé	9	Très élevé
Effet des pesticides	IFTT	Nul	0	Faible	3	Moyen	5	Elevé
Effet de la diversité des familles cultivées	DFC	Faible	1,7	Moyen	2,5	Elevé		



**Annexe V** : Autres valeurs seuils utilisées : a priori pour l'évaluation des monocultures de maïs, a posteriori pour évaluer les systèmes en sec ; a posteriori pour évaluer les monocultures

Rentabilité	MSN	Très faible	550	Faible à moyenne	650	Moyenne à élevée	750	Très élevée
Indépendance économique	IND	Très faible	20	Faible à moyenne	40	Moyenne à élevée	60	Très élevée
Efficience économique	EFF	Très faible	120	Faible à moyenne	130	Moyenne à élevée	140	Très élevée

Rentabilité	MSN	Très faible	650	Faible à moyenne	800	Moyenne à élevée	950	Très élevée
Indépendance économique	IND	Très faible	20	Faible à moyenne	40	Moyenne à élevée	60	Très élevée
Efficience économique	EFF	Très faible	150	Faible à moyenne	180	Moyenne à élevée	200	Très élevée

Rentabilité	MSN	Très faible	700	Faible à moyenne	800	Moyenne à élevée	900	Très élevée
Indépendance économique	IND	Très faible	20	Faible à moyenne	40	Moyenne à élevée	60	Très élevée
Efficience économique	EFF	Très faible	110	Faible à moyenne	120	140	130	Très élevée







**Annexe VII** : Diagramme synoptique correspondant à l'évaluation a posteriori (2011/12) du système BI CI

Très élevée	4 /4	<b>Rentabilité</b>				<b>Résultats économiques de l'exploitation</b>	5 /15	Dimension économique	<b>Contribution au développement durable</b>
Très élevée	4 /4	<b>Indépendance économique</b>		4 /4	<b>Autonomie économique</b>				
Très élevée	4 /4	<b>Efficience économique</b>							
Élevé	1 /3	<b>Surcoût en matériel</b>							
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Maîtrise du statut acido-basique du sol</b>							
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise de l'état structural du sol</b>		2 /4	<b>Maîtrise de la fertilité physico-chimique</b>	<b>Capacité productive à long terme</b>			
Très faible	1 /4	<b>Maîtrise de la fertilité phosphatassique</b>			3 /4				
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Maîtrise des maladies et ravageurs</b>		3 /4	<b>Maîtrise des bioagresseurs</b>				
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Maîtrise des adventices</b>							
Élevés	3 /3	<b>Qualité sanitaire</b>		4 /4	<b>Qualité des produits</b>	<b>Contribution au développement économique</b>			
Élevés	3 /3	<b>Qualité technologique et esthétique des produits</b>			4 /4				
Nuls	1 /3	<b>Contribution à l'émergence de nouvelles filières</b>							
Très élevée	4 /4	<b>Contribution à l'emploi</b>			4 /4	<b>Satisfaction des attentes de la</b>	4 /15	Dimension sociale	
Très élevée	4 /4	<b>Fourniture de matières premières</b>							
Très élevée	1 /4	<b>Complexité des itinéraires techniques</b>		1 /4	<b>Facilité de mise en oeuvre</b>				
Faible	3 /3	<b>Temps de veille technico-économique</b>							
Élevés	1 /3	<b>Surcharge de travail</b>			2 /4	<b>Satisfaction des attentes de l'agriculteur</b>			
Faibles	3 /3	<b>Risque pour la santé de l'opérateur</b>		3 /4	<b>Qualité des conditions de travail</b>				
Faibles	3 /3	<b>Difficulté physique</b>							
Très élevée	4 /4	4 /4	<b>Eaux profondes</b>	maîtrise des pertes pesticides	4 /4	<b>Contribution à la qualité de l'eau</b>	4 /4	Contribution à la qualité du milieu	
Très élevée	4 /4		<b>Eaux superficielles</b>						
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise des pertes de NO<sub>3</sub></b>							
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Maîtrise des pertes de P</b>							
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise des émissions de NH<sub>3</sub></b>							
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise des émissions de N<sub>2</sub>O</b>		4 /4	<b>Contribution à la qualité de l'air</b>				
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air</b>							
Très élevée	4 /4	<b>Maîtrise de l'accumulation d'éléments toxiques</b>							
Faible à moyenne	2 /4	<b>Maîtrise du statut organique</b>		2 /4	<b>Préservation de la qualité du sol</b>				
Faible à moyenne	2 /4	<b>Maîtrise de l'érosion</b>							
Faible	3 /3	<b>Consommation d'eau d'irrigation en période</b>		4 /4	<b>Pression Eau</b>	<b>Pression sur les ressources</b>	5 /15	Dimension environnementale	
Moyenne	2 /3	<b>Dépendance vis à vis de la ressource en eau</b>			4 /4				
Moyenne	2 /3	<b>Consommation en énergie</b>		3 /4	<b>Pression Énergie</b>				
Moyenne	2 /3	<b>Efficience énergétique</b>							
Faible à moyenne	3 /4	<b>Pression Phosphore</b>							
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Conservation des insectes volants</b>		2 /4	<b>Conservation de la macrofaune</b>	<b>Conservation de la biodiversité</b>			
Faible à moyenne	2 /4	<b>Conservation de la macrofaune du sol</b>			2 /4				
Faible à moyenne	2 /4	<b>Abondance floristique</b>							
Faible à moyenne	2 /4	<b>Diversité floristique</b>		2 /4	<b>Conservation de la flore</b>				
Moyenne à élevée	3 /4	<b>Conservation des micro-organismes</b>							































Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage.

Spécialité : Ingénieur Agronome

Spécialisation / option : Sciences et Productions Végétales /Ingénierie des Agrosystèmes

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Auteur(s) : Yolaine HILY

Date de naissance : 06 novembre 1990

Nb pages : 26

Annexe(s) : 14

Année de soutenance : 2013

Organisme d'accueil : Centre de recherche de l'INRA de Toulouse

Adresse : 24 Chemin de Bordé Rouge  
31326 Castanet Tolosan Cedex

Maîtres de stage : Eric Justes, Jacques-Eric Bergez,  
Grégory Véricel

Titre français :

Evaluation multicritère de prototypes de systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants dans le Sud-Ouest de la France : approche comparative d'une démarche a priori et a posteriori

Titre anglais :

Multi-criteria assessment of innovative prototypes of cropping systems in low input in the Southwest of France: a comparative approach to a priori and a posteriori assessment

**Résumé :** Depuis 2010, l'équipe VASCO de l'INRA de Toulouse coordonne le projet ANR MicMac Design dont un des principaux objectifs est de concevoir des systèmes de culture innovants basés sur les principes de la production intégrée et d'évaluer leurs performances. Une méthode de conception par prototypage a donc été mise en œuvre. Après trois ans d'expérimentation, une démarche d'évaluation reposant sur des analyses, *a priori* et *a posteriori*, est exposée dans ce mémoire. Le premier enjeu était de caractériser les performances des prototypes du projet i) en déterminant s'ils sont en capacité d'atteindre les objectifs spécifiques définis au début du projet et ii) en évaluant leur contribution aux dimensions économique, sociale et environnementale du développement durable grâce au modèle MASC 2.0. Le second enjeu, d'ordre méthodologique, était d'étudier l'intérêt des deux types d'évaluation dans le cadre de la démarche de conception mais aussi d'appréhender leur complémentarité. Deux « groupes » de systèmes se distinguent : les premiers, proches des systèmes de référence, dont les performances surpassent celles de la référence et les seconds, plus en rupture, dont les performances en terme de contribution au développement durable sont dégradées. De plus, les performances de certains systèmes mettant en œuvre des techniques très innovantes sont difficiles à évaluer *a priori*. En effet, peu de références sont déjà disponibles. Ainsi, les deux phases de l'évaluation semblent complémentaires : l'évaluation *a priori* permet de repérer et corriger dès leur conception d'éventuelles faiblesses des prototypes. L'évaluation *a posteriori* paraît ensuite nécessaire pour valider les prévisions faites *a priori* et détecter les difficultés liées à la mise en œuvre pratique des prototypes.

**Abstract:** Since 2010, the INRA Toulouse has coordinated the ANR MicMac Design project. The major objective of the latter is to design innovative cropping systems based on the principles of integrated pest management as well as to evaluate their performance. A conception method by prototyping has been implemented and allowed to build 11 systems which are currently being tested in the field. After three years of experimentation, an assessment process based on a priori and a posteriori analysis is presented in this paper. The first stake was to characterize the performance of the prototypes i) by determining their ability to reach specific aims, which were defined at the beginning of the project, and ii) by assessing, through the MASC model, their contribution to the economic, social and environmental dimension of sustainability. The second stake, more methodological, was to study the particular advantage of each assessment method and their complementarity nature. Two groups of systems were distinguished: first, systems (close to the reference) which surpass the performances of the reference and second, disruptive systems which involve some innovative techniques and whose performance is decreased in comparison to the reference. The performance of these systems is quite difficult to assess a priori. Indeed, references about such techniques are still rare. The two assessment methods are thus complementary: a priori assessment allows revealing the prototypes weaknesses and fixing them before the prototypes being implemented in fields. The a posteriori assessment seems to be firstly necessary to confirm the a priori assessment and secondly to detect some technical difficulties due to the practical implementation of innovative cropping systems.

**Mots-clés :** Durabilité, innovation, évaluation multicritères, expérimentation système de culture, modèle MASC 2.0