



HAL
open science

Évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de grande culture spécialisés en agriculture biologique dans le Sud-Ouest de la France (région Midi-Pyrénées)

Bruno B. Colomb, Anne Glandières

► To cite this version:

Bruno B. Colomb, Anne Glandières. Évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de grande culture spécialisés en agriculture biologique dans le Sud-Ouest de la France (région Midi-Pyrénées). Cahiers Agricultures, 2014, 23 (2), pp.108-119. 10.1684/agr.2014.0693 . hal-02629735

HAL Id: hal-02629735

<https://hal.inrae.fr/hal-02629735>

Submitted on 27 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de grande culture spécialisés en agriculture biologique dans le Sud-Ouest de la France (région Midi-Pyrénées)

Bruno Colomb¹
Anne Glandières²

¹ Inra
31326 Castanet Tolosan
France
<colomb@toulouse.inra.fr>

² Chambre régionale d'agriculture
Midi-Pyrénées
BP 22107
31321 Castanet-Tolosan cedex
France
<anne.glandieres@mp.chambagri.fr>

Résumé

L'analyse de la diversité des performances en durabilité des systèmes de culture dans un contexte régional particulier présente plusieurs sources d'intérêt, que ce soit pour l'aide à la décision publique ou le conseil aux agriculteurs. Cet article présente une évaluation multicritère des systèmes de grandes cultures biologiques spécialisés de la région Midi-Pyrénées. L'entreprise, conduite avec un groupe de conseillers agricoles, a nécessité l'adaptation d'un modèle d'évaluation générique (MASC) aux spécificités de l'agriculture biologique. L'évaluation a porté sur 44 systèmes de culture provenant de 19 exploitations. Les indicateurs de durabilité économique, sociale, et agronomique montrent une variabilité importante. La dimension économique est la plus difficile à assurer, en raison d'une rentabilité jugée le plus souvent faible et d'une autonomie économique moyenne ou faible dans la majorité des cas. La dimension agronomique est fréquemment jugée moyenne mais aussi assez faible dans un cas sur cinq. Les difficultés sont associées essentiellement à la gestion des nutriments à l'échelle des rotations. La dimension environnementale est très favorablement notée, même si des points faibles ont été identifiés concernant l'utilisation des ressources en énergie et en eau, ou les risques de lixiviation de l'azote. L'acceptabilité sociale est favorablement notée, mais cela tient plus à l'acceptabilité pour les agriculteurs que vis-à-vis de la société globale, compte tenu d'un niveau de productivité souvent peu élevé et d'une faible contribution à l'emploi. La comparaison des systèmes irrigués et non irrigués démontre que le niveau d'intensification choisi par les agriculteurs influence le profil de performances des systèmes de culture. Les premiers sont plus performants du point de vue économique, mais moins du point de vue agronomique et environnemental. Dans les deux cas, le niveau de productivité des cultures peut être insuffisant et influencer défavorablement sur la durabilité totale des systèmes.

Mots clés : agriculture biologique ; durabilité ; indicateur ; modèle ; système de culture.

Thèmes : agronomie ; méthodes et outils ; systèmes agraires.

Abstract

Sustainability assessment of organic arable cropping systems of the French Midi-Pyrenees region

Assessing the diversity of sustainability performances of cropping systems in a given regional context is interesting for several reasons, whether for public decision-making or advice to farmers. This article presents a multicriteria analysis of organic arable cropping systems in the Midi-Pyrenees region of France. The work, performed with a group of extension agents, required adapting a generic assessment model (MASC) to the particular characteristics of organic systems. Forty-four cropping systems from 19 farms were assessed. The indicators of economic, social and agronomic sustainability show high variability. The economic dimension is the most difficult to secure, since profitability is scored low and economic autonomy is scored medium or low in most

Tirés à part : B. Colomb

doi: 10.1684/agr.2014.0693

Pour citer cet article : Colomb B, Glandières A, 2014. Évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de grande culture spécialisés en agriculture biologique dans le Sud-Ouest de la France (région Midi-Pyrénées). *Cah Agric* 23 : 108-19. doi : 10.1684/agr.2014.0693

cases. The agronomic dimension is frequently considered medium but also rather low in one out of five cases. Problems are associated mainly with nutrient management at the crop-rotation scale. Higher scores are observed for the environmental dimension, even if weak points were identified regarding the use of energy and water resources or the risk of nitrate leaching. Social acceptability scores better for farmers than for society as a whole, given the frequent low production levels of organic cropping systems and their small contribution to local employment. The comparison of irrigated and non-irrigated systems shows that the level of intensification chosen by farmers influences the performance profile of their cropping systems. Irrigated systems have higher economic performance but lower agronomic and environmental performances. In both cases, poor crop productivity levels observed for some systems may impinge on their overall sustainability.

Key words: cropping system; indicator; model; organic farming; sustainability.

Subjects: agronomy; farming systems; tools and methods.

L'analyse de la diversité des performances en durabilité des systèmes de culture à l'échelle spatiale des parcelles et à l'échelle temporelle des successions culturales dans un contexte régional présente plusieurs sources d'intérêt. À ces échelles se joue le lien entre performances et pratiques des agriculteurs, raisonnées en fonction du contexte pédoclimatique, du cadre socio-économique et des ressources de l'exploitation. De même, c'est à ces échelles que les effets cumulatifs des systèmes sur le potentiel productif des parcelles, sur les variables d'environnement et une partie des effets sur le paysage peuvent être appréciés.

Pour les acteurs du développement, l'élaboration d'une vision synthétique des performances des systèmes de culture et de leur variabilité est devenue une nécessité urgente (Faure et Compagnone, 2011). La mise au point de systèmes de culture multifonctionnels satisfaisants est considérée comme une opération complexe particulièrement difficile à mener (Vereijken, 1997 ; Kropff *et al.*, 2001 ; Meynard *et al.*, 2001 ; Sadok *et al.*, 2008 ; Prost *et al.*, 2009). C'est la raison pour laquelle, selon les termes de Meynard (2008), la mise au point de systèmes plus performants relève plus de l'amélioration pas à pas des systèmes existants que de la construction *de novo*. L'étude de la variabilité des performances des systèmes existants et le repérage des systèmes les plus performants mis en œuvre par

des agriculteurs dans un cadre régional trouvent ici leur première justification. Pour les agriculteurs, les résultats de ce type d'étude peuvent permettre de se situer dans la mosaïque des situations existantes, définies non par les pratiques, mais bien par le profil des performances aujourd'hui attendues des systèmes de culture.

Cet article présente une évaluation multicritère des performances des systèmes de grande culture spécialisés en agriculture biologique de la région Midi-Pyrénées dans les différents domaines de la durabilité, conduite entre 2007 et 2011 dans le cadre du projet CITODAB (« Contribution des Innovations Techniques et Organisationnelles à la durabilité de l'Agriculture Biologique ») du programme PSDR 3 (Pour et Sur le Développement Régional) de la région Midi-Pyrénées (Colomb et Gafsi, 2012). Dans cette région, les systèmes de culture biologiques sans élevage présentent de grandes similitudes concernant certains traits de conduite technique, tels que le recours systématique au labour, la quasi-absence de cultures intermédiaires, de cultures fourragères ou associées, et un panel de cultures principales limité. La présence ou non d'irrigation est le caractère essentiel de différenciation de ces systèmes. Compte tenu des enjeux de productivité mais aussi de ressources qui lui sont associés, ce caractère a été privilégié dans l'analyse de la variabilité des performances dans les différents domaines de durabilité considérés.

Méthode

L'étude a été menée avec une équipe de cinq conseillers « grandes cultures » spécialisés ou non en agriculture biologique de cinq chambres d'agriculture de la région Midi-Pyrénées, et d'une chargée de mission de la chambre régionale d'agriculture. À l'issue de la période 2002-2004 durant laquelle les difficultés économiques de la grande culture biologique étaient importantes, cette équipe a souhaité élaborer une vue synthétique sur les forces et les faiblesses de ce type de système. L'objectif principal était d'obtenir un ensemble organisé de jugements sur le degré de satisfaction des objectifs de durabilité assignés aux systèmes de culture biologiques, dans les différents domaines économique, social, et agroenvironnemental. Cet objectif se doublait d'une volonté d'utiliser un modèle d'évaluation adapté, transparent et paramétrable, permettant aux conseillers de pondérer les indicateurs conformément à leurs points de vue sur l'importance relative des enjeux associés aux systèmes de culture biologiques. Les grandes étapes de travail ont été les suivantes :

- choix d'un modèle d'évaluation générique et adaptation aux spécificités des systèmes biologiques ;
- choix des modes d'évaluation des indicateurs ;
- paramétrage et calibrage du modèle ;

- choix et description des systèmes de grandes cultures à évaluer et soumission au modèle ;
- analyse des résultats pour la mise en évidence du profil de forces et de faiblesses recherché.

Choix et adaptation du modèle d'évaluation

Le choix du modèle parmi d'autres modèles existants a fait l'objet d'une étude préalable et d'une publication particulière (Carof *et al.*, 2012). Le modèle générique sélectionné, MASC 1.0¹ (Sadok *et al.*, 2009), est constitué d'une structure arborescente d'indicateurs. Cette structuration permet d'agréger progressivement des indicateurs dits basiques (constituant les entrées du modèle) relevant des dimensions économique, sociale et agroenvironnementale de la durabilité, en un indicateur synthétique dit de durabilité totale, *via* des indicateurs intermédiaires correspondant à des sous-domaines de préoccupations (acceptabilité sociale pour l'agriculteur, qualité des sols, pression sur les ressources abiotiques, par exemple). Tous les indicateurs sont de nature qualitative, et expriment des jugements du type « faible » ou « élevé » sur des finalités attendues des systèmes de culture (rentabilité ou préservation des ressources, par exemple). Compte tenu de la structure arborescente du modèle et de la nature qualitative des indicateurs, le processus d'agrégation depuis les indicateurs basiques jusqu'à l'indicateur synthétique s'effectue par le biais de règles qualitatives du type « SI Indicateur **A** est *moyen* ET SI indicateur **B** est *faible* ALORS indicateur **C** (parental de A et de B) est *assez élevé* ». Grâce à la technologie DEXi² utilisée pour implémenter le modèle (Bohanec, 2011), ces règles permettent aussi de traduire l'importance relative (pondération) accordée aux divers indicateurs de l'arborescence par les utilisateurs du modèle.

À l'issue d'une phase d'appropriation (Colomb *et al.*, 2010) MASC 1.0 a été enrichi d'indicateurs touchant aux impacts des systèmes de culture sur

le potentiel productif des parcelles à long terme, dont l'ensemble caractérise leur durabilité agronomique. En effet les systèmes biologiques doivent compter essentiellement sur eux-mêmes pour maintenir la fertilité des sols et contrôler les bioagresseurs, compte tenu de la réglementation limitant l'usage des intrants de synthèse (Wijnands *et al.*, 1999 ; Johnson et Toensmeier, 2009 ; Mohler, 2009). L'approche de la durabilité agronomique a été déclinée en trois sous-indicateurs relatifs à la maîtrise des adventices, des bioagresseurs, et de la fertilité du sol. Cette dernière fait l'objet d'une décomposition supplémentaire en termes d'évaluation de la qualité de gestion des nutriments à l'échelle des rotations, du statut organique et de l'état structural des sols. L'introduction de ce sous-ensemble d'indicateurs complémentaire a conduit à la production d'un nouvel arbre d'évaluation (MASC-OF) structuré de manière à donner une importance équivalente aux quatre domaines de préoccupations en durabilité, dont l'agronomie (*figure 1*). Par rapport à MASC 1.0, l'acceptabilité sociale a été divisée en acceptabilité pour l'agriculteur et en acceptabilité pour la société globale. L'agriculture biologique étant souvent questionnée sur sa capacité à produire des biens alimentaires (Badgley *et al.*, 2007 ; Kirchmann *et al.*, 2008), un indicateur de « productivité » relatif aux rendements superficiels des cultures a été introduit dans ce dernier sous-domaine. La partie de l'arbre relative à la dimension environnementale comporte des indicateurs relatifs à l'impact des systèmes de culture sur le sol, l'eau et l'air repris du système d'évaluation INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2008), ainsi que des indicateurs relatifs à la pression des systèmes de culture sur les ressources abiotiques (eau, énergie, phosphore) ou biotiques (biodiversité cultivée et non cultivée) repris du modèle MASC.

Au total, le modèle MASC-OF comporte 49 indicateurs, dont 29 basiques. Le nombre de classes de jugement varie selon les indicateurs (*figure 1*). Il est de 7 pour les indicateurs de l'arbre relatifs à la durabilité totale et aux quatre sous-domaines de la durabilité retenus, avec une échelle de valeurs variant de 1 pour *très faible* à 7 pour *très élevé*.

Mode d'évaluation des indicateurs

Les indicateurs ont été présentés en détail dans une publication récente (Colomb *et al.*, 2013). En bref, les indicateurs basiques des domaines économique, social et environnemental ont été évalués conformément aux prescriptions associées au modèle MASC 1.0 (Sadok *et al.*, 2009). Pour l'indicateur de productivité introduit dans le domaine de l'acceptabilité sociale, une note de 1 à 10 a été donnée aux rendements obtenus pour les diverses cultures des systèmes évalués, en tenant compte de la variabilité des rendements observée en Midi-Pyrénées. La moyenne des notes obtenues pour chaque système a été convertie ensuite sous forme d'une appréciation qualitative, sur la base de notes seuils établies par les conseillers. Les indicateurs agronomiques basiques introduits dans le modèle se réfèrent à des problématiques complexes pour lesquels il n'existe pas de modèles d'évaluation académique suffisamment génériques et simples d'utilisation. Les conseillers ont donc élaboré des approches d'expertises dirigées, basées sur des facteurs de diagnostic choisis par eux-mêmes, qu'ils étaient en mesure d'apprécier directement et de combiner pour aboutir au diagnostic recherché. Un exemple de schéma d'expertise, utilisé pour l'appréciation de l'impact des systèmes de culture sur la structure du sol, est présenté *figure 2*.

Paramétrage et calibrage

Le paramétrage du modèle a consisté principalement à définir les corps de règles d'agrégation de chacun des indicateurs agrégés. Il s'agit d'un moment clé de préparation de l'outil d'évaluation par le collectif de travail (Colomb *et al.*, 2011a). Les règles déterminent les poids contributifs des indicateurs basiques et intermédiaires dans le diagnostic synthétique de l'indicateur de durabilité totale situé à la racine de l'arbre d'évaluation (Colomb *et al.*, 2011b ; Colomb *et al.*, 2013). Les quatre sous-domaines de la durabilité ont été dotés d'une pondération identique (25 %) vis-à-vis de l'indicateur de durabilité totale.

¹ MASC : *Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems*.

² DEXi : logiciel d'aide à la décision multicritère.

Indicateur	Échelle de notation
Durabilité totale	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Durabilité socio-économique	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Durabilité économique	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Rentabilité	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Autonomie économique	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Indépendance économique	faible ; moyenne ; élevée
Efficience technico-économique	faible ; moyenne ; élevée
Besoin en équipement supplémentaire	très élevé ; élevé ; moyen ; faible
Acceptabilité sociale	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Acceptabilité par la société	très faible ; faible ; moyenne ; élevée ; très élevée
Contribution à l'emploi	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Productivité surfacique	très faible ; faible ; moyenne ; élevée ; très élevée
Acceptabilité par l'agriculteur	très faible ; faible ; moyenne ; élevée ; très élevée
Difficulté opérationnelle	très élevée ; moyenne à élevée ; faible à moyenne ; très faible
Pénibilité du travail	élevée ; moyenne ; faible
Complexité de mise en oeuvre	élevée ; moyenne ; faible
Risque de toxicité pour le travailleur	élevé ; moyen ; faible ; nul
Durabilité agro-environnementale	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Durabilité agronomique	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Maîtrise de la fertilité du sol	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Qualité gestion des nutriments	très défavorable ; défavorable ; favorable ; très favorable
Qualité gestion N	très défavorable ; défavorable ; favorable ; très favorable
Qualité gestion P	très défavorable ; défavorable ; favorable ; très favorable
Qualité gestion K	très défavorable ; défavorable ; favorable ; très favorable
Maîtrise statut organique	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise état structural du sol	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise des adventices	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Maîtrise des bioagresseurs	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Préservation environnement	très faible ; faible ; assez faible ; moyenne ; assez élevée ; élevée ; très élevée
Préservation du milieu physique	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Préservation qualité eau	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise des émissions pesticides eau	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise des émissions nitrates	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise des émissions phosphore eau	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation qualité sol	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise érosion	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise qualité chimique sol	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise statut organique	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation qualité air	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise émissions NH ₃	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise émissions N ₂ O	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Maîtrise émissions pesticides air	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation de la biodiversité	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Préservation biodiversité cultivée	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation biodiversité non cultivée	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation des ressources abiotiques	très faible ; faible ; moyenne ; élevée
Préservation ressources énergétiques	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation quantitative eau	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée
Préservation des ressources en N et P	très faible ; faible à moyenne ; moyenne à élevée ; très élevée

Figure 1. Le modèle MASC-OF (dérivé du modèle MASC 1.0 [Sadok *et al.*, 2009]) mis au point dans cette étude et utilisé pour l'évaluation de 44 systèmes de grandes cultures biologiques de la région Midi-Pyrénées.

Figure 1. Structure of the MASC-OF model (derived from the MASC model [Sadok *et al.*, 2009]) designed in this study and used for the assessment of 44 organic cropping systems of the Midi-Pyrenees region.

Noter la structure dichotomique du modèle sur les trois premiers niveaux de l'arbre à partir de l'indicateur racine. Les indicateurs de durabilité agronomique et l'indicateur de productivité sont nouveaux par rapport à MASC 1.0. Les indicateurs agrégés sont en gras. Les classes de jugement des indicateurs écrites en rouge sont défavorables du point de vue de la durabilité des systèmes, en vert favorables, en noir neutres.

Un autre aspect du paramétrage consiste à déterminer les valeurs seuils nécessaires à la discrétisation de certains critères quantitatifs intervenant dans l'évaluation des indicateurs basiques (marge brute en euros/ha/an, consommation d'eau d'irriga-

tion en m³/ha/an, consommation énergétique en MJ/ha/an, etc.). Les valeurs seuils ont été établies par les conseillers à partir des données issues de leurs réseaux départementaux de suivi d'exploitations agricoles ou à partir d'une étude préalable dans le

domaine énergétique (Colomb *et al.*, 2009).

Le calibrage est la phase finale de mise au point du modèle. Il vise à vérifier qu'il délivre des diagnostics crédibles pour les conseillers, sur des systèmes dont ils connaissent bien les

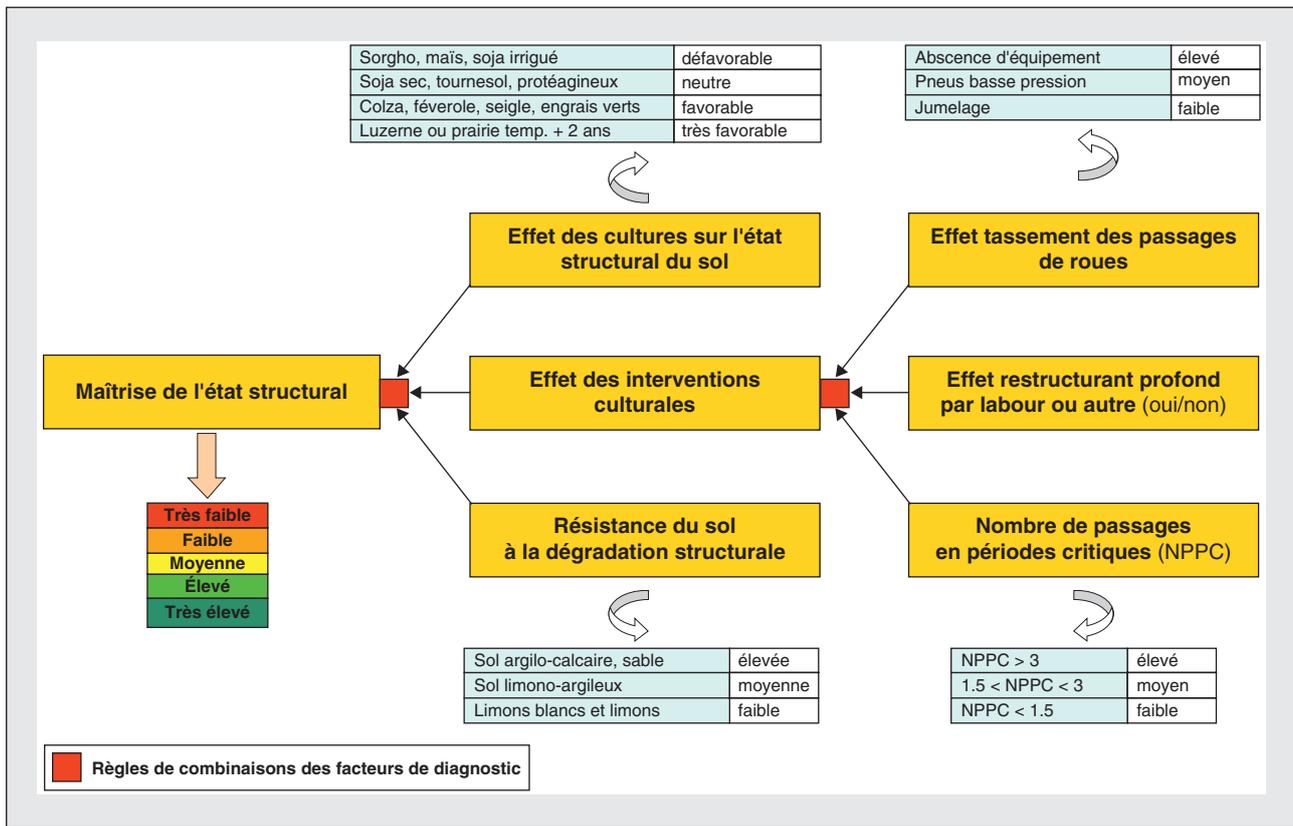


Figure 2. Schéma d'expertise dirigée mis au point par des conseillers pour évaluer l'indicateur d'impact des systèmes de grandes cultures biologiques sur la structure du sol.

Figure 2. Qualitative framework designed by extension agents for assessing the impact of organic cropping systems on soil structure.

The schema is composed of diagnostic factors for which the advisers are capable of realizing local categorizations, linked to each other by qualitative rules of the type « si ... et si ... alors ... », which allow to reach the diagnostic sought.

performances. En cas d'écart important (par exemple, obtenir avec le modèle le jugement « assez faible » pour un indicateur au lieu du jugement « élevé » attendu) et inexplicé, le mode de calcul ou d'évaluation des indicateurs concernés peut être revu, ainsi que les règles d'agrégation qui combinent les facteurs de diagnostic ou les indicateurs de rang inférieur. Le calibrage a été appliqué essentiellement sur la branche relative à la durabilité agronomique introduite dans le modèle (Colomb, 2012).

Choix et description des systèmes de culture à évaluer

Le jeu de cas analysés est constitué de 44 systèmes de culture provenant de 19 exploitations réparties dans 7

petites régions agricoles (Colomb *et al.*, 2011b). La surface agricole utile (SAU) des exploitations étudiées variait entre 25 et 230 hectares, avec une moyenne de 96 hectares. Les sols typiques de la région Midi-Pyrénées sur lesquels la grande culture biologique est développée sont bien représentés dans l'étude (limons battants type boubènes, sols argilo-calcaires superficiels ou profonds). Les successions, décrites sur la période 2003-2007 (quatre cultures successives) sont représentatives des rotations biologiques courtes à très courtes qui dominent en région Midi-Pyrénées (tableau 1). En fréquence, parmi les 176 cultures annuelles étudiées, le blé tendre représentait 29 %, le soja 23 %, le tournesol 11 %, la lentille et la féverole 9 %. Les cultures secondaires ou de niche étaient l'orge, le blé dur, le maïs, le pois, le pois chiche, la luzerne, le chanvre, l'épeautre (une occurrence

pour ces deux cultures). Les engrais verts étaient rares (trois cas pour 132 intercultures). Les parcelles ont été labourées au moins trois années sur quatre dans la majorité des cas. Vingt et une parcelles étaient irriguées, 23 non. Trente-trois parcelles dites fertilisées ont reçu au moins une fois un apport d'engrais organique, 11 parcelles n'ont pas été fertilisées durant la période considérée. La figure 3 présente les valeurs de quatre caractéristiques clés des systèmes étudiés, relevant de diverses dimensions de la durabilité (consommation et production énergétique, marge brute, nombre d'opérations culturales). Elle fait apparaître l'étendue des valeurs prises par les différentes caractéristiques ainsi qu'une liaison forte entre certaines d'entre elles, avec une distinction nette des nuages de points relatifs aux systèmes irrigués et non irrigués.

Tableau 1. Caractéristiques des systèmes de culture évalués.

Table 1. Features of the assessed cropping systems.

PRA	Sol	Séquence culturale	FER	IRR	DURTOT	DURECO	ACSOC	DURAGRO	DURENV
Lauragais	LM	SOJ 1/BTH 3/LEN 3/POI 9	F	I	3	1	6	3	5
Lauragais	AC	SOJ 3/BTH 3/SOJ 5/BTH 5	F	I	3	3	4	3	5
Lauragais	LM	MAI 4/TOU 3/BTH 3/SOJ 3	F	I	3	3	3	5	6
Coteaux de Gascogne	LM	POI 5/BTH 7/SOJ 3/SOJ 6	F	I	4	3	6	3	5
Lauragais	LM	FEV 1/LEN 6/SOJ 1/BTH 4	F	I	4	3	6	4	7
Terrasses garonnaises	ALO	FEV 8/BTH 8/SOJ 1/BTH 5	F	I	4	3	5	4	6
Terrasses garonnaises	ALO	SOJ 2/FEV 5/BTH 5/BD 7	F	I	4	4	5	3	6
Coteaux de Gascogne	LM	BTH 5/FEV 10/SOJ 3/SOJ 6	F	I	4	4	6	4	5
Lauragais	AC	BTH 5/SOJ 4/SOJ 7/BTH 5	F	I	4	4	5	4	5
Lauragais	AC	SOJ 6/SOJ 6/LEN 5/BTH 5	F	I	4	4	4	4	5
Coteaux du Gers	AC	BTH 4/LEN 4/BTH 5/SOJ 5	F	I	4	4	4	4	6
Terrasses garonnaises	LM	BTH 5/SOJ 8/BTH 7/SOJ 8	F	I	4	5	4	5	4
Terrasses garonnaises	LM	TV 1/BTH 8/SOJ 8/BTH 7	F	I	4	5	3	6	4
Lauragais	AC	SOJ 4/LEN 5/SOJ 7/SOJ 7	NF	I	4	5	4	3	4
Terrasses garonnaises	ALO	TOU 4/ORH 5/LEN 3/BTH 1	F	NI	4	1	5	5	7
Plaine albigeoise	LM	LEN 4/TOU 5/BTH 7/LEN 3	F	NI	4	2	5	4	7
Razes	AC	BTH 5/POI 2/BTH 4/TOU 6	F	NI	4	3	4	3	7
Terrasses garonnaises	AC	MAI 5/LEN 3/BTH 2/SOR 4	F	NI	4	3	4	4	7
Razes	AC	BTH 5/TOU 6/BTH 4/FEV 4	F	NI	4	3	4	5	7
Razes	AC	TOU 6/BTH 4/LEN 3/BTH 5	F	NI	4	3	4	5	7
Coteaux du Gers	AC	FEV 4/ORP 6/FEV 4/BTH 5	F	NI	4	3	4	5	7
Lauragais	AC	SOJ 4/BTH 5/LEN 4/BTH 5	F	NI	4	4	4	3	6
Gaillacois	AC	TOU 5/BTH 5/FEV 4/BTH 5	F	NI	4	4	4	4	7
Terrasses garonnaises	AC	BTH 3/TOU 2/BTH 4/BTH 5	NF	NI	4	3	5	4	7
Coteaux de Gascogne	AC	FEV 2/BTH 5/SOJ 7/SOJ 7	F	I	5	5	6	4	5
Terrasses garonnaises	LA	LEN 6/BTH 8/SOJ 8/SOJ 8	F	I	5	7	5	4	4
Coteaux du Gers	AC	BTH 5/SOJ 5/BTH 5/SOJ 4	NF	I	5	4	5	4	7
Lauragais	AC	SOJ 3/SOJ 4/SOJ 5/TOU 8	NF	I	5	5	5	4	4
Coteaux de Gascogne	LM	SOJ 7/TV 1/SOJ 7/SOJ 7	NF	I	5	6	4	5	5
Lauragais	AC	BTH 5/SOJ 3/TOU 5/FEV 3	F	NI	5	3	5	5	7
Lauragais	AC	LEN 4/BTH 5/TOU 5/FEV 3	F	NI	5	3	5	5	7
Coteaux du Gers	AC	FEV 3/ORH 6/LUZ 1/BTH 6	F	NI	5	3	5	5	7

(Suite)

Tableau 1. (Suite)

PRA	Sol	Séquence culturale	FER	IRR	DURTOT	DURECO	ACSOC	DURAGRO	DURENV
Plaine albigeoise	LM	LEN 4/BTH 5/TOU 3/BTH 4	F	NI	5	3	4	6	7
Coteaux du Gers	AC	TOU 4/FEV 2/BTH 5/TOU 3	F	NI	5	3	5	6	7
Coteaux du Gers	AC	PC 4/BTH 7/LEN 5/ORH 5	F	NI	5	4	5	3	7
Lauragais	AC	POI 7/BD 6/PC 2/TOU 7	F	NI	5	4	6	4	7
Lauragais	AL	BD 4/LEN 4/BTH 6/FEV 1	NF	NI	5	4	5	3	7
Coteaux du Gers	AC	BD 8/ORH 10/FEV 4/POI 3	NF	NI	5	4	6	4	7
Lauragais	LA	LEN 9/BD 4/TOU 4/SOJ 5	NF	I	6	5	6	4	7
Coteaux du Gers	AC	BTH 4/SOJ 6/BTH 4/SOJ 5	NF	I	6	5	5	4	7
Gaillacois	AC	BTH 5/TOU 5/BTH 5/TOU 5	F	NI	6	4	5	7	7
Coteaux du Gers	AC	FEV 4/ORH 5/POI 8/EPP 9	NF	NI	6	5	6	5	7
Coteaux du Gers	AC	BTH 7/LEN 5/BTH 7/CHA 10	F	NI	7	5	6	6	7
Coteaux du Gers	AC	LUZ 4/TOU 8/EPP 7/TOU 5	NF	NI	7	5	6	7	7

PRA : petite région agricole d'origine.

Sol : LM sol limoneux (Boulbènes) ; LA Limon argileux non calcaire ; AC argilo-calcaire ; ALO argile lourde.

Séquence culturale : BTH blé tendre d'hiver ; BD blé dur ; CHA chanvre ; EPP épeautre ; FEV féverole ; LEN lentille ; LUZ luzerne ; MAI maïs ; ORH orge d'hiver ; ORP orge de printemps ; POI pois d'hiver ; TOU tournesol ; SOJ soja ; TV trèfle violet. Les nombres qui suivent le code des cultures correspondent à une note de productivité (de 1 très faible à 10 très élevée).

FER : F fertilisée ; NF non fertilisée. IRR : I irriguée ; NI non irriguée.

DURTOT, DURECO, ACSOC, DURAGRO, DURENV : notes de durabilité totale, économique, sociale, agronomique et environnementale (de 1 très faible à 7 très élevée).

Analyse des résultats d'évaluation

Elle a été effectuée en examinant successivement les résultats relatifs : i) à l'indicateur de durabilité totale et à sa variabilité, rapportée à la localisation des systèmes et aux niveaux de production des cultures ; ii) aux sous-indicateurs de durabilité économique, sociale, agronomique, et environnementale, avec analyse des différences entre systèmes irrigués et non irrigués ; iii) aux indicateurs de base dans les différents domaines, qui déterminent les précédents. Une mise en relation (menée de manière discursive par les conseillers) des indicateurs de base avec les pratiques a apporté des informations explicatives complémentaires.

Résultats

Indicateur de durabilité totale

À l'issue de l'évaluation, 5 classes de durabilité totale sont représentées

(tableau 1) pour l'ensemble des systèmes, les classes de durabilité faible et très faible étant absentes.

Les deux systèmes de durabilité totale très élevée sont situés sur sol argilo-calcaire et ne sont pas irrigués. Trois des quatre cultures de la succession se sont révélées très productives. L'un des systèmes n'est pas fertilisé mais comportait comme culture précédente une luzerne pluriannuelle. Le deuxième, fertilisé, comportait l'une des rares cultures de niche du jeu de cas (chanvre fibre) dont le niveau de production a été très élevé et le prix de vente particulièrement rémunérateur. La classe de durabilité totale élevée est représentée par 4 systèmes (2 sont irrigués et non fertilisés, 1 est non irrigué et fertilisé, 1 est non irrigué et non fertilisé), tous localisés sur sol argilo-calcaire ou limono-argileux. Au moins 2 des 4 cultures ont une note de productivité supérieure ou égale à la moyenne. L'un des 4 cas comporte l'une des rares cultures de niche (petit épeautre) du jeu de cas.

La classe de durabilité totale assez élevée est observée pour 5 systèmes irrigués et 10 systèmes non irrigués.

Les premiers comportent au moins deux sojas sur les 4 années de cultures. Pour les systèmes non irrigués de cette classe, seuls 3 montrent au moins une culture dont le niveau de production a été fort (note ≥ 7 sur 10), et 8 montrent au moins une culture dont le niveau de production a été faible (note ≤ 3 sur 10), cohabitant parfois avec une culture fortement productive. La classe de durabilité totale moyenne est observée pour 11 systèmes irrigués et 10 systèmes non irrigués. Sur les 21 systèmes de cette classe, seuls 2 manifestent des niveaux de production supérieur à la moyenne pour toutes les cultures, 12 présentent au moins une culture dont le niveau de production a été faible (note ≤ 3 sur 10), 9 présentent au moins une culture dont le niveau de production a été fort (note ≥ 7 sur 10). Les systèmes de durabilité totale assez faible sont tous trois des systèmes irrigués et fertilisés, pour lesquels néanmoins la note de productivité des cultures est faible (2 ou 3 d'entre elles ont une note inférieure à 3 sur 10). Outre des échecs de maîtrise de l'enherbement, des problèmes structuraux du sol

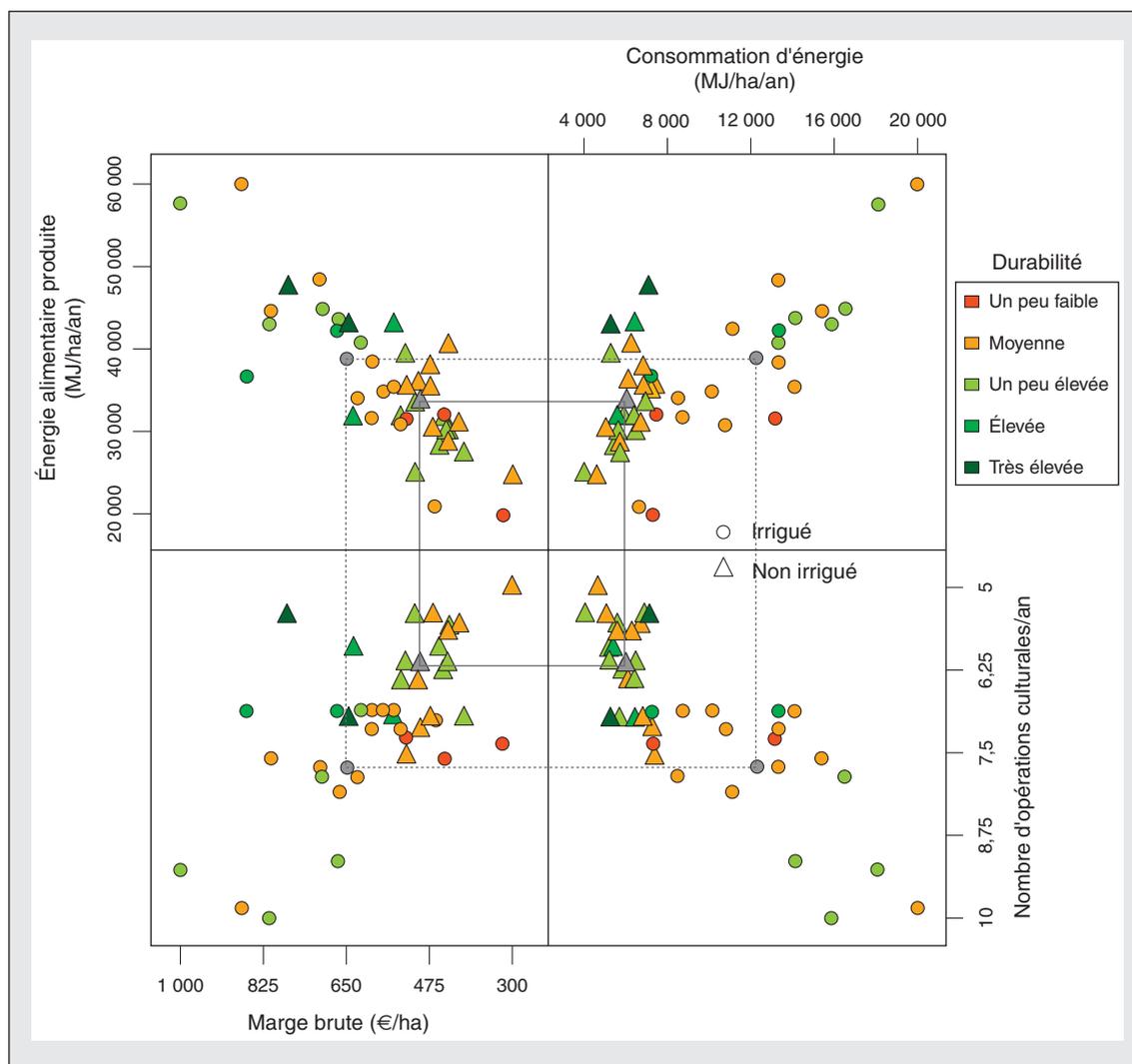


Figure 3. Quatre caractéristiques clés des systèmes de grandes cultures biologiques spécialisés irrigués (symbole rond) ou non irrigués (symbole triangulaire) de la région Midi-Pyrénées sur la période 2003-2006.

Figure 3. Four key characteristics of the irrigated (circle) or non-irrigated (triangle) arable organic cropping systems studied over the 2003-2006 period in the Midi-Pyrenees region.

La couleur des symboles se réfère au diagnostic de durabilité totale délivré par le modèle MASC-OF (cf. légende). Les traits discontinus et continus relient les points moyens relatifs aux systèmes irrigués et non irrigués respectivement. On remarque la présence de trois cas de durabilité assez faible (points rouges). La proportion de cas de durabilité assez élevée, élevée ou très élevée est plus importante pour les systèmes non irrigués.

(2 systèmes sont sur brouillard, de maladies (sur blé) ou de verse tardive (sur lentille) sont à l'origine des difficultés productives. Au total, 33 % des systèmes irrigués relèvent des classes de durabilité totale assez élevée, élevée ou très élevée, alors que celles-ci regroupent 56 % des systèmes non irrigués.

Indicateurs des différents domaines de durabilité

Pour l'ensemble des systèmes, la dimension économique de la durabi-

lité apparaît la moins bien notée et la plus variable (figure 4). La classe « assez faible » y est la plus représentée. L'acceptabilité sociale est globalement mieux satisfaite, le jugement « assez élevé » étant le plus fréquent, malgré la présence de quelques cas jugés assez faibles. La durabilité agronomique est fréquemment jugée moyenne. Elle est jugée assez faible dans un cinquième des cas, et élevée ou très élevée dans la même proportion. La durabilité environnementale est jugée plus favorablement que les trois autres, sans aucun cas noté assez faible, faible ou très faible.

Ces appréciations valables pour l'ensemble des systèmes masquent des différences notables entre les systèmes irrigués et ceux qui ne le sont pas. Les notes moyennes des indicateurs de durabilité des deux types de systèmes ont été comparées à l'aide d'un test t, en considérant des variances inégales pour les deux types de systèmes (tableau 2). Les systèmes non irrigués ont une note moyenne de durabilité totale supérieure à celle des systèmes irrigués du fait de notes moyennes de durabilité agronomique et environnementale significativement plus élevées. La note moyenne de

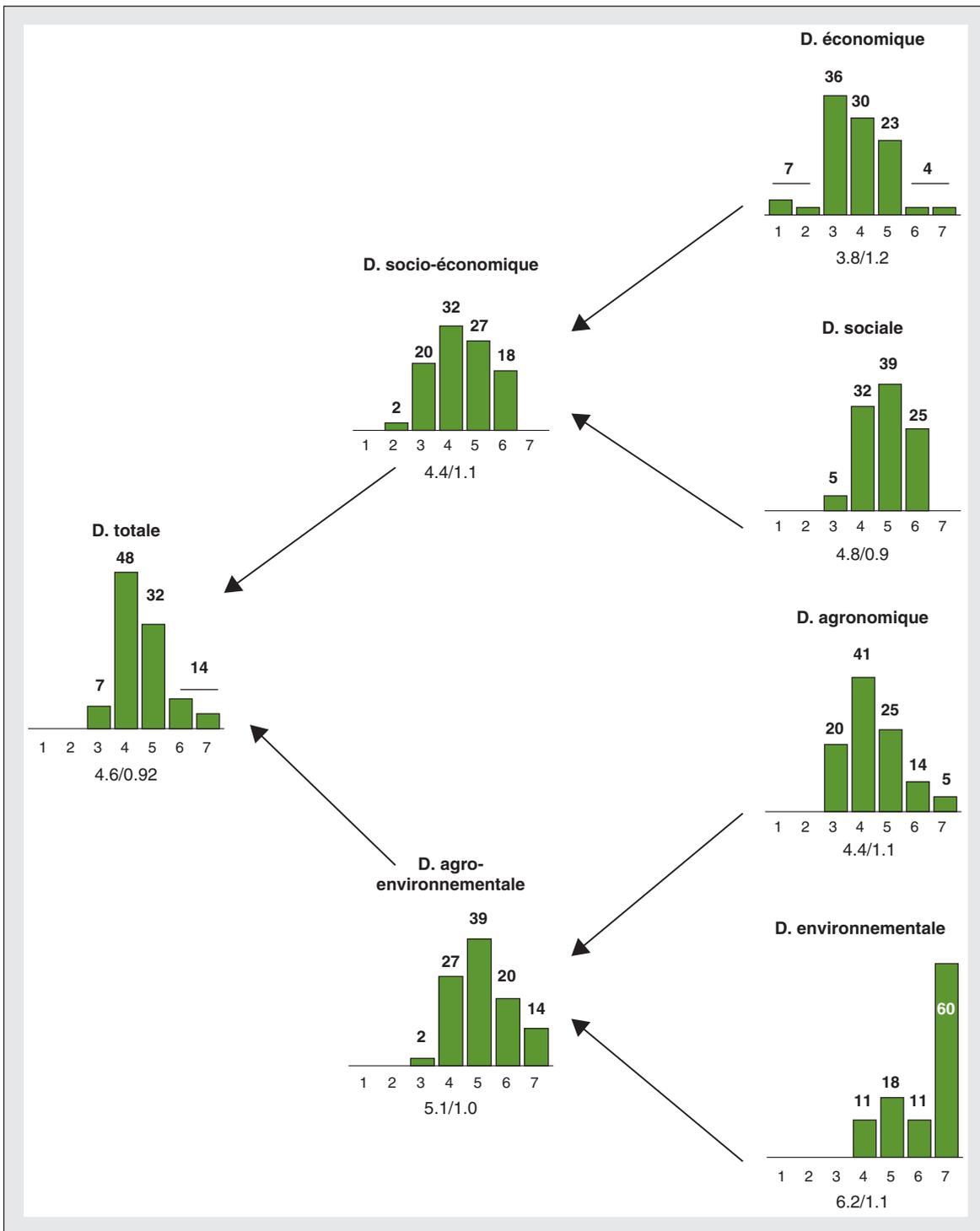


Figure 4. Structure arborescente explicitant le mode d'obtention de la note de durabilité totale (histogramme de gauche sur la figure) à partir des quatre notes de durabilité de base (histogrammes de droite) intégrées en deux étapes selon les règles exposées dans la partie « Méthode » de cet article à l'aide du modèle MASC-OF pour 44 systèmes de grandes cultures biologiques de la région Midi-Pyrénées sur la période 2003-2006.

Figure 4. Distributions of the sustainability scores of 44 arable organic cropping systems studied over the 2003-2006 period in the Midi-Pyrenees region, delivered by the MASC-OF model.

Chaque histogramme représente les distributions des notes de durabilité obtenues pour les 44 systèmes.

Échelle des notes : 1 très faible ; 2 faible ; 3 assez faible ; 4 moyen ; 5 assez élevée ; 6 élevée ; 7 très élevée.

Les nombres au-dessus des bâtonnets précisent les pourcentages de cas ayant les diverses notes. Les nombres en dessous des histogrammes correspondent respectivement aux notes moyennes (sur 7) et aux écarts types des distributions.

La durabilité économique est celle qui présente la note moyenne la plus faible et la plus grande dispersion. Elle est la plus difficile à satisfaire. La durabilité environnementale est la mieux notée. La durabilité agronomique montre une proportion importante de cas jugés assez faible ou moyenne.

Tableau 2. Comparaisons des notes moyennes de durabilité pour les systèmes de grandes cultures biologiques irrigués ou non irrigués de la région Midi-Pyrénées obtenues avec le modèle MASC-OF.

Table 2. Comparison of the sustainability scores of the irrigated or non-irrigated cropping systems delivered by the MASC-OF model.

Indicateurs	Systèmes irrigués		Systèmes non irrigués		Comparaison des moyennes t-test <i>p</i> .value
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	
Durabilité totale ¹	4.3	0.9	4.8	0.9	0.05
Durabilité économique ¹	4.2	1.3	3.4	1.0	0.03
Durabilité sociale ¹	4.8	1.0	4.9	0.8	0.82
Durabilité agronomique ¹	4.0	0.8	4.7	1.2	0.03
Durabilité environnementale ¹	5.3	1.1	7.0	0.2	0.00
Acceptabilité sociale pour l'agriculteur ²	3.9	1.1	4.6	0.5	0.02
Acceptabilité pour la société ²	2.9	0.5	2.3	0.5	0.00

¹ Indicateurs notés sur une échelle de 1 à 7 (cf. figure 1) ; ² Indicateurs notés sur une échelle de 1 à 5 (cf. figure 1).

durabilité économique est en revanche plus élevée pour les systèmes irrigués. Les notes moyennes relatives à la durabilité sociale globale ne sont pas différentes. Cependant la note moyenne d'acceptabilité sociale pour l'agriculteur est significativement plus élevée pour les systèmes non irrigués que pour les systèmes irrigués. Inversement, la note moyenne d'acceptabilité pour la société est significativement plus élevée pour les systèmes irrigués que pour les systèmes non irrigués.

Indicateurs basiques et liens avec les pratiques culturales

L'examen comparatif des notes moyennes obtenues pour les indicateurs de base, apporte des éléments explicatifs aux observations précédentes portant sur les indicateurs de durabilité.

Dans le domaine économique, les notes moyennes des indicateurs de rentabilité et d'indépendance économique sont significativement plus élevées pour les systèmes irrigués. Cela tient en grande partie à la présence du soja dans ces derniers, culture bien rémunérée sur le marché. Concernant l'acceptabilité pour la société, les notes moyennes des indicateurs de contribution à l'emploi

et de productivité sont significativement plus élevées pour les systèmes irrigués. Dans le domaine de l'acceptabilité sociale pour l'agriculteur, la note moyenne de l'indicateur de difficultés opérationnelles est significativement plus élevée pour les systèmes irrigués, compte tenu d'une pénibilité et d'une complexité de mise en œuvre significativement plus grandes. Le niveau de risque pour la santé de l'agriculteur est identiquement jugé faible pour les deux types de systèmes.

Dans le domaine agronomique, la note moyenne de l'indicateur de qualité de gestion du nutriment azote (degré de satisfaction des besoins des cultures), est nettement plus élevée pour les systèmes irrigués. Cela tient à la plus grande proportion de légumineuses en leur sein. La note moyenne correspondant à l'indicateur de qualité de gestion du phosphore est significativement plus faible pour les systèmes irrigués, du fait de bilans annuels moyens en cet élément plus faibles. La proportion de systèmes ayant reçu une fertilisation phosphatée est faible et identique pour les systèmes irrigués et non irrigués (22 et 25 % respectivement), mais les exportations en phosphore sont plus importantes pour les premiers (les graines de protéagineux sont plus riches en phosphore que celle des céréales). La gestion du potassium ne pose pas de problème,

dans la mesure où les deux types de systèmes ne comportent aucune culture fortement exportatrice (hormis une exception) et les sols sont naturellement bien pourvus en cet élément. La note moyenne de l'indicateur de qualité de gestion de l'état organique du sol est un peu plus élevée dans le cas des systèmes irrigués. Cela tient au fait que les systèmes irrigués sont plus productifs en termes de biomasse de grains récoltés, mais aussi en termes de biomasse résiduelle. La note moyenne de l'indicateur de qualité de gestion de l'état structural du sol est un peu plus faible dans le cas des systèmes irrigués, ces derniers étant implantés surtout en sols de plaines de textures plus limoneuses et plus sensibles au tassement. Les risques de développement d'adventices, tels qu'appréciés par les conseillers à l'aide de leur schéma d'expertise, apparaissent plus importants pour les systèmes irrigués essentiellement du fait d'une faible compétitivité du soja vis-à-vis des adventices. La moindre sensibilité aux bioagresseurs des systèmes non irrigués s'explique en partie par une plus grande diversité culturale et par le caractère moins intensif des cultures. Dans le domaine environnemental, la note moyenne de l'indicateur de préservation de la qualité de l'eau est un peu plus faible pour les

systèmes irrigués, du fait de risques de lixiviation d'azote un peu plus importants. Les agriculteurs ayant eu peu recours aux apports d'engrais phosphatés naturels non renouvelables, les notes moyennes de préservation des ressources en phosphore sont identiques et maximales dans les deux cas. Les notes moyennes des indicateurs de préservation des ressources en énergie et en eau sont nettement plus faibles dans le cas des systèmes irrigués pour des raisons évidentes. La note moyenne de l'indicateur de préservation de la biodiversité cultivée est plus faible pour les systèmes irrigués. Ces derniers comportent 2 à 3 espèces cultivées différentes sur la période de quatre années étudiées, alors que les systèmes non irrigués en comportent généralement 3 ou 4. La note moyenne de l'indicateur de préservation de la biodiversité non cultivée est plus faible pour les systèmes irrigués, du fait d'un nombre d'opérations culturales perturbatrices plus important.

Discussion

L'ordre de difficulté croissante pour satisfaire les objectifs relevant des différents domaines de durabilité, tel qu'il ressort de l'étude pour l'ensemble des systèmes étudiés, est le suivant : *Durabilité environnementale* < *durabilité sociale* << *durabilité agronomique* < *durabilité économique*.

On peut s'interroger sur le caractère général de cet ordre. Dans la littérature internationale il n'existe pas d'étude comparable, par le caractère intégré de l'évaluation à toutes les dimensions de la durabilité, par la nature des systèmes de culture étudiés (sans élevage) et par les échelles temporelle et spatiale considérées. En France, le modèle MASC-OF a été utilisé aussi dans le cadre du projet RotAB (« Peut-on construire des rotations et assolements qui limitent les impacts environnementaux tout en assurant une viabilité économique de l'exploitation? ») du programme CASDAR (compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural ») 2007-2011, piloté par l'Institut technique de l'agriculture biologique (Itab) pour évaluer 23 systèmes de culture biologiques types provenant de cinq autres

régions de France (ITAB, 2011). Certains seuils quantitatifs utilisés étaient différents pour tenir compte de différences régionales (en matière de rendement des cultures par exemple). Les notes moyennes de durabilité sont toutes légèrement supérieures aux notes obtenues sur le jeu de cas de Midi-Pyrénées, mais non significativement différentes (Colomb *et al.*, 2013). Cependant, la hiérarchie des notes obtenues pour les différentes dimensions de la durabilité est identique. Une étude de sensibilité du modèle, conduit avec une méthodologie spécifiquement mise au point pour les modèles hiérarchiques qualitatifs du type MASC (Carpani *et al.*, 2012) a permis d'exclure un biais associé au modèle. Malgré la convergence observée et l'absence de biais, le caractère général de cet ordre de difficulté ne peut être considéré comme inhérent aux systèmes de cultures biologiques spécialisés actuellement conduits en France. Pour les systèmes midi-pyrénéens étudiés, le profil est vraisemblablement fortement lié à la conjoncture économique de l'époque, marquée par des prix des céréales biologiques bas sur les marchés, ainsi qu'à l'impact des années à fort déficit hydrique sur les niveaux de production.

Le poids de l'indicateur de rentabilité vis-à-vis de l'indicateur de durabilité totale est le plus important de tous les indicateurs de base, compte tenu de sa position dans l'arborescence et de son poids relatif vis-à-vis de l'indicateur de durabilité économique. Les diagnostics obtenus par cette évaluation confirment ceux émis par David (2009) concernant la fragilité économique des systèmes de grandes cultures biologiques spécialisés. Plus que la faiblesse des prix des céréales biologiques observée au début de la période d'évaluation considérée (années de récolte 2004 et 2005), le niveau de production apparaît comme le principal facteur explicatif des faibles niveaux de rentabilité et d'indépendance économique présentés par certains des systèmes analysés, irrigués ou non. L'étude confirme aussi les conclusions de David (2009) touchant aux difficultés techniques rencontrées par les agriculteurs pour assurer la fertilité des sols et donc l'obtention de niveaux de production satisfaisants. La faiblesse

du niveau de production dégrade dans le modèle l'indicateur qui lui est consacré dans le domaine social, mais elle dégrade aussi des indicateurs relevant du domaine agronomique (faiblesse des restitutions organiques) et environnemental (diminution de l'efficacité énergétique). Le niveau de production apparaît comme un facteur déterminant de la durabilité des systèmes de grandes cultures.

La *figure 3* suggère toute la difficulté d'améliorer le profil de performance dans sa globalité, car les relations entre indicateurs critiques (dont certains antagonistes) relevant des différents domaines de durabilité y apparaissent fortes. Cependant des marges de manœuvre existent, comme le suggère la comparaison des points relatifs aux systèmes irrigués ou non irrigués, ainsi que la variabilité propre à chacun des deux types de systèmes. Les leviers d'amélioration technique internes aux systèmes (introduction de cultures de niche à forte valeur ajoutée, de cultures associées ou fourragères, de variétés plus rustiques, d'engrais verts ; limitation du travail du sol...) sont à identifier dans leur capacité à améliorer les indicateurs critiques déficitaires dans les deux domaines économique et agronomique, sans dégrader les indicateurs des autres domaines. La présence d'une luzerne pluriannuelle comme précédent ou d'une culture de niche dans 3 des 6 systèmes les mieux notés est à relever. Un constat similaire a été établi dans l'étude menée par l'ITAB (2011). La durabilité des systèmes dépend cependant de facteurs qui leur sont externes. La recherche des solutions doit passer par une analyse complémentaire du réseau de contraintes qui déterminent les pratiques et les conditions de leur réussite.

Conclusion

Le modèle MASC-OF a permis aux conseillers de formaliser leur point de vue sur les modalités d'évaluation de la durabilité des systèmes de culture biologiques et de valoriser leur capacité d'expertise pour l'évaluation des indicateurs, conformément à leurs vœux initiaux. Le modèle paramétré par leurs soins a

démontré sa capacité à discriminer les systèmes de culture analysés, tant au niveau de la plupart des indicateurs de base retenus que des indicateurs agrégés représentatifs des grands domaines de préoccupations.

Les objectifs de durabilité économique apparaissent les plus difficiles à satisfaire. La distinction introduite dans le modèle entre durabilité agronomique et durabilité environnementale a conduit à des diagnostics contrastés en mettant en évidence des préoccupations agronomiques notables à côté de préoccupations environnementales mineures. Les deux domaines de l'économie et de l'agronomie doivent retenir en priorité l'attention des praticiens, de la recherche, et des décideurs publics dans leur projet de soutien au développement de la grande culture biologique.

En termes de perspective, il apparaît indispensable de poursuivre le travail d'analyse de systèmes de grandes cultures biologiques plus diversifiés, spécialisés ou mixtes, dans différents contextes régionaux, et de les comparer à d'autres modes de production. Il conviendrait de progresser dans la compréhension des relations entre les diagnostics issus de la démarche d'évaluation et les caractéristiques des systèmes dans leurs contextes de mise en place. Enfin, il conviendrait de répéter dans le temps de telles démarches afin d'appréhender selon quels leviers et quels schémas de transition les systèmes de grandes cultures biologiques progressent vers des formes plus durables. ■

Remerciements

L'étude a été financée à part égale par l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) et la région Midi-Pyrénées dans le cadre du programme PSDR 3, projet CITODAB (2007-2011). Nous tenons à remercier les évaluateurs du manuscrit pour leurs lectures critiques et leurs suggestions d'amélioration.

Références

Badgley C, Moghtader J, Quintero E, Zakem E, Chappell MJ, Avilés-Vázquez K, *et al.*, 2007. Organic agriculture and the global food supply.

Renewable Agriculture and Food Systems 22 : 86-108.

Bockstaller C, Girardin P, 2008. *Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO*. Colmar : Inra.

Bohanec M, 2011. *DEXi: Program for multi-attribute decision making*. User's manual. Ljubljana (Slovenija) : Institut Joseph Stefan. <http://kt.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>

Carpani, Bergez JE, Monod H, 2012. Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. *Environmental Modelling & Software* (27-28) : 15-22. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.10.002

Carof M, Colomb B, Aveline A, 2012. A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *Agricultural Systems* 115 : 51-62. doi: 10.1016/j.agry.2012.09.011

Colomb B, Glandières A, Carpy-Goulard F, Lecat N, Pelletier A, Prieur L, 2009. Analyse énergétique des systèmes de grandes cultures biologiques. Impact du niveau d'intensification. *Innovations Agronomiques* 4 : 176-81.

Colomb B, Glandières A, Aveline A, M. Carof M, Fontaine L, Craheix D, 2010. *L'évaluation multicritère qualitative des systèmes de grandes cultures. Appropriation du modèle MASC par des conseillers agricoles pour le repérage des systèmes de cultures biologiques innovants*. Colloque SFER « Conseil en agriculture : acteurs, marchés, mutations ». 14 et 15 octobre 2010 – AgroSup Dijon, France. 10 pages. www.sfer.asso.fr/les_colloques2/les_colloques_passes

Colomb B, Fontaine L, Glandières A, Aveline A, Carof M, Celette F, *et al.*, 2011a. *Une approche de la durabilité des systèmes de grandes cultures spécialisés*. Colloque « Transversalités de l'agriculture biologique ». Société française d'économie rurale. MISHA, université de Strasbourg. www.sfer.asso.fr/les_colloques2/les_transversalites_de_l_agriculture_biologique/programme_actes_du_colloque

Colomb B, Aveline A, Carof M, 2011b. *Une évaluation multicritère qualitative de la durabilité des systèmes de grandes cultures biologiques, Quels enseignements ? Restitution des programmes RotAB et CITODAB*. Document d'analyse PSDR3 Midi-Pyrénées-Projet CITODAB et CASDAR RotAB. www6.inra.fr/psdr-midi-pyrenees/VALORISATION/OFSAT

Colomb B, 2012. *La mise au point d'un modèle d'évaluation multicritère qualitatif de systèmes de culture. Calibrage par les utilisateurs finaux avant mise en application*. Document d'analyse PSDR3 Midi-Pyrénées, Projet CITODAB. www6.inra.fr/psdr-midi-pyrenees/VALORISATION/OFSAT

Colomb B, Gafsi M, 2012. *Le développement de l'agriculture biologique en Midi-Pyrénées. Les diagnostics du projet CITODAB*. Projet PSDR 3 Midi-Pyrénées. Les 4 pages PSDR3. www6.inra.fr/psdr-midi-pyrenees/VALORISATION/4-Pages-Focus-PSDR

Colomb B, Carof M, Aveline A, Bergez JEB, 2013. Stockless organic farming : strengths and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model. *Agronomy for Sustainable Development* 33 : 593-608. doi: 10.1007/s13593-012-0126-5

David C, 2009. Grandes cultures biologiques, des systèmes en équilibre instable. In : Lamine C, Bellon S, eds. *Transitions vers l'agriculture biologique*. Versailles ; Dijon : éditions Quæ ; Educagri éditions.

Faure G, Compagnone C, 2011. Les transformations du conseil face à une nouvelle agriculture. *Cahiers Agricoles* 20 : 321-6. doi: 10.1684/agr.2011.0523

ITAB, 2011. Rotations en grandes cultures biologiques sans élevage. 8 fermes-types, 11 rotations. Repères agronomiques, économiques, techniques et environnementaux. Rapport d'étude du programme CASDAR n°70 55 RotAB. Paris : Itab. www.itab.asso.fr

Johnson S, Toensmeier E, 2009. *Crop rotation on organic farms : a planning manual*. Ithaca (NY, USA) : Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES).

Kirchmann H, Bergström L, Kätterer T, Andrén O, Andersson R, 2008. Can organic crop production feed the world? In : Kirchmann K, Bergstrom L, eds. *Organic crop production : ambitions and limitations*. Dordrecht (The Netherlands) : Springer.

Kropff MJ, Bouma J, Jones JW, 2001. Systems approaches for the design of sustainable agroecosystems. *Agricultural Systems* 70 : 369-93.

Meynard JM, 2008. Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. In : Reau R, Doré T, eds. *Systèmes de culture innovants et durables*. Transversales. Dijon : Educagri éditions.

Meynard JM, Doré T, Habib R, 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 87 : 223-36.

Mohler CL, 2009. The role of crop rotation in weed management. In : Mohler CL, Johnson SE, eds. *Crop rotation on organic farms : a planning manual*. Ithaca (NY, USA) : Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES).

Prost L, Beguin P, Cerf M, Guichard L, Jeuffroy MH, Reau R, 2009. *Designing new sustainable cropping systems : a method combining the participation of various stakeholders and the use of assessment tools. Methodologies for integrated analysis of farm production systems*. Farming Systems Design, August 23-26, Monterey, CA.

Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, Guichard L, Reau R, *et al.*, 2008. *Ex ante* assessment of the sustainability of alternative cropping systems : implications for using multicriteria decision aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28 : 163-74.

Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, Guichard L, Reau R, *et al.*, 2009. MASC : a qualitative multi attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29 : 447-61.

Vereijken P, 1997. A methodological way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7 : 235-50.

Wijnands FG, 1999. Crop rotation in organic farming : theory and practice. In : Olesen JE, Eltun R, Gooding MJ, Jensen E, Köpke U, eds. *Designing and testing crop rotations for organic farming*. Tjele (Denmark) : Danish Research Centre for Organic Farming.