Décembre 2012
volume n°2 / numéro n°2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

Assolements et gestion quantitative de l'eau

de l'exploitation agricole au territoire

Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes. L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Agronomie Environnement & Sociétés //volume 2 numéro 2 - décembre 2012

Article

Assolement dans les exploitations de grande culture irriguées : modélisation des décisions des agriculteurs

Cropping-plan in irrigation crop farms: modelling the farmer's decision-making process

Jérôme DURY [1*], Jacques Eric BERGEZ [2]

[1] FlyingSheep, 11, rue Barbes - 36200 Argenton-sur-Creuse France - E-mail : [*] jerome.dury@flyingsheep.fr*
[2] INRA, UMR 1248 AGIR - 31326 Castanet-Tolosan - France E-mail : jacques-eric.bergez@toulouse.inra.fr

Résumé

Dans cet article, nous proposons une modélisation des processus de décision d'assolement dans les exploitations de grandes cultures irriguées. Notre démarche d'analyse et de modélisation du processus de décision combine une approche dite inductive, c'est à dire basée sur l'analyse de cas d'étude et permettant la construction d'une représentation plutôt que la validation d'une hypothèse, et une approche experte de généralisation de ces cas s'appuyant sur un travail d'analyse ontologique, c'est-à-dire une spécification formelle des concepts et des relations entre ces concepts dans un domaine particulier. Le travail de formalisation nous a permis de rendre opérationnels dans un modèle informatique les concepts utilisés par les agriculteurs pour représenter les différentes dimensions du processus de décision. Sur cette base, nous avons développé le cadre de modélisation CRASH couplant les processus biophysiques (modèle de culture) et les processus de gestion (modèle de décision). Ce travail ouvre de nouvelles perspectives pour le développement d'outils d'aide à la décision d'assolement.

Mots-clés

Assolement, processus de décision, modélisation, grande culture, irrigation.

Abstract

In this paper, we present an innovative modelling approach of the cropping-plan decision-making process of farmers in irrigating crop farms. We developed a methodology that combines an inductive approach, i.e. building models based on case-studies, and an expert approach based on an ontological analysis to generalise case studies. Our modelling approach enabled to build a decision-model based on generic and formal concepts that are operational in computer models to represent the cropping-plan decision-making process of farmers. On this basis, we developed a simulation-based modelling framework CRASH to simulate and analyse cropping-plan decision-making of farmers. CRASH is a set of integrated tools providing utilities to explore different farmers' management strategies to select their cropping-plan. This work opens new perspectives in the development of decision support tools addressing the issues of cropping-plan choices.

Introduction

Les choix d'assolement, c'est-à-dire le choix et l'attribution des cultures aux différentes parcelles de l'exploitation agricole (Aubry *et al.*, 1998; Wijnands, 1999), ont été identifiés comme des leviers importants à mobiliser dans les stratégies d'adaptation des agriculteurs irrigants en vue d'une meilleure gestion quantitative de l'eau (Amigues *et al.*, 2006). Ces choix sont le résultat de processus de décision complexes mis en œuvre par l'agriculteur et opèrent à plusieurs niveaux de la gestion d'une exploitation agricole. Ils interviennent aux niveaux stratégiques, parce qu'ils structurent la constitution et l'allocation dans l'espace des systèmes de culture (Aubry *et al.*, 1998), mais aussi tactiques, parce qu'ils offrent des opportunités d'adaptation en réponse aux variations de contextes. Ces choix nécessitent la prise en considération par l'agriculteur d'un ensemble hétérogène de contraintes et d'objectifs couvrant des dimensions socio-économiques, agronomiques et environnementales de l'exploitation agricole et de son contexte (Nevo *et al.*, 1994).

Il existe de nombreux travaux présentant des modèles de choix d'assolement à l'échelle de l'exploitation (Dury *et al.*, 2011). D'importants efforts ont été faits pour identifier et intégrer les nombreuses contraintes liées aux ressources internes (ressources en matériel, financières, cognitives …) et aux contraintes externes à l'exploitation agricole (climat, contexte économique et réglementaire) qui influencent les décisions d'assolement. Malgré la grande diversité des travaux, ils s'accordent assez largement pour modéliser les décisions d'assolement à travers les deux concepts de sole (ex. McCarl *et al.*, 1977 ; Leroy et Jacquin, 1991 ; Sarker et Ray, 2009) et de rotation (ex. Dogliotti *et al.*, 2003 ; Bachinger et Zander, 2007). Ces deux concepts représentent deux échelles de temps, respectivement annuelle et pluriannuelle, de la décision d'assolement. Peu de travaux prennent en considération ces deux échelles de temps conjointement avec la

dimension spatiale. Le problème de choix d'assolement est en effet souvent formalisé comme un problème statique et déterministe d'allocation de ressources. Ces approches de modélisation dites normatives ont principalement été utilisées pour l'exploration de solutions alternatives (Rossing *et al.*, 1997 ; Dogliotti *et al.*, 2005). Dans ces approches, la dynamique des processus de décision n'est pas modélisée (Aubry *et al.*, 1998), bien qu'elle constitue un aspect important de la décision (Cox, 1996 ; Garcia *et al.*, 2005).

Ohlmer *et al.* (1998) ont montré la nécessité d'utiliser un nouveau cadre de modélisation basé sur les processus de raisonnement du décideur plutôt que sur une approche normative seule. Notre approche s'appuie sur le cadre théorique naturaliste qui permet l'analyse de processus de décision en situation réelle (Klein, 1993). Cette théorie postule que le contexte dans lequel agit le décideur, et surtout la représentation qu'il s'en fait, sont des éléments cruciaux de la décision. Il ne s'agit pas de construire un modèle *a priori* de la décision, mais plutôt d'étudier comment les décideurs se comportent en situation et de modéliser ce comportement. Ce cadre théorique permet de formaliser le choix d'assolement comme un processus dynamique combinant des décisions stratégiques et adaptatives dans un environnement incertain et changeant (Norling *et al.*, 2001).

L'objectif de cet article est de présenter notre démarche de modélisation dans son ensemble afin d'alimenter une réflexion plus générale sur les modèles de décision d'assolement. Dans la section « Matériels et méthodes », nous présentons la méthodologie et les outils que nous avons mobilisés pour modéliser les processus de décision d'assolement. La partie « Résultats » comporte deux sous parties. Dans la première, nous présentons sur la base des enquêtes, les principaux concepts qui nous ont permis de formaliser le processus de décision. Dans la seconde, nous présentons les grandes lignes du cadre de modélisation de CRASH (*Crop Rotation and Allocation Simulator using Heuristic*).

Matériels et méthodes

Cadre général de modélisation de la décision

Pour structurer notre démarche de modélisation des décisions, nous utilisons le cadre de modélisation BDI (*Belief*, *Desire*, *Intention*) (Bratman, 1987). Ce cadre fournit une architecture de modèle de décision fondée sur la rationalité procédurale (Simon, 1976) et cohérente avec la théorie de la décision naturaliste (Norling *et al.*, 2001). BDI procure aux modélisateurs un cadre pour intégrer les représentations des agents tout en les distinguant des décisions et des objectifs (Becu *et al.*, 2003). Le cadre BDI a trois composants principaux :

- croyance (*Belief*) : représentations des connaissances que l'agent mobilise pour prendre ses décisions. Les connaissances de l'agent sont dynamiques.
- désir (*Desire*) : objectifs que l'agent cherche à atteindre ou motivations qui l'animent et qui par conséquent dirigent la décision.
- intention (*Intention*) : décisions d'actions prises par l'agent à un moment donné. Les intentions sont représentées sous forme de plans d'actions régis par des règles de décisions.

Démarche générale de modélisation

Nous proposons une approche basée sur une analyse et une modélisation du processus décisionnel par le biais d'enquêtes en exploitation (Fig. 1).

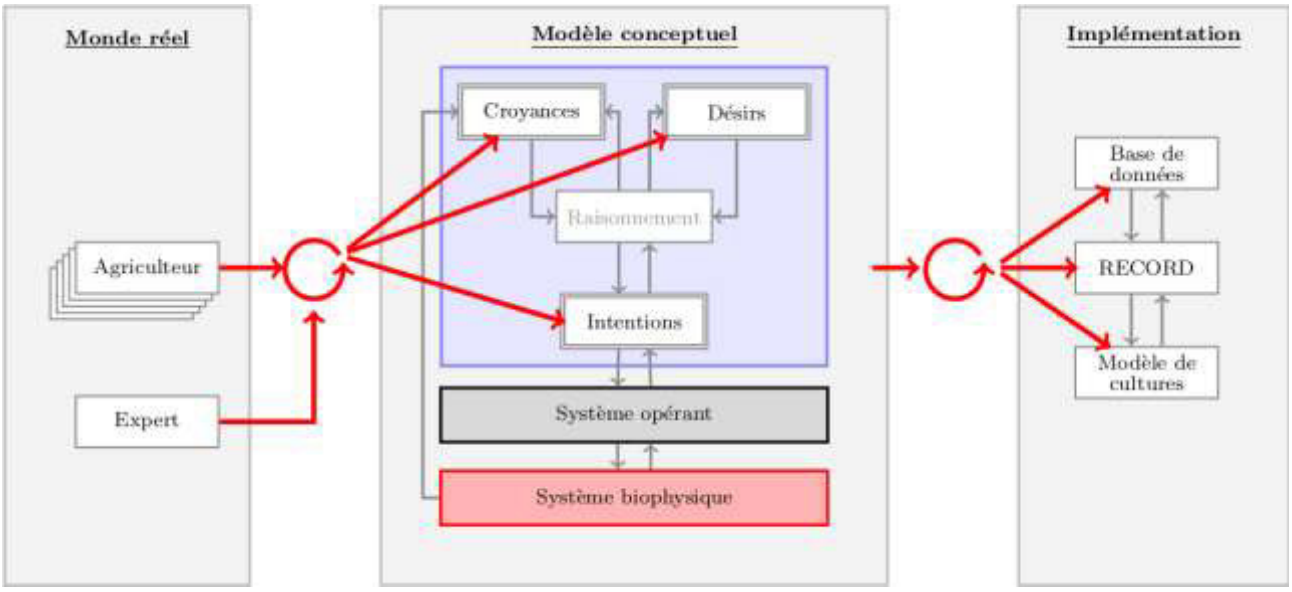


Figure 1: De l'enquête au modèle : démarche générale de modélisation du processus de décision mise en œuvre pour le développement du cadre de modélisation CRASH.

Figure 1: From field to model: general modelling approach of the cropping-plan decision-making that we followed to develop the CRASH modelling framework.

Le passage de l'analyse du monde réel au modèle conceptuel combine une approche inductive, c'est-à-dire basée sur l'analyse de cas d'étude et permettant la construction d'une représentation plutôt que la validation d'une hypothèse (Eisenhardt, 1989), et une approche experte de généralisation de ces cas s'appuyant sur un travail d'analyse ontologique, c'est-à-dire une spécification formelle des concepts et des relations entre ces concepts dans un domaine particulier (Beck *et al.*, 2010). La structure du modèle conceptuel est basée sur la description faite par Martin-Clouaire et Rellier (2009) et Le Gal *et al.* (2010) d'un système agricole divisé en trois sous-systèmes : l'agent, le système opérant ou système technique et le système biophysique. Le modèle conceptuel de l'agent est structuré suivant l'architecture BDI décrite Fig. 1 à travers ses trois composants. Notre méthodologie comporte cinq étapes principales :

1) *Définition du problème de décision* : cette étape permet de spécifier le type de décision étudié et un cadre analytique, c'est à dire une vision *a priori* du problème de décision.

2) *Sélection des cas d'étude* : nous avons utilisé la méthode d'échantillonnage théorique (Glaser et Strauss, 1967). L'échantillonnage dans la population cible est motivé par la recherche de diversité plutôt que de représentativité. Le but n'est pas de produire des données statistiques portant sur l'ensemble des observations, mais plutôt de fournir une compréhension approfondie d'une grande diversité de cas études (Eisenhardt, 1989). Cette étape définit ainsi le domaine de validité du modèle : les exploitations de grandes cultures irriguées.

3) *Analyse individuelle des cas* : cette étape se décompose en deux phases. Pour l'acquisition des connaissances, nous avons utilisé une méthode d'enquête qui repose sur l'explicitation des processus et des connaissances (Hollnagel, 2003). Notre méthode d'enquête nécessite l'analyse du contexte de décision et l'analyse rétroactive par le décideur de ses propres décisions (Hoffman et Lintern, 2006). Ainsi, au cours de l'enquête, nous avons établi avec chaque agriculteur un schéma pour décrire son processus de décision. L'analyse rétroactive est un questionnement de ce schéma avec l'agriculteur au regard de ses décisions passées. Ensuite, pour compléter ce schéma nous avons évoqué des scénarios prospectifs afin d'évoquer des situations extrêmes. La deuxième étape est la transcription des données d'enquête en modèles conceptuels individuels. Ces modèles permettent de représenter sous forme de diagrammes le modèle de décision de chaque agriculteur.

4) *Conception du modèle conceptuel de décision* : le développement du modèle conceptuel de décision repose sur un processus itératif de généralisation. Durant ce processus, les modélisateurs intègrent un à un les schémas individuels issus des cas d'étude tout en requestionnant sans cesse le modèle en cours de conception. Le modèle conceptuel de décision émerge alors du processus d'analyse lui-même (Eisenhardt, 1989). Nous avons enrichi cette approche inductive (bottom-up) par une approche experte (top-down). L'approche experte a mobilisé des agronomes modélisateurs (n=6) pour formaliser certains concepts identifiés dans les cas d'étude qui étaient difficiles à appréhender de manière formelle. En effet, certaines notions communément utilisées par les agriculteurs et/ou les agronomes ont plusieurs acceptions, et peuvent ainsi être à l'origine de confusions (ex : rotation, succession de cultures, séquence de cultures) ; il s'agissait ici de clarifier les définitions et les limites de chacun de ces concepts. La formalisation s'est faite sur la base d'une analyse ontologique de ces concepts.

5) *Implémentation du modèle* : L'implémentation du modèle conceptuel a été faite sur la plateforme informatique RECORD-VLE (Quesnel *et al.*, 2009; Bergez *et al.*, 2012).

Résultats

Présentation de l'échantillon

Nous avons conduit des entretiens semi-directifs auprès de 28 agriculteurs irrigants en grande culture dans trois régions : Centre (n=10), Poitou-Charentes (n=9) et Midi-Pyrénées (n=9). L'échantillon représente une grande diversité d'exploitations dans les trois régions enquêtées au sein de la population cible (Tab. 1).

Région	Parcellaire		Cultures		Irrigation	
	Surface	Parcelles	Nombre	Indice de diversité	Surface irrigable /SAU	Surface irriguée /SAU
	(ha/EA)	(nb/EA)	(nb/EA)	(Indice de Simpson)	(%/EA)	(%/EA)
Ce (n=10)	168 (50)	28 (13)	9.6 (3.3)	0.75 (0.09)	87 (16)	34 (26)
MiPy (n=9)	125 (107)	27 (13)	4.8 (2.0)	0.56 (0.24)	79 (19)	64 (25)
Pch (n=9)	191 (106)	36 (20)	5.6 (1.5)	0.71 (0.13)	57 (23)	37 (17)
Toutes	161 (91)	31 (15)	6.7 (1.9)	0.70 (0.15)	74 (19)	45 (23)

EA : exploitation agricole

Indice de Simpson : $D = 1 - \sum_i^s p_i^2$. La valeur de l'index est comprise entre 0 et 1, plus grande est la valeur plus grande est la diversité de culture. p_i est le rapport de la surface de la i^e culture sur la surface total par EA.

Tableau 1 : Valeurs moyennes par région de variables-clés décrivant l'échantillon des exploitations enquêtées (Entre parenthèse : écart type, Ce : Centre, MiPy : Midi-Pyrénées, Pch : Poitou-Charentes, nb : nombre).

Table 1: Regional mean values of some key-variables describing the surveyed farm sample. (In bracket : standard deviation, Ce : Centre, MiPy : Midi-Pyrénées, Pch : Poitou-charentes, nb : number).

La surface moyenne des exploitations est de 161 ha et recouvre une grande hétérogénéité, la plus petite faisant 30 ha et la plus grande 400 ha. Les cultures principales et leurs surfaces sont, en moyenne, le blé tendre (23% des surfaces), le maïs (19%), le colza (11%), le blé dur (9%) et la jachère (7%). En moyenne, 6.7 cultures sont cultivées chaque année sur les exploitations, mais là encore il existe de fortes différences entre exploitations et entre régions.

Le processus de décision

Dans un premier temps, nous avons distingué les décisions stratégiques qui se construisent sur des échelles de temps supérieures à la campagne, et les décisions tactiques qui se prennent juste avant et/ou pendant la campagne (Boiffin *et al.*, 2001).

Ces deux niveaux de décision nous ont permis d'identifier les stratégies d'anticipation mises en place par les agriculteurs. De façon transversale, nous avons identifié deux types distincts de décisions : les décisions de planification et les décisions d'adaptation d'assolement (Fig. 2)

(Bergez *et al.*, 2004). Les décisions de planification font référence aux processus de conception de tout ou partie de l'assolement, alors que les décisions d'adaptations font référence aux ajustements du plan. Ces deux types de décisions varient d'un agriculteur à un autre et ne mobilisent pas nécessairement les mêmes connaissances.

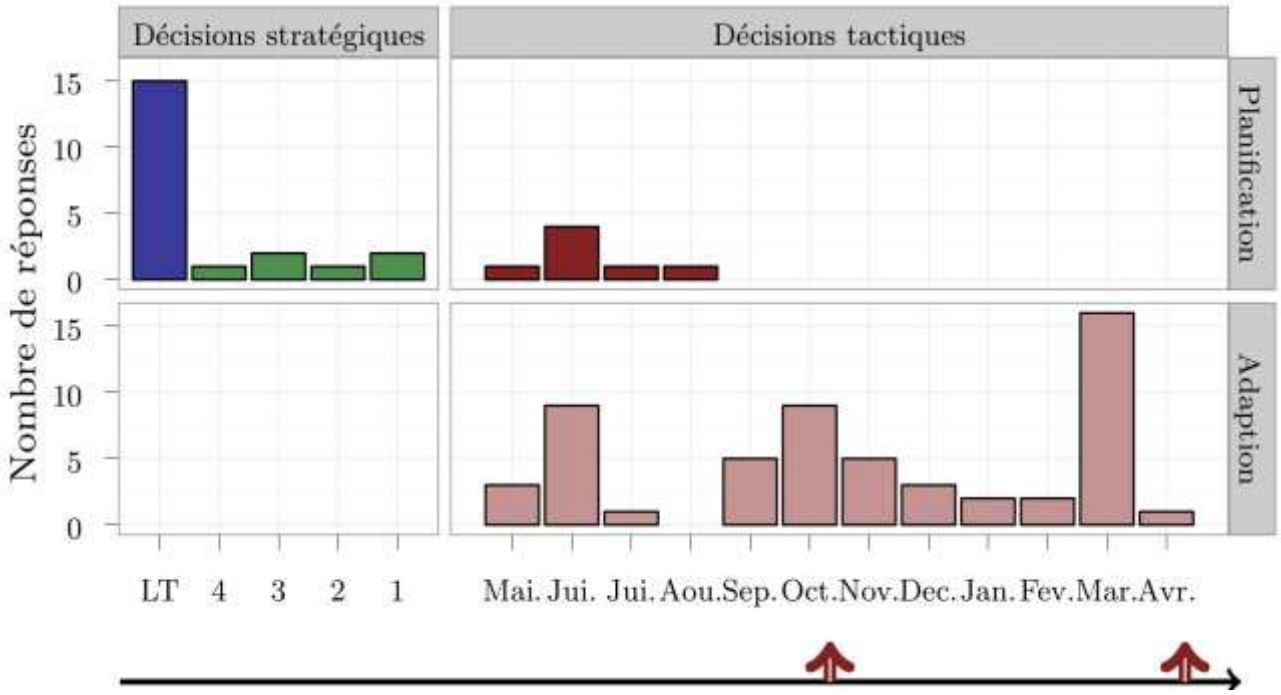


Figure 2: Temporalité des décisions dans le processus de décision d'assolement.
Cette figure est obtenue par synthèse des diagrammes UML de chacun des agriculteurs. Les décisions sont séparées entre les décisions stratégiques et les décisions tactiques, et transversalement entre les décisions de planification et d'adaptation (LT : long terme, 4-1 : nombre d'années d'anticipation, Les flèches rouges correspondent aux périodes de semis).

Figure 2: Cropping-plan decision-making dynamic.
The figure is synthesis of all individual decision-making process represented as UML activity diagrams. Decisions are split into strategic and tactical decisions, and transversally into planning and adaptation decision (LT: long term, 4-1: number of years of anticipation red arrows represent the sowing periods).

Décisions stratégiques

Au niveau stratégique, l'analyse des cas d'étude nous a montré que les choix d'assolement se confondent avec la constitution des systèmes de culture. C'est-à-dire que les choix des cultures et de leur d'allocation sur les parcelles ne sont pas dissociés des choix de successions de cultures (Fig. 3) :

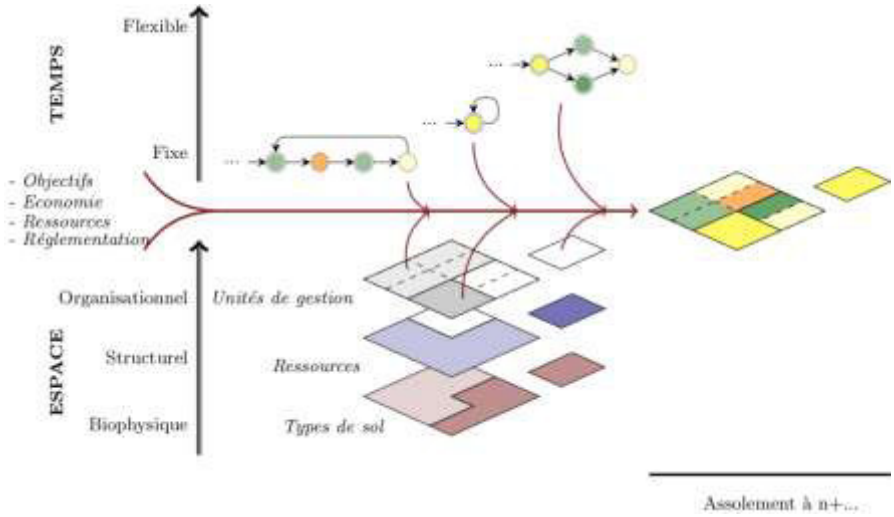


Figure 3 : Représentation de la décision stratégique d'assolement.

L'utilisation conjointe des concepts de schéma de successions et d'unité de gestion permet de représenter les dimensions temporelle et spatiale mises en jeu lors du processus de décision. Ces concepts permettent d'intégrer de façon structurée l'ensemble des contraintes (économie, ressources, réglementation) et les caractéristiques spatiales du parcellaire (niveaux biophysique, structurel et organisationnel) qui influencent la constitution des systèmes de culture.

Figure 3: Scheme that represents the strategic cropping-plan decision-making process.

The concepts of « crop succession pattern » and « management unit » allow to jointly represent the temporal and spatial dimensions of the cropping decision-making process. By using these two concepts, we can integrate in a structured representation the many constraints (economy, resources, regulation) and the spatial farmland features (biophysical, structural and management unit levels) that drive the crop management system design.

Dimension temporelle **:** Sur la base des enquêtes, nous avons formalisé l'ensemble des stratégies de planification des systèmes de culture des agriculteurs en un concept unique: le schéma de successions. Ce concept permet de décrire en une représentation unique et formelle, un graphe orienté, les différentes stratégies de planification des successions de cultures mises en œuvre par les agriculteurs sur leurs parcelles. Cette représentation permet d'intégrer les concepts de succession de culture, rotation, séquence de culture, monoculture couramment utilisés par les agriculteurs et les agronomes. De plus, il permet de représenter des schémas de planification complexes qui font intervenir plusieurs niveaux de flexibilité (Tab. 2) comme nous les avons rencontrés chez certains agriculteurs.

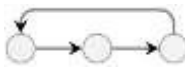
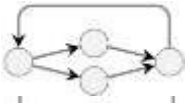
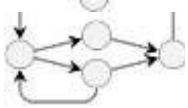
Catégorie	**Nom**	**Caractéristiques**			**Schéma**
		Flexibilité	**Cyclicité**	**Longueur**	
séquence de culture	séquence simple	fixe	non	>=2	
	séquence flexible	flexible	non	>=2	
	séquence non anticipée	flexible	non	1	
Rotation cadre	rotation simple	fixe	oui	>=2	
	rotation flexible	flexible	oui	>=2	
	rotation très flexible	flexible	oui	variable	
monoculture	monoculture	fixe	oui	1	

Tableau 1 : Typologie des schémas de successions de cultures réalisée à partir des enquêtes.

Le *schéma de successions* se définit « *comme l'ensemble des successions de cultures mises en œuvre ou planifiées pour un système de culture* ». Les séquences de cultures (Leteinturier *et al.*, 2006) et les rotations de cultures (Castellazzi *et al.*, 2008) sont des

schémas de successions particuliers. Dans le tableau, nous utilisons le terme de rotation-cadre (Aubry et Dounias-Michel, 2006) pour rotations parce que nous faisons référence à des schémas de planification. Les successions de cultures sont représentées par les flèches noires dans la colonne « schéma ».

Table 2: Typology of the crop succession pattern that derives from the survey.

The crop succession pattern is defined as « a set of crop successions used or planned for a particular crop management system ». Crop sequence (Leteinturier et al., 2006) and crop rotations (Castellazzi et al., 2008) are particular crop succession patterns. In the table, we use the term « rotation-cadre » (Aubry et Dounias-Michel, 2006) instead of crop rotation to refer to planning crop rotation. Crop successions are represented by black arrows in schemes in the last column.

Dimension spatiale : Nous avons formalisé l'organisation de l'espace cultivé de l'exploitation agricole en trois niveaux distincts (Fig. 3) :

1) Le niveau biophysique concerne les caractéristiques du sol, la distribution spatiale et les formes des différents îlots. Ces caractéristiques sont peu susceptibles d'évoluer sur le court et le moyen terme. Nous les avons considérées comme des contraintes fixes pour les décisions d'assolement.

2) Le niveau structurel concerne les équipements que les agriculteurs sont susceptibles de modifier lors de changements stratégiques importants. Par exemple, les réseaux d'irrigation, les points d'accès à l'eau sont des investissements importants qui conditionnent notamment la délimitation de la sole irrigable. Nous les avons considérés comme stables pour les décisions d'assolement. Nous n'avons en effet pas étudié les changements structurels.

3) Le niveau organisationnel représente le niveau privilégié de décision d'assolement. Nous avons formalisé l'organisation que font les agriculteurs de leurs parcellaires à travers le concept d'unité de gestion. Concernant notre échantillon, nous avons identifié trois niveaux d'unités de gestion importants pour la décision d'assolement : le système de culture, la parcelle, et le bloc d'irrigation. Le système de culture est toujours associé à un schéma de succession de cultures. Au niveau de la parcelle, l'agriculteur décide de l'allocation de chaque culture et avec un itinéraire technique. Enfin, le bloc d'irrigation permet l'allocation du matériel d'irrigation et l'organisation de la campagne d'irrigation.

Décisions tactiques

Au niveau tactique, les choix d'assolement correspondent soit à une planification à court terme, c'est-à-dire l'année précédant le semis (en haut à droite Fig. 2), soit à des ajustements du plan préalablement établi (en bas à droite Fig. 2). Les décisions de planification à court terme peuvent concerner tout ou partie de l'assolement sur une exploitation. Pour illustration, les stratégies de planification à court terme représentent une part non négligeable des surfaces cultivées dans notre échantillon. Ainsi, nous avons identifié qu'en moyenne 23% des surfaces par exploitation dans la région Centre, 21% en Midi-Pyrénées et moins de 2% en Poitou-Charentes sont liés à des stratégies de planification de court terme. Les raisons qui motivent les ajustements du plan d'assolement ont été identifiées par l'analyse des schémas individuels de décision (Fig. 4). Ces décisions d'adaptations se font de façon privilégiée à l'échelle de la parcelle, il n'y a pas à ce niveau de remise en cause des systèmes de culture. À ce niveau, les choix se font en contradiction avec les règles de constitution des systèmes de culture mobilisées au niveau stratégique. En effet, ces décisions répondent à d'autres logiques (ex : opportunités de marché). Elles sont souvent motivées par des événements peu prévisibles et sont plus ou moins liées à des décisions antérieures (Fig. 4).

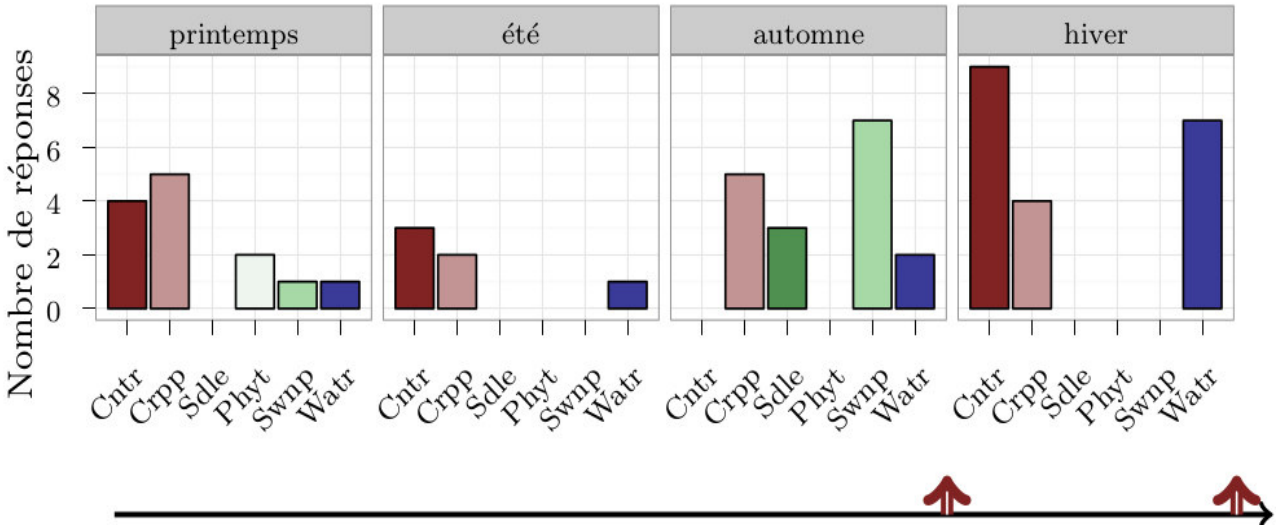


Figure 4 : Raisons qui motivent les agriculteurs à modifier leurs stratégies d'assolement en cours de campagne.
En ordonnées, le nombre de réponses correspond au nombre de fois qu'ont été mentionnées ces raisons lors de la description par les agriculteurs de leur processus de décision (Cntr : contrats, Crpp : prix des cultures, Sdle : problèmes de levée des cultures, Phyt : problèmes phytosanitaires, Swnp : conditions de semis, Watr : disponibilité de la ressource en eau, Les flèches rouges correspondent aux périodes de semis).
Figure 4: Reasons that motivate changes from planned cropping-plan during the year, and timing at which those changes occur. Values indicate the number of time the factor was mentioned by farmers while describing their decision-making processes (Cntr : contracts, Crpp : crop prices, Sdle : seed emergence issues, Phyt : field state, weed and pest issues, Swnp : sowing possibility, Watr : availability of water for the irrigation).

Après avoir identifié les raisons qui motivent des adaptations du plan d'assolement, nous avons étudié les conséquences de ces changements sur l'agencement spatial des unités de gestion. Les décisions d'adaptations peuvent se traduire différemment selon les cas :

- Substitution de culture : cela correspond à l'échange d'une culture par une autre sans affection des limites des unités de gestion. Ces changements sont soit anticipés par les agriculteurs dans le cadre de schémas de successions flexibles, soit subis lors de changements de contexte.
- Modification des unités de gestion : nous avons distingué deux types d'ajustement. Un ajustement de la taille des parcelles au sein d'un même système de culture et un ajustement entre des parcelles n'appartenant pas aux mêmes systèmes de culture. Les ajustements sont utilisés pour adapter la taille des soles à la disponibilité des ressources (eau d'irrigation) et/ou aux variations de prix des récoltes.

- Une combinaison des deux : parfois, l'introduction de nouvelles cultures nécessite de créer de nouvelles parcelles hors de tous systèmes de culture préalablement établis. Cela est souvent justifié par l'introduction de cultures à forte valeur ajoutée pour répondre à des opportunités de marché.

Présentation de CRASH

Dans cette partie nous présentons les grandes lignes du cadre de modélisation CRASH (« *Crop Rotation and Allocation Simulator using Heuristics* »). Le modèle conceptuel de CRASH couvre les principales dimensions du processus de décision d'assolement que nous avons identifiées lors du travail d'enquête et de formalisation.

Architecture de CRASH

CRASH est un ensemble de composants logiciels intégrés offrant différents utilitaires pour planifier, simuler et analyser les décisions d'assolement à l'échelle de l'exploitation agricole (Fig. 5).

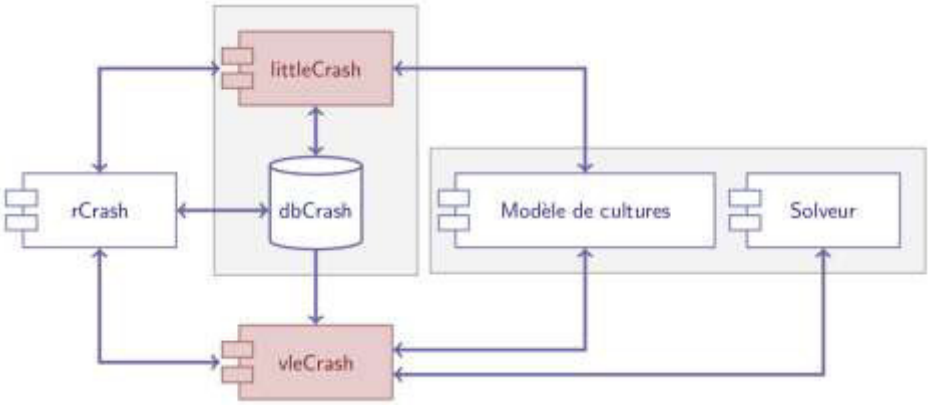


Figure 5 : Architecture modulaire du cadre de modélisation CRASH.

VleCrash est le simulateur des décisions d'assolement à l'échelle de l'exploitation, littleCrash un simulateur d'itinéraires techniques à l'échelle de la parcelle, dbCrash est la base de données spatialisées stockant les données d'entrée du modèle et rCrash permet de piloter les simulateurs.

Figure 5: Modular software architecture of the CRASH modelling framework.

VleCrash is a farm scale cropping-plan decision-making simulator, littleCrash is a plot scale crop management simulator, dbCrash the input/output database and rCrash a set of R function used to run the two simulators, analyse and plot outputs.

Le composant logiciel principal, vleCrash, est un simulateur des décisions d'assolement spatialement explicite à l'échelle de l'exploitation. vleCrash est un ensemble de modèles couplés intégrant le modèle de cultures STICS (Brisson et al., 2003) et un algorithme de résolution de problème par satisfaction de contraintes (Bouveret et al., 2005). vleCrash est relié à une base de données, dbCrash, qui fournit les données d'entrée nécessaires pour les simulations. LittleCrash est un modèle de simulation bio-décisionnel (coulage d'un modèle de conduite de culture avec STICS) à l'échelle de la parcelle utilisé pour simuler les rendements des cultures et leur consommation en ressources en fonction du type de sol, du climat et de l'itinéraire technique. LittleCrash permet de générer une partie des données d'entrée (Croyance de l'agent) du modèle principal. Pour piloter les simulations et analyser les sorties des simulateurs, nous avons développé un ensemble de fonctions R (R Development Core Team, 2011), nommé rCrash.

Le simulateur de décisions d'assolement :

Pour développer le modèle principal de CRASH, nous nous sommes appuyés sur la représentation des connaissances mobilisées par les agriculteurs (Fig. 6) et sur une représentation explicite du processus de décision (Fig. 7).

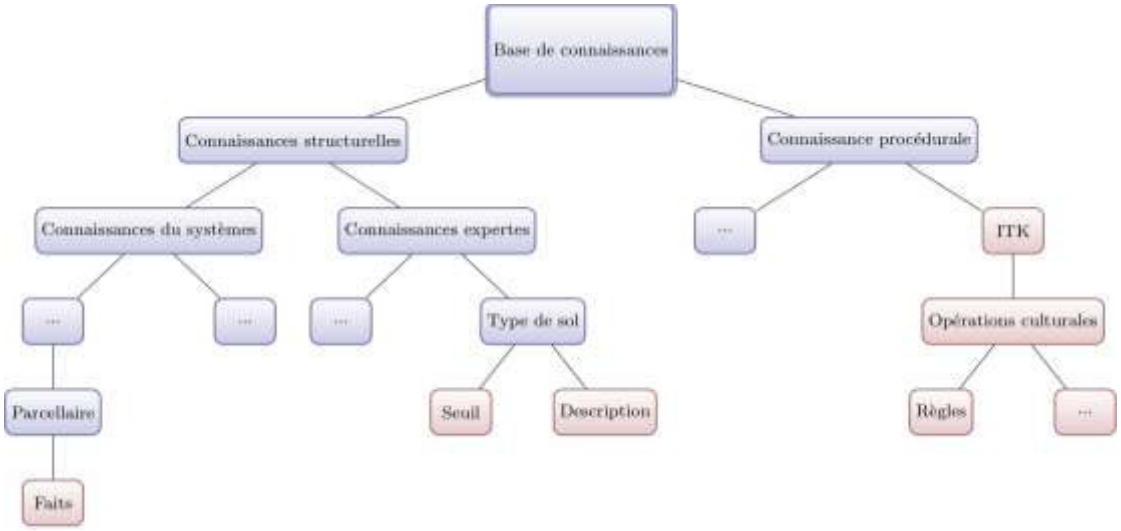


Figure 6 : Base de connaissances de l'agent (Croyance)

La structure hiérarchique de la base de connaissances (boîtes bleues) permet d'organiser les différents types de connaissances mis en jeu dans le processus de décision d'assolement. Les boîtes rouges sont des exemples à valeur illustrative de connaissances. Les faits correspondent aux variables dynamiques observées par l'agent, les seuils sont des seuils utilisés pour les prédicats qui constituent les décisions.

Figure 6: Knowledge base (Beliefs) of the agent (farmer)

Hierarchical structure of concepts (blue boxes) representing the knowledge of the agent used to make cropping-plan decisions. The red boxes are illustrations of specific knowledge. Facts are dynamic states that are observed by the agent, thresholds are indicators used into predicates that constitute atomic decisions.

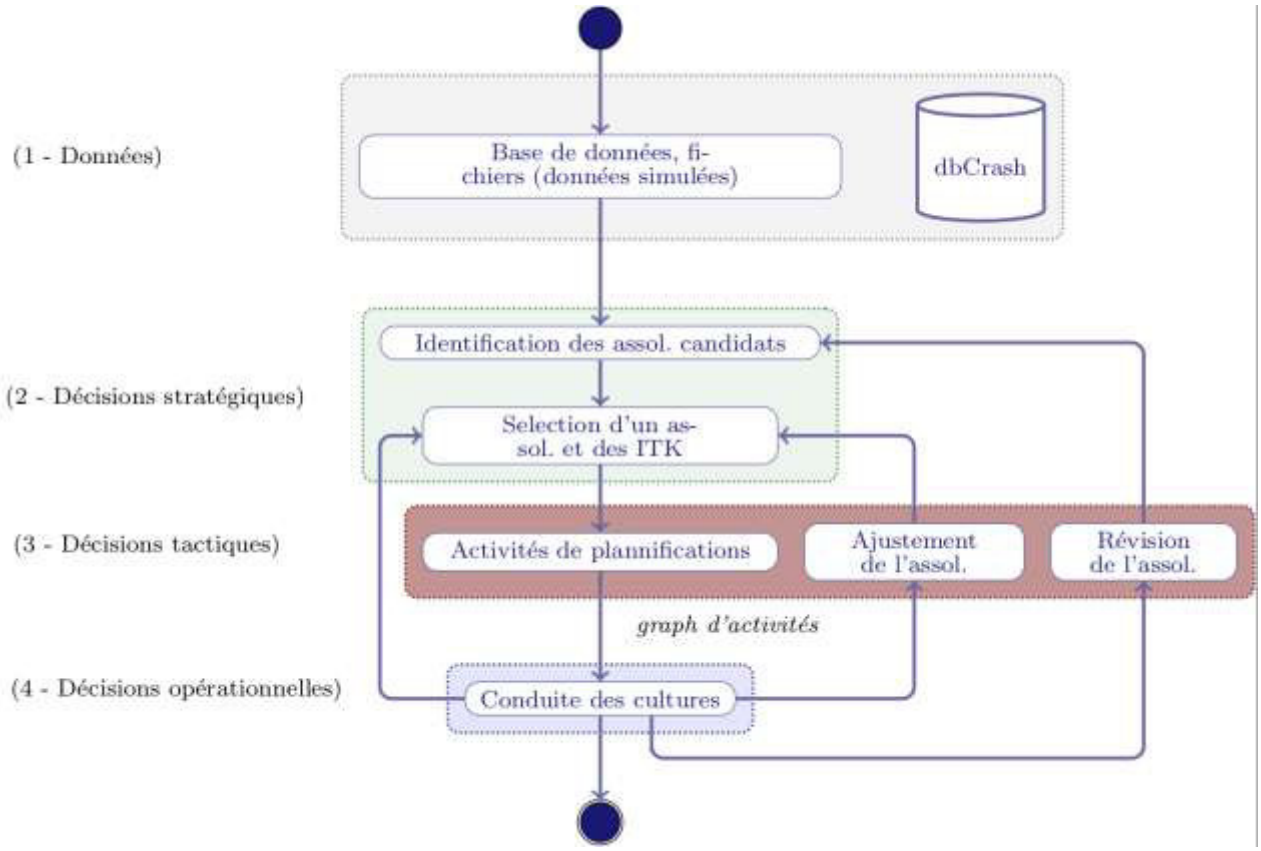


Figure 7 : Diagramme d'activité représentant les principales étapes de la résolution de problème qui implémentent le processus de décision d'assolement dans le modèle CRASH (assol : assolement, ITK : itinéraire technique).

Figure 7: Activity diagram that depicts the main steps of the sequence of problem solving implementing the cropping-plan decision-making processes into the CRASH modelling framework (assol: cropping-plan, ITK: crop management techniques).

Les grandes étapes de simulation sont :

1) Les données d'entrée du simulateur permettent d'initialiser la base de connaissances de l'agent (Croyance de l'agent). Ces connaissances sont organisées en connaissances structurelles et procédurales (Fig. 6). Les connaissances structurelles représentent d'une part la connaissance de l'agent sur le système simulé et d'autre part les connaissances expertes. La connaissance du système est une représentation structurée de l'exploitation et de son contexte. Une partie de ces connaissances est statique, une autre partie est dynamique (couplée avec le modèle de culture). Les connaissances expertes correspondent aux connaissances métier, elles ne sont pas nécessairement spécifiques aux exploitations (ex. connaissance des cultures, des types de sol, des seuils de décision). Elles sont statiques lors des simulations. Les connaissances procédurales représentent les savoir-faire de l'agent. Cela correspond à une librairie de plans d'action préétablis (ensembles de règles de décision) et mobilisables lors du processus de décision. Les itinéraires techniques (Fig. 6) sont par exemple stockés sous forme de plans d'action dans la base de connaissance procédurale de l'agent.

2) Décisions stratégiques : nous avons découpé la décision stratégique en deux phases :

- Identification de scénarios d'assolements candidats : nous définissons un *scénario d'assolements comme une succession d'assolements spatialisés sur un horizon temporel donné.* Un scénario est considéré comme réalisable si sa mise en œuvre permet de respecter l'ensemble des contraintes structurelles de l'exploitation (parcellaire, équipement, ressources...) ainsi que les contraintes de constitution des systèmes de culture décidées par l'utilisateur (règles de constitution des unités de gestion, règles de succession des cultures, délais de retour des cultures...). Nous avons formalisé le problème d'allocation des cultures dans l'espace et dans le temps sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes pondérées (Akplogan *et al.*, 2011).

- Sélection d'un scénario d'assolements : cette étape vise à sélectionner un scénario parmi les candidats. Le scénario choisi est celui qui répond le mieux aux objectifs économiques de l'agriculteur. La sélection est faite par maximisation d'une fonction d'utilité actuellement monocritère qui intègre un coefficient d'aversion au risque (Reynaud et al., 2010). Dans la version actuelle, la fonction d'utilité est mono-objectif maximisant le profit sur l'ensemble des années d'un scénario d'assolements (Désir). Le coefficient d'aversion au risque est une donnée d'entrée du modèle. La sélection se fait sur la base des connaissances expertes (Croyance) de l'agent qui ont été simulées avec littleCrash. La sélection d'un scénario permet de générer un plan complet d'action (Intention) intégrant les itinéraires techniques pour chaque culture sur chaque parcelle.

3) Décisions tactiques : elles font référence aux décisions qui permettent d'adapter le plan d'assolement (« Ajustement » Fig. 7) ou qui le remettent en cause dans sa globalité (« Révision » Fig. 7). Cette étape nécessite la description sous forme de plans d'action (connaissances procédurales) et de règles de décision permettant de déclencher des adaptations du plan.

4) Décisions opérationnelles : elles correspondent aux décisions relatives à la conduite des cultures à l'échelle de la parcelle. Les itinéraires techniques sont décrits comme des plans d'action définis par un ensemble d'opérations culturales. Les opérations culturales sont décrites sous forme de règles de décision :

- Les règles d'enchaînement décrivent l'ordre dans lequel les opérations culturales doivent se succéder.
- Les règles d'activation sont une conjonction de prédicats qui, s'ils sont tous vérifiés, déclenchent l'opération. Les prédicats, ou conditions, peuvent porter sur des variables qui décrivent l'état du système (« faits » figure 6) ou porter sur des dates pour décrire des périodes. Exemple de prédicat : **SI fait < Seuil alors VRAI.** Le fait correspond à un état du système (exemple : niveau de la réserve utile), le seuil correspond à un indicateur de décision (ex : 30mm) qui rend VRAI le prédicat. Les prédicats concernant la conduite de culture sont simulés par STICS pour chaque unité spatiale de l'exploitation agricole.

Discussion

Couplage de modèles de décision

Le besoin d'une meilleure intégration des sciences de l'environnement et des sciences de la décision est souvent exprimé dans la littérature scientifique traitant de la modélisation des systèmes agricoles (Keating et McCown, 2001 ; McCown, 2002 ; Matthews *et al.*, 2007 ; Bergez *et al.,* 2010). Le couplage de modèles dynamiques de décision avec des modèles bio-techniques est en effet une approche puissante pour traiter des problèmes de décision intervenant dans des environnements complexes tel qu'une exploitation agricole (Liu *et al.*,2007 ; Matthews *et al.*, 2007 ; Bergez *et al.*, 2010). L'une des originalités de CRASH pour simuler les décisions d'assolement est précisément le couplage de modèles dynamiques représentant de façon explicite les rétroactions entre l'agent et le système piloté.

Dynamiques spatio-temporelles du processus

Le travail de formalisation nous a permis de proposer un ensemble de concepts permettant de modéliser la dynamique du processus de décision. Au niveau stratégique, l'analyse des cas d'étude nous a montré que les choix d'assolement se confondent avec la constitution des systèmes de culture (Aubry *et al.*, 1998). Dans le modèle d'Aubry *et al.* (1998), les systèmes de culture émergent du processus de décision d'assolement. Dans CRASH, la démarche est inversée : l'assolement émerge de la constitution des systèmes de culture. C'est en effet à ce niveau que se structurent les interactions spatio-temporelles pour l'allocation des cultures sur les parcelles (Sebillotte, 1990). Dans CRASH, nous plaçons le concept de système de culture au centre de la décision stratégique d'assolement. Notre analyse nous a montré que le concept de rotation ne permet pas de représenter la diversité des stratégies de planification des agriculteurs comme décrite par Castellazzi *et al.* (2008). Nous proposons de le remplacer par un concept plus général avec une représentation mathématique (un graphe orienté) pleinement opérationnelle : le schéma de successions. Bien que structurantes pour l'exploitation, les décisions d'assolement ne concernent pas uniquement les décisions stratégiques. Il existe en effet plusieurs niveaux de décision qui ne répondent pas nécessairement aux mêmes logiques. Dans CRASH, nous proposons un cadre pour traiter les décisions d'assolement comme un processus continu vu comme la combinaison d'activités planifiées à différentes échelles temporelles et d'activités d'adaptation aux contextes changeants (Aubry *et al.*, 1998 ; Dury *et al.*, 2011).

Généricité de l'approche

La méthodologie de développement du modèle conceptuel de CRASH nous a permis de dégager des concepts ayant une certaine généricité et qui ne sont pas spécifiques aux agriculteurs irrigants. En effet, nous pouvons penser que le modèle de décision proposé pourrait être utilisé pour des agriculteurs de grande culture qui n'irriguent pas. Cependant, nous ne l'avons pas vérifié pour des agriculteurs non irrigants. Concernant d'autres systèmes, nous retrouvons cette même articulation de l'espace et du temps dans les études réalisées par Navarrete et Le Bail (2007) et par Mawois *et al.* (2012) pour des systèmes maraîchers. De plus le développement modulaire du modèle informatique CRASH pourrait permettre son adaptation à d'autres systèmes en y intégrant leurs spécificités, comme par exemple la prise en compte des surfaces fourragères comme unité de gestion pour des exploitations de polyculture-élevage (Schaller, 2011).

Du modèle à l'outil

Avec CRASH, nous proposons un cadre formalisé et des représentations opérationnelles pour chaque étape du processus de décision de l'agriculteur. Cependant, il existe un certain nombre d'étapes à franchir avant d'avoir un outil pleinement opérationnel. Développer l'ensemble du modèle conceptuel est un projet ambitieux, cependant, la modularité de CRASH permet le développement ciblé pour les différentes utilisations qui caractérisent les outils d'aide à la décision : le diagnostic, la planification et la gestion (Rizzoli et Young, 1997). Le diagnostic peut être effectué en simulant à l'échelle de l'exploitation des assolements existants sans pour autant simuler les décisions d'assolement en considérant les itinéraires techniques pratiqués afin d'évaluer la pertinence et la robustesse des choix déjà effectués au regard de scénarios (prix, climats, ressources) (Fig. 7). La planification peut

être effectuée en exécutant le module 2 de CRASH (Fig. 7) qui traite de la décision stratégique. Ce module permet de déterminer les allocations optimales de cultures en fonction de contraintes et de règles de constitution des unités de gestion sur l'exploitation. Enfin, il est possible d'explorer les effets des stratégies d'adaptation des choix d'assolement en fonction de variations de contexte. Cela doit permettre d'identifier les marges de manœuvre permises par les choix des systèmes de culture au niveau stratégique et par conséquent identifier des stratégies d'adaptations robustes aux aléas.

Conclusion

Nous proposons une modélisation du processus de décision d'assolement des agriculteurs irrigants à travers un ensemble de concepts formels. Le travail de formalisation nous a permis de rendre opérationnels les concepts utilisés par les agriculteurs et les agronomes pour représenter les différentes dimensions du processus de décision dans un modèle informatique. Sur cette base, nous avons développé le cadre de modélisation CRASH. Ce travail ouvre de nouvelles perspectives pour le développement d'outils d'aide à la décision sur les choix d'assolement. Notre approche vise à être complémentaire des autres approches proposées dans la littérature, la plupart ayant leurs racines dans la recherche opérationnelle et/ou économique. La nouveauté de l'approche proposée dans ce travail s'appuie sur le couplage de modèles dynamiques à la fois sur la décision et sur les processus biophysiques. De plus, avec CRASH, nous privilégions la recherche de successions d'assolements (scénario) cohérents sur plusieurs années plutôt qu'une recherche d'un assolement optimal pour une campagne isolée. La modélisation des processus de décision d'assolement à l'échelle de l'exploitation doit permettre de questionner non seulement la validité de solutions d'assolement mais surtout la pertinence des décisions qui y sont associées.

Bibliographie

Akplogan, M., Dury, J., de Givry, S., Quesnel, G., Joannon, A., Reynaud, A., Bergez, J.E., Garcia, F., 2011. A Weighted CSP approach for solving spatio-temporal farm planning problems. In *Soft'11, 11th Workshop on Preferences and Soft Constraints*, 1-15.

Amigues, J.P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A., (éditeurs), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 pages + annexes.

Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F., Papy, F., 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture. In Brossier, J., Dent, B. (Ed.), *Etudes & Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement,* 31, 25-43.

Aubry, C., Dounias-Michel, I., 2006. L'agriculteur acteur et décideur. Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole. In Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Ed.), *L'agronomie aujourd'hui.* Quae, coll. Synthèses. Paris, France, 57-73.

Bachinger, J, Zander, P., 2007. ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy,* 26, 130-143.

Beck, H., Morgan, K., Jung, Y., Grunwald, S., Kwon, H.Y., Wu, J., 2010. Ontology-based simulation in agricultural systems modeling. *Agricultural Systems,* 103, 463-477.

Becu, N., Bousquet, F., Barreteau, O., Perez, P., Walker, A., 2003. A methodology for eliciting and modelling stakeholders' representations with Agent Based Modelling. *Lecture notes in computer science*, 131-148. Springer.

Bergez, J.E., Patrick Chabrier, C. Gary, MH. Jeuffroy, David Makowski, Gauthier Quesnel, Éric Ramat, et al. 2012. « RECORD: an open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems ». *Environmental Modelling & Software*. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.011.

Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy,* 32, 3-9.

Bergez, J.E., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., Nolot, J. M., Rellier, J. P., 2004. Anticipation in agricultural management. In *Proceedings of the European Workshop on Sequential Decisions under Uncertainty in Agriculture and Natural Resources (EWDA)*. Silsoe, UK: D. Parsons.

Boiffin, J., Malézieux, E., Picard, D., 2001. Cropping Systems for the Future In Nösberger, J., Geiger, H.H., Struik, P.C. (Ed.), CAB International, 261-279.

Bouveret, S., Heras, F., de Givry, S., Larrosa, J., Sanchez, M., Schiex, T., 2005. *Toolbar: a state-of-the-art platform for wcsp*.

Bratman, M.E., 1987. Intentions, Plans, and Practical Reason. *Harvard University Press, Cambridge, MA*, 200 p.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E. et al., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy,* 18, 309-332.

Castellazzi, M.S., Wood, G.A., Burgess, P.J., Morris, J., Conrad, K.F., Perry, J.N., 2008. A systematic representation of crop rotations. *Agricultural Systems,* 97, 26-33.

Cox, P.G., 1996. Some issues in the design of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems,* 52, 355-381.

Dogliotti, S., Van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H., 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems,* 86, 29-51.

Dogliotti, S., Rossing, W. A. H., van Ittersum, M. K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy,* 19, 239-250.

Dury, J., Schallers, N., Garcia, F., Reynaud, A., Bergez, J.E., 2011. Models to support cropping plan and crop rotation decisions: a review. *Agronomy for Sustainable Development,* 32, 567-580.

Eisenhardt, K.M., 1989. Building theories from case study research. *Academy of Management Review,* 14, 532-550.

Le Gal, P.Y., Merot, A., Moulin, C.-H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software,* 25, 258-268.

Garcia, F., Guerrin, F. , Martin-Clouaire, R., Rellier, J. P., 2005. The Human Side of Agricultural Production Management: the Missing Focus in Simulation Approaches. In A. Zerger et R.M. Argent (Ed.), *Proceedings of the MODSIM Conference the MODSIM*, Melbourn, Australia, 12-15.

Glaser, B.G., Strauss, A.L., 1967. The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research. Fourth pap. Transaction Publishers.

Hoffman, R.R, Lintern, G., 2006. Eliciting and representing the knowledge of experts. In Ericsson, K.A., Charness, N., Feltovich, P., Hoffman, R. (Ed.) *Cambridge handbook of expertise and expert performance*, Cambridge. New York: Cambridge University Press, 203-222.

Hollnagel, E., 2003. *Handbook of Cognitive Task Design*. Routledge.

Keating, B.A., McCown, R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems,* 70, 555-579.

Klein, G.A, 1993. *Decision making in action: models and methods*. Ablex Pub.

Leroy, P., Jacquin, C., 1991. LORA: A decision support system for the choice of crops on the irrigable area of a farm. Bruges, 11

Leteinturier, B., Herman, J.L., De Longueville, F., Quintin, L., Oger, R., 2006. Adaptation of a crop sequence indicator based on a land parcel management system. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 112, 324-334.

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N. et al., 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science,* 317, 1513-1516.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., 2009. Modelling and simulating work practices in agriculture. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies,* 4, 42-53.

Matthews, R.B., Gilbert, N.G., Roach, A., Polhill, J.G., Gotts, N.M., 2007.Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology,* 22, 1447-1459.

Mawois, M., Le Bail, M., Navarrete, M., Aubry, C., 2012. Modelling spatial extension of vegetable land use in urban farms. *Agronomy for Sustainable Development,* 32, 911-924.

McCarl, B.A, Candler, W. V, Doster, D. H, Robbins, P. R, 1977. Experiences with farmer oriented linear programming for crop planning. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie,* 25, 17-30.

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

Navarrete, M., Le Bail, M., 2007. SALADPLAN: a model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. *Agronomy for Sustainable Development,* 27, 209-221.

Nevo, A., Oad, R., Podmore, T.H., 1994. An integrated expert system for optimal crop planning. *Agricultural Systems,* 45, 73-92.

Norling, E., Sonenberg, L., Rönnquist, R., 2001. Enhancing Multi-Agent Based Simulation with Human-Like Decision Making Strategies. In Moss, S., Davidsson, P., (Ed.), *Multi-Agent-Based Simulation*, Lecture No. Springer Berlin Heidelberg, 349-357.

Ohlmer, B, Olson, K., Brehmer, B., 1998. Understanding farmers' decision making processes and improving managerial assistance. *Agricultural Economics,* 18, 273-290.

Quesnel, G., Duboz, R., Ramat, E., 2009. The Virtual Laboratory Environment - An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems ». *Simulation Modelling Practice and Theory,* 17, 641-653.

R Development Core Team, 2011. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria.

Reynaud, A., Couture, S., Dury, J., Bergez, J.E., 2010. Farmer's Risk Attitude: Reconciliating Stated and Revealed Preference Approaches? In *Risk Elicitation and Stated Preference Methods for Climate Change Research*, 25. Trento (Italy).

Rizzoli, A.E., Young, W.Y., 1997. Delivering environmental decision support systems: Software tools and techniques. *Environmental Modelling and Software,* 12, 237-249.

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

Sarker, R., Ray, T., 2009. An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models. *Computers and Electronics in Agriculture,* 68, 191-199.

Schaller, N.. 2011. Modélisation des décisions d'assolement des agriculteurs et de l'organisation spatiale des cultures dans les territoires de polyculture-élevage. PhD., Paris,

France: Thèse de doctorat de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech).

Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In Lacombe, L., Picard, D., (Ed.), *Les systèmes de culture*, Un point sur. INRA, 165-190.

Simon, H.A., 1976. From Substantive to Procedural Rationality. In Latsis, S.J., (Ed.), Cambridge University Press, New York, 129–148.

Wijnands, E.G., 1999. Crop rotation in organic farming: theory and practice. In *Designing and testing crop rotations for organic farming. Proceedings from an international workshop*. Danish Research Centre for Organic Farming, 21-35