

Modélisation de l'organisation du travail en systèmes de grande culture : méthode et application à l'évaluation *ex ante* d'innovations variétales de pois

*Jean-Pierre Rellier, Roger Martin-Clouaire, Nathalie Cialdella,
Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard*

Introduction

Les modèles de fonctionnement de cultures ou d'agrosystèmes sont de plus en plus utilisés par les agronomes pour explorer des systèmes innovants ou pour évaluer *ex ante* l'impact agronomique ou environnemental des innovations (Boote, Kropff et Bindraban, 2001). Or l'insertion d'un système de culture innovant dans une exploitation agricole, aussi bien que l'insertion d'un type variétal nouveau dans un système de culture peuvent modifier considérablement l'organisation du travail : le travail est, souvent, un point d'achoppement pour l'adoption d'une innovation (Joannon et al, 2005). La question posée dans cet article est : comment modéliser l'organisation du travail pour prendre en compte les incidences directes et indirectes d'une innovation dans une démarche de conception ou d'évaluation *ex ante* assistées par modèle ?

En agriculture, la complexité de la conduite des activités de production et de l'organisation du travail augmente rapidement (Dedieu, Laurent et Mundler, 1999) mais la question du travail est encore très peu présente dans les problématiques de recherche des disciplines agronomiques (Madelrieux et Dedieu, 2008). De ce fait, peu d'outils informatiques susceptibles d'aider à la gestion du travail en agriculture existent à ce jour. Dans le domaine des productions industrielles, au contraire, de nombreux logiciels de *business process modelling and simulation* ont été développés (Jansen-Vullers et Netjes, 2006). Ces outils traitent de l'organisation du travail en modélisant jusqu'au niveau opérationnel certains processus métier de l'entreprise, c'est-à-dire i) un ensemble logiquement et temporellement structuré de tâches à accomplir plus ou moins impérativement et ii) des moyens humains et matériels à mobiliser pour leur réalisation. La simulation de la gestion en situation dynamique (Hoc, 1996) que nous proposons ici s'appuie sur le cadre de représentation et simulation appelé DIESE (Martin-Clouaire et Rellier, 2009), qui, d'une certaine

manière, s'inscrit dans le prolongement du projet OTELO (Attonaty *et al.*, 1994).

L'outil DIESE est fondé sur une ontologie du domaine, c'est-à-dire un corps formel de connaissances sur la structure, le fonctionnement et la dynamique des systèmes, en particulier agricoles. Une partie notable de ce corps de connaissances porte sur le pilotage des systèmes, et sur les données et les raisonnements qu'il mobilise. Parmi les données, celles relatives au travail sont la nature, l'agencement, et les propriétés des activités, des opérations et des ressources qu'elles mobilisent. Les raisonnements portent sur la localisation spatio-temporelle des actes techniques, en fonction de la perception dynamique de l'état du système, et l'allocation des ressources aux activités. Ce cadre accorde une place importante à la modélisation du contexte dans lequel le travail se déroule, c'est-à-dire les conditions qui président à la détermination des activités à réaliser à un moment donné et au déroulement de leur réalisation. L'agent en charge de la conduite est modélisé à travers son observation (surveillance) de l'appareil de production, sa prise de décision en situation quant aux interventions sur cet appareil. Pour analyser le comportement organisationnel du gestionnaire, il est nécessaire de modéliser la nature circonstancielle des décisions opérationnelles qui, du fait des facteurs incontrôlables (e.g. le climat) pesant sur un système agricole, voient leur pertinence et leur faisabilité très dépendantes des conditions et contraintes courantes, en particulier celles qui concernent les ressources.

Cet article illustre la démarche de modélisation et d'utilisation de l'outil pour un système de production en grande culture. Un modèle, SILASOL (Cialdella *et al.*, 2009), a été construit avec DIESE, et est en cours d'utilisation pour évaluer la possibilité d'insérer des variétés innovantes de pois, différant en particulier par la date de semis optimale, dans des exploitations céréalières (associant céréales et oléo-protéagineux) du Bassin parisien. Dans de telles exploitations, il existe en effet des pointes de travail importantes (à l'automne, et à la moisson principalement), qui contraignent fortement le développement des innovations susceptibles d'accroître la charge en travail dans ces périodes. Dans le modèle SILASOL, les ressources considérées sont les travailleurs et le matériel agricole. L'intérêt de l'introduction de variétés innovantes de pois est évalué par la simulation du comportement de cette culture dans un contexte de concurrence sur les ressources avec les autres cultures, et de conditions climatiques aléatoires pouvant affecter l'organisation du travail, les dates d'intervention et les conditions d'implantation du pois. Cette culture est en effet très sensible au tassement du sol, qui peut être provoqué en cas de semis dans des conditions de sol trop humide.

Une modélisation du travail, appuyée sur une conceptualisation originale

La modélisation du travail agricole requiert une délimitation et une conceptualisation du domaine, l'expression d'un questionnement sur l'organisation du travail, l'élaboration de méthodes et outils pour l'analyse de cas et l'amélioration ou la conception empirique de systèmes nouveaux. Ce besoin a donné lieu au développement d'une ontologie des systèmes pilotés (Martin-Clouaire et Rellier, 2006) applicable aux systèmes de production agricoles (grandes cultures, maraîchage, élevage), y compris pour les aspects relatifs à l'organisation du travail et à son interaction avec les processus biophysiques. Dans cette section, on définit les principaux concepts, et on les illustre par une traduction possible (parmi d'autres) dans le domaine de la conduite d'une exploitation de grande culture (Aubry *et al.*, 1998).

Activités, opérations et ressources

Le concept central autour duquel on positionne les autres éléments d'analyse du pilotage d'un système de production est celui d'ACTIVITE. Une activité est une spécification de ce que l'agriculteur a l'intention de faire pour piloter son système. Le niveau de granularité le plus fin d'une activité est appelé « activité primitive ». Ainsi, une activité, quand elle n'est pas primitive, est constituée d'une agrégation (ou une composition) de plusieurs activités. La composition se fait au moyen d'opérateurs sur les activités (voir plus loin) ; elle explicite des contraintes que doivent satisfaire les activités visées par l'opérateur (par exemple le séquençement, la synchronisation ou la répétition).

Une spécification d'activité primitive exprime les propriétés souhaitées de trois composantes qui sont l'objet, le sujet et la nature d'une activité à réaliser. L'objet est la partie impactée de l'outil de production. La nature est la description de l'impact. Le sujet est l'opérateur de l'impact. L'impact est un changement d'état qui, du point de vue du gestionnaire, s'inscrit dans une trajectoire d'états cohérente avec l'objectif de production. Une propriété additionnelle est la localisation temporelle, en termes d'instant de réalisation, de fenêtre de réalisation ou encore d'une condition relative à l'état courant à l'instant considéré. Un exemple d'activité primitive est la mise en terre de semences de pois sur une parcelle donnée. L'impact sur le système est l'installation d'une population d'individus de pois sur la parcelle (l'objet), et le sujet est le type de travailleur mobilisé pour la réalisation de cette activité. On précise en outre que cette activité, qu'on appelle « semis du pois » doit intervenir un jour de semaine à partir d'une certaine date calendaire.

L'impact d'une activité primitive est spécifié en utilisant le concept d'OPERATION, incluant notamment une description du changement d'état de l'objet de l'activité. Le semis de pois fait donc référence à une opération qui

change l'état de la parcelle en la dotant d'une population de graines d'une variété donnée de pois, avec une densité donnée, installée dans un sol à une profondeur moyenne fixée. Une opération a par ailleurs la propriété de requérir un jeu d'outils et d'autres éléments matériels, par lequel le changement d'état est opéré. Ces éléments, comme la composante sujet d'une activité, sont considérés comme des RESSOURCES dont la disponibilité est nécessaire pour la réalisation de l'opération. Dans l'exemple du semis, l'installation du peuplement de pois requiert un tracteur et un semoir à céréales, ainsi qu'un conducteur de tracteur. De plus, on attache à une opération sa condition de faisabilité, typiquement en rapport avec le matériel utilisé et l'état de l'objet opéré : avec un tracteur lourd, le sol doit être ressuyé au-delà d'un seuil donné. Enfin, une opération possède une vitesse d'exécution, liée à l'effet réalisé et aux ressources mises en jeu. Cette vitesse est par exemple de 15 ha par jour (pour une journée de durée normale).

On note qu'une opération n'est pas un concept de gestion : ses propriétés sont définies indépendamment de toute activité dans laquelle elle pourra être mise en jeu, et notamment de son objet et de son sujet. De manière générale, on distingue, d'une part et hors contexte de gestion, les CONTRAINTES intrinsèques à une ressource (ou un jeu de ressources) que celle-ci véhicule dans toute opération (et donc toute activité) dans laquelle elle est requise, et d'autre part, pour la mise en cohérence de la gestion, les CONDITIONS d'assemblage autorisé ou préféré des trois composants d'une activité. Par exemple, relevant des contraintes, on spécifie qu'un tracteur lourd ne peut être piloté que par un ouvrier qualifié, disponible dans certaines plages. Relevant des conditions, on pourra choisir l'opérateur en fonction de sa technicité vis-à-vis du matériel mis en jeu et de sa compétence à réaliser l'effet recherché en un temps donné.

Une fois définies les granules de gestion que sont les activités et leurs conditions de cohérence, c'est l'organisation des activités dans l'espace du système de production et dans le temps de la période étudiée qui détermine la gestion globale du système. En pratique, c'est une conjonction de contraintes et de préférences sur l'espace et sur le temps qu'il faut continuellement satisfaire au cours de la vie du système. Par exemple, quand deux semis sont en concurrence sur un même opérateur (non partageable), on peut choisir de commencer par la parcelle qui présente le plus de risques de ne pas pouvoir être semée s'il pleut dans les prochaines heures.

Le concept le plus structurant pour l'analyse et la représentation de l'organisation des activités est celui d'OPÉRATEUR SUR LES ACTIVITÉS. Un opérateur combine une ou plusieurs activités (éventuellement primitives) en une autre activité (qualifiée alors de non primitive, ou bien agrégée). L'agrégation la plus naturelle (et aussi la moins structurante) est la conjonction : le chantier, au sens commun du terme, des semis de pois d'hiver est une conjonction qui spécifie qu'un semis doit être réalisé sur chaque parcelle prévue en pois dans

l'assolement. On ne précise pas l'ordre de réalisation de ces semis, mais on peut attacher au chantier lui-même des contraintes temporelles, telles la fenêtre de démarrage et la date de fin au plus tard, qui s'imposent alors à chaque semis. L'opérateur de disjonction décrit une activité qui peut prendre plusieurs contenus alternatifs. Par exemple, l'alternative peut porter sur le type de matériel utilisé par l'opération : le choix sera fait en fonction de la disponibilité des ressources (matérielles ou humaines), ou bien par le jeu d'une préférence liée au contexte du choix. D'autres opérateurs spécifient un séquençement d'activités, complet (A est complètement avant B) ou partiel (A est partiellement avant B et/ou A est partiellement après B). L'opérateur d'itération spécifie la manière de répéter une activité, et celui d'optionnalité permet d'exprimer qu'une activité, bien que prévue, peut être annulée dans certaines circonstances.

La combinaison hiérarchisée d'activités, d'abord primitives puis de plus en plus agrégées, permet de construire ce qu'on appelle un plan. Dans la présente conceptualisation, ce plan est un composant essentiel de ce qu'on appelle la stratégie de conduite du gestionnaire. Un autre composant est la TRAJECTOIRE REACTIVE, définie comme un ensemble d'ajustements envisageables du plan, conditionnellement à des états du système qui justifient ces ajustements, aux yeux du gestionnaire.

L'organisation du travail

L'organisation du travail dans un système de production, ici agricole, est l'ensemble des dispositions prises par le gestionnaire du système, pour affecter au mieux la main d'œuvre à la réalisation des opérations, compte tenu de contraintes et de préférences (i) sur la disponibilité et la compétence de cette main d'œuvre, (ii) sur la disponibilité d'autres ressources matérielles requises par la réalisation des opérations. Ces dispositions portent conjointement sur la configuration matérielle du système (parcellaire, bâtiments, outillage, main d'œuvre, moyens d'information et d'observation) et sur son pilotage (plan d'activité et trajectoire réactive). On se focalise ici sur les dispositions portant sur le pilotage, et particulièrement sur les aspects relatifs à la gestion de la main d'œuvre qui exploite des capacités complémentaires d'expression de connaissances sur des situations jugées inacceptables quant aux moyens alloués à une activité, et sur les contraintes de disponibilité des ressources et de leur utilisations conjointes avec d'autres ressources ou dans plusieurs activités.

La configuration de la main d'œuvre, pour autant qu'elle ne soit pas totalement contrainte, consiste d'abord à faire entrer et sortir du système de production un certain nombre d'unités de main d'œuvre de types donnés, à des instants choisis de la vie du système. Ces unités peuvent être regroupées en équipes, de manière permanente ou occasionnelle. Ensuite, et à des échelles de temps plus réduites telles la semaine ou la journée, on affecte à chaque unité (ou

à chaque type) une fonction de disponibilité, qui détermine à chaque instant si l'unité de main d'œuvre est mobilisable ou non par les activités.

Dans l'exemple d'un système de production incluant le pois, les types de main d'œuvre résultent d'un croisement entre le caractère permanent ou saisonnier et le caractère d'emploi à temps partiel ou à plein temps. Les ouvriers permanents sont mobilisables dès leur entrée dans le système. Leurs horaires sont obtenus par la répétition de l'organisation hebdomadaire, tout au long de l'année. Les ouvriers saisonniers sont mobilisables et démobilisables seulement par l'occurrence d'un événement particulier (le début et la fin de la période des récoltes pour les saisonniers recrutés à cette fin). Leurs horaires hebdomadaires sont identiques dans les périodes ainsi déterminées. Que les ouvriers soient employés à temps plein ou partiel, des événements dédiés peuvent générer des périodes d'immobilisation (vacances d'été, congé de fin de semaine ou autres absences telle qu'une maladie, selon une loi de probabilité paramétrée).

Par ailleurs, on choisit (ou on caractérise) les unités de main d'œuvre par leurs compétences, positives (« un ouvrier permanent sait récolter »), négatives (« un ouvrier à temps partiel ne sait pas semer »), ou exclusives (« un ouvrier saisonnier de la CUMA ne sait que récolter »). On modélise la notion d'incompétence / compétence par l'attachement ou non au type d'activité concerné d'une condition d'inconsistance (situation inacceptable) : « une activité de semis dont le sujet comprend au moins un ouvrier à temps partiel est inconsistante ». Pour exprimer une compétence exclusive, on écrira par exemple: « une activité A dont le sujet comprend un ouvrier saisonnier CUMA est inconsistante sauf si A est une récolte ». On peut assigner des compétences multiples et graduées à une unité de main d'œuvre, puis affecter celle-ci à l'une ou l'autre des activités en concurrence, en fonction des degrés de compétence.

La gestion anticipatoire de la journée de travail consiste à décider des activités à exécuter de manière à exploiter au mieux les ressources matérielles dans la période de disponibilité de la main d'œuvre entre le début et la fin de la journée (on peut affiner la représentation en scindant la journée en plusieurs sous-périodes). Une donnée de ce raisonnement est la durée estimée des interventions candidates. Par exemple, un semis candidat sur une parcelle donnée qui se terminerait exactement à la fin de la journée pose les seules questions de la disponibilité des ressources et de la faisabilité technique. S'il doit se terminer avant, la stratégie de pilotage peut avoir prévu d'examiner ou non, immédiatement après, s'il convient de mettre en œuvre d'autres activités. Si on prévoit que le semis va se terminer après la fin de la journée (par exemple parce qu'il a été commencé tard en cours de journée), l'alternative est de rester strict sur l'horaire de fin de journée (et alors choisir de différer la mise en œuvre ou de scinder la réalisation) ou bien d'augmenter la durée de cette journée de travail, si une limite fixée l'autorise. Ces types de comportements sont modélisés dans notre domaine-exemple (i) par une condition d'inconsistance

d'activité ou de faisabilité d'opération (dans le cas du dépassement d'horaire), ou bien, au moment où démarre l'opération, (ii) par le décalage de l'instant de fin de journée si la durée de l'opération est supérieure au temps restant jusqu'à l'arrêt du travail pour les unités de main d'œuvre mobilisées, ou bien encore (iii) par une fonction de préférence, attachée au gestionnaire, qui peut combiner ce critère d'organisation avec un critère d'opportunité ou d'urgence agricole de l'opération. La durée d'une opération est le quotient de la quantité à opérer par la vitesse. Dans notre application, où les objets à opérer sont des parcelles scindées en placettes de 1 hectare, les quantités sont exprimées en nombre de placettes et les vitesses en nombre de placettes opérables dans ce qu'on appelle le « pas » de l'opération fixé à 2 heures. Ainsi, pour le semis, la vitesse est de 5 placettes par pas de 2h.

Il existe d'autres aspects de l'organisation du travail. Le groupage dans le temps d'activités du même type sur un ensemble de parcelles permet de synchroniser les dynamiques des cultures et par conséquent de grouper plus tard certaines activités sur ces cultures. Le groupage d'interventions requérant le même matériel sur des objets (parcelles) géographiquement proches peut entraîner une économie sur les temps de préparation du matériel (non proportionnels à la surface) et les temps de déplacement. L'arbitrage entre deux activités concurrentes sur l'utilisation de la même ressource peut être fondé sur des degrés de priorité, absolus ou évalués en fonction du contexte. Il en est de même pour l'arbitrage entre deux ressources mobilisables par la même activité. L'accès à l'information (sur l'état du système piloté et sur son environnement) impacte aussi l'organisation du travail.

Aspects dynamiques de l'organisation du travail et simulation

Dans un système de production agricole, l'organisation du travail relève de considérations stratégiques (à partir desquelles on configure le système, de manière relativement durable), tactiques (qui permettent ou obligent d'adapter au contexte le pilotage du système configuré) et opérationnelles (sur l'allocation des ressources pour la réalisation correcte des décisions tactiques). Cette interaction de considérations rend très complexes l'analyse de modes d'organisation du travail observés et la conception d'organisations innovantes. De plus, la sensibilité et la mémoire de l'outil matériel de production (les sols, les végétaux) vis-à-vis d'événements climatiques ne permettent pas de négliger les perturbations dans l'organisation du travail qui peuvent avoir des conséquences importantes sur la dynamique du système biophysique et, en retour, sur l'organisation du travail elle-même. Par exemple, à cause d'une priorité accordée aux interventions sur les parcelles de blé plutôt que sur celles de pois, un épisode pluvieux peut retarder la préparation des sols pour le pois, entraînant une installation du peuplement gravement défectueuse, voire son

abandon. Ces phénomènes ne sont pas seulement complexes à étudier, leur examen est aussi nécessairement statistique, au sens où l'analyse et/ou la conception d'une organisation du travail doivent reposer sur une gamme de configurations initiales, croisée avec une gamme de types de contextes climatiques, eux-mêmes réalisés de manière aléatoire. La simulation informatique permet d'affronter cette complexité.

Un moteur de simulation

La simulation informatique d'un système dynamique repose sur un modèle des aspects structurels, fonctionnels et dynamiques du système, et sur un moteur de simulation en charge de la coordination temporelle de toutes les dynamiques sectorielles (biologiques, physiques, décisionnelles, informationnelles, opératoires). Parce que chaque dynamique sectorielle a son rythme propre (caractère ponctuel ou durable, temporalité des changements d'état), le moteur de simulation ne peut pas reposer sur une boucle collective qui fait avancer l'horloge du temps simulé selon un pas unique et constant. L'environnement de simulation (DIESE) qui instrumente la conceptualisation développée ici repose donc sur le paradigme de la simulation à événements discrets, selon lequel toute la dynamique d'un système est gérée par un agenda d'événements rangés dans l'ordre de leurs moments d'occurrence.

Le modèle d'un système de production et, à l'intérieur, celui de l'organisation du travail est donc fondamentalement un ensemble de types d'ÉVÉNEMENTS (dans la conception informatique orientée « objet », on parle de classes d'événements). Certains événements provoquent une dynamique ponctuelle (ou perçue comme telle) : l'occurrence d'une pluie, le déclenchement de l'examen du plan d'activités, l'embauche matinale des ouvriers. D'autres initient une dynamique durable : un semis déclenche le processus de développement phénologique, une pluie déclenche un processus d'infiltration, une décision déclenche un processus de réalisation d'une opération technique. A chaque classe d'événements est associée une classe de PROCESSUS. Un processus est le modèle du changement d'état provoqué par l'événement (ce qu'on a appelé plus haut l'aspect fonctionnel du système). Pour les processus durables (non ponctuels, on les qualifie aussi de « continus »), on décrit le changement d'état relativement à l'état précédent et à la durée de l'intervalle de temps entre l'état précédent et le nouvel état. Le changement d'état porte sur ce qu'on a appelé plus haut l'aspect structurel du système : un ensemble de classes d'ENTITES, connectées par des relations de spécialisation (un ouvrier permanent est une spécialisation d'ouvrier) ou d'agrégation (une parcelle agrège des placettes) ou fonctionnelles (une opération change l'état d'une placette). En résumé, une simulation est le traitement d'une pile d'événements, jusqu'à son épuisement, par un moteur général de synchronisation.

L'examen du plan d'activités

L'événement central, du point de vue de l'organisation du travail, est celui qui déclenche l'examen du plan d'activités pour en extraire les activités dont la mise en œuvre est, dans le contexte de l'instant, autorisée et pertinente vis-à-vis de l'objectif. Cette révision du plan (pour faire passer l'état de certaines activités de la valeur « en attente » à la valeur « ouverte ») est au moins quotidienne dans la conduite de notre système de culture avec pois, mais des examens additionnels peuvent être programmés de manière opportuniste en cours de journée, notamment si le programme d'opérations prévu en début de journée est terminé suffisamment tôt. Il est important de noter que, dans le modèle SILASOL, on ne programme pas, par anticipation, une séquence d'opérations à moyen ou long terme (par exemple la semaine). Autrement dit, les opérations qui ne sont pas élues pour une mise en œuvre aujourd'hui feront demain l'objet d'un nouvel examen.

C'est lors de la détermination de l'état « en attente/ouverte/fermée » des activités qu'intervient l'examen du contexte de la décision, c'est-à-dire la mobilisation des informations sur l'état du système et sur l'environnement. Les propriétés de ce sous-système d'information jouent sur la performance globale du système de production : fréquence et opportunité des observations, validité de l'information originelle, qualité de la perception qu'en a le gestionnaire, pertinence de sa mobilisation pour la décision considérée. Sur l'exemple de la quantité de pluie tombée sur les N derniers jours, qui participe à déclarer faisable ou non une opération de semis, la discussion porte sur l'éloignement de la station météo et la précision de la mesure, la probabilité d'erreur lors de transmission, le seuil de hauteur d'eau considérée efficace, la pertinence de la valeur de N choisie, etc. Dans l'environnement DIESE, le système d'information est modélisé, lui aussi, par des événements d'acquisition (active et passive) d'information, des processus de perception de l'information brute et de bruitage éventuellement aléatoire, et des processus de mémorisation et de remobilisation de la mémoire.

Pour une simulation correcte de l'observation de l'état du système, le moteur de simulation doit faire avancer de manière synchrone les processus biophysiques. Une notion importante à cet égard est celle du « pas » du processus : plus sa durée est grande, moins souvent est faite la mise à jour des valeurs d'état, et plus grand est l'écart maximum entre l'instant d'observation simulé et l'instant de la dernière mise à jour de l'état simulé. Dans les systèmes de culture, le pas considéré pour les processus biologiques est souvent de un jour, notamment pour les modèles qui utilisent des relevés météorologiques journaliers.

Une fois établi l'ensemble des activités « ouvertes », dès lors candidates, intervient immédiatement la décision d'opérer, en deux phases. D'abord la construction de jeux d'activités alternatifs consistants, puis le choix du meilleur

jeu. On parle de jeux d'activités, parce que la disponibilité des ressources pourra permettre d'opérer plusieurs activités en parallèle. On parle de jeux alternatifs parce que deux activités peuvent être en concurrence pour une ressource : un choix d'allocation est à faire. On parle de jeux consistants parce qu'un algorithme d'allocation général, intégré au moteur, a vérifié qu'aucune contrainte de disponibilité ou de partageabilité des ressources n'est violée par l'allocation, ni qu'aucune situation d'inconsistance d'activité n'est rencontrée. Intervient aussi à ce stade la vérification de la faisabilité des opérations, technique en fonction de l'état du système, et organisationnelle en fonction des choix de gestion de la journée de travail. Le choix du meilleur jeu d'activités à opérer est programmé dans une connaissance procédurale attachée à la classe des gestionnaires. Dans notre application-exemple, on choisit le premier jeu parmi ceux qui contiennent l'opération de plus forte priorité.

La mise en œuvre des opérations est simulée par un processus prédéfini dans l'environnement DIESE. Il fait progresser le degré de réalisation de l'opération en fonction de la vitesse déclarée. En conséquence, les ressources mobilisées par l'opération ne seront libérées qu'une fois l'opération terminée. Dans l'exemple du semis d'une parcelle de pois, les placettes de la parcelle passeront à l'état « semé » les unes après les autres. Si une ressource est immobilisée en cours de réalisation (fin de la journée de travail, par exemple), la progression de l'opération est arrêtée, mais l'activité concernée reste ouverte. Lors du prochain examen du plan (le lendemain, typiquement), la progression continuera si toutes les conditions sont réunies, mais pourra rester suspendue si, par exemple, la condition de faisabilité devient non satisfaite (le sol est devenu trop humide). Si la suspension persiste plus longtemps, il peut arriver que la date au plus tard donnée à l'activité pour devenir fermée soit dépassée : le plan est alors déclaré en échec, sauf si une réaction à cette situation a été explicitement programmée dans la stratégie.

L'allocation de ressources

Lors de l'examen du plan d'activités, pour établir les jeux d'activités candidats à l'exécution, le moteur de simulation tente de satisfaire les réquisitions des activités en matière de ressources. On rappelle que ces réquisitions portent sur l'acteur de l'opération, les ressources propres requises par l'opération. L'objet opéré peut aussi être déclaré en tant que ressource si on souhaite lui imposer une contrainte, tel le non-usage simultané de deux outils particuliers. La spécification de la réquisition peut concerner conjointement plusieurs ressources (par exemple, deux ressources agrégées pour récolter : « moissonneuse + chauffeur1 » et « tracteur-remorque + chauffeur2 »). Par héritage de classe, le caractère disponible de chaque ressource dépend soit de son état (la récolte requiert un tracteur en état de marche, ou un ouvrier dont la prochaine immobilisation interviendra suffisamment tard) soit de la valeur d'un

attribut qui a le sens d'une capacité (le niveau d'un stock doit satisfaire la demande). Pour une ressource, la réquisition est spécifiée, en simplifiant ici, par la classe de la ressource (« ouvrier saisonnier ») et par le nombre d'unités requises ou la quantité demandée.

L'allocation des ressources aux activités est une étape de l'organisation du travail. D'une part de manière passive, en réduisant l'éventail des possibilités par le respect des contraintes imposées (disponibilité, compétence). D'autre part de manière active, en explicitant les diverses possibilités d'allocations offertes par la spécification dans le contexte courant.

Exemples de résultats de la simulation

On s'appuie ici sur un travail, en cours de réalisation, d'évaluation *ex ante* de l'insertion de variétés innovantes de pois protéagineux dans une exploitation agricole de grande culture. Les variétés de pois traditionnellement cultivées en France sont des variétés de printemps. Pour accroître les chances d'avoir un rendement élevé, les agriculteurs tendent à semer ces variétés dès la sortie de l'hiver (fin février) pour bénéficier d'une longue durée de cycle cultural (les semis tardifs, pouvant s'étaler jusque début avril, donnent en fréquence de moins bons rendements). Or, ces variétés de printemps sont souvent (et particulièrement ces dix dernières années) soumises à des stress hydriques et thermiques auxquels la culture est très sensible. Par ailleurs, en semant tôt après l'hiver, les risques d'un mauvais ressuyage du sol sont plus élevés, augmentant ainsi la fréquence de tassement du sol, autre facteur auquel la culture est très sensible. Pour pallier ces risques de stress, les sélectionneurs se sont orientés vers des variétés d'hiver, dont le cycle cultural est en avance, et donc ont moins de risques d'être exposés à des stress hydrique et thermique de fin de cycle. Cependant, les variétés disponibles jusqu'à présent étaient très sensibles au gel, et devaient donc être semées le plus tard possible (vers mi novembre dans le Nord de la France), période où les sols sont souvent humides. De nouvelles variétés d'hiver sont en cours de sélection, combinant une plus grande résistance au gel et une maturité précoce. Ces variétés peuvent donc être semées plus tôt (dès la fin octobre, voire avant). Cet avantage pose problème dans le cas d'exploitations agricoles ayant déjà un calendrier de travail chargé à cette période (récoltes de maïs ou de betteraves, semis de céréales), et pourrait conduire à une implantation de ces variétés de pois en mauvaises conditions, faisant ainsi perdre tout leur bénéfice attendu. L'intérêt de choisir ces nouvelles variétés doit donc être étudié attentivement, pour s'assurer de l'obtention des performances attendues, en prenant en compte l'organisation du travail dans l'exploitation. Nous avons en effet montré, en utilisant un modèle d'organisation du travail plus simple (OTÉLO) que les performances des trois types variétaux étaient modifiées lorsque l'organisation du travail au sein de l'exploitation agricole était prise en compte (Vocanson, 2006).

Nous étudions, en nous appuyant sur SILASOL, les facteurs de variabilité des performances de diverses variétés de pois, afin d'identifier les combinaisons de modalités constituant les systèmes de culture acceptables et performants. Pour une variété de pois donnée, ces facteurs relèvent de deux groupes : la place faite au pois dans l'assolement, relativement aux autres cultures, et la manière de conduire les parcelles recevant du pois (en termes d'itinéraires techniques et de gestion de la concurrence avec les autres cultures).

Le travail est en cours et nous donnons ici un aperçu de l'utilisation du simulateur sur un cas d'étude très simplifié, comportant un petit nombre de facteurs étudiés, et sur deux critères d'appréciation seulement. Le modèle a été paramétré sur le cas d'une ferme beauceronne de 280 hectares, cultivée en pois, blé et colza. Les activités sont décidées par le chef d'exploitation et conduites par deux travailleurs à temps plein et deux travailleurs supplémentaires lors des périodes de pointe en travail (récoltes). L'agriculteur partage de plus du matériel agricole en CUMA ; il bénéficie de l'entraide de deux autres agriculteurs de la CUMA pour les activités de récolte. Le système est constitué d'un seul bloc-rotation, divisé en trois parcelles conduites selon la même rotation « Colza – Pois de printemps – Blé d'hiver ». Chacune des trois séquences débute par une culture différente (Tab. 1). Un itinéraire technique simplifié est assigné à chaque culture, enchaînant directement le semis (et sa préparation) et la récolte. Les activités et opérations sont spécifiées de manière flexible relativement au contexte climatique, mais une seule série climatique est exploitée dans le présent exercice. La simulation est conduite sur quatre campagnes.

Parcelle	2000	2001	2002	2003	surface
P1	Pois	Blé	Colza	Pois	20 ha
P2	Blé	Colza	Pois	Blé	32 ha
P3	Colza	Pois	Blé	Colza	50 ha

Tab. 1. Structure du système de culture simulé

On s'intéresse ici uniquement aux valeurs de deux variables de gestion, sans considération des résultats relatifs à la production : (i) le volume de travail total sur les quatre campagnes, en nombre de journées occupées par une intervention quelconque sur une des trois cultures ; (ii) la fréquence des opérations d'installation du pois en condition d'humidité du sol défavorable. Outre le type de variété de pois, trois facteurs de variation sont considérés : la durée de la journée de travail et la vitesse des opérations d'implantation (Tab. 2) ; le degré de tolérance de mauvaise condition d'implantation (Tab. 3).

On compare deux systèmes différenciés seulement par le type de Pois (hiver ou printemps). Le pois d'hiver est installé après un labour immédiatement suivi d'un semis (sans passage intermédiaire superficiel). De manière plus précise, on considère quatre modalités de mauvaise condition. Chaque modalité est définie

par une valeur nominale d'humidité du sol (en pourcentage de la réserve utile), au-dessus de laquelle l'intervention est pénalisante pour le pois, et par un pourcentage de tolérance qui définit un seuil d'humidité maximale au-dessus duquel l'intervention est interdite (traduit dans la condition de faisabilité de l'opération).

La simulation montre la non linéarité de la réponse du nombre de jours travaillés à la vitesse des opérations (Tab. 2). Au contraire, l'augmentation de la durée de la journée de travail garde un effet proportionnel, dans la gamme des valeurs considérées. Le Tableau 3 montre qu'une variété de pois d'hiver permet de limiter les risques d'implantation du pois en conditions défavorables (la variable NbMC passe de 7 à 2). La situation d'échec rencontrée quand on exige un sol moins humide lors de l'installation du pois, avec une tolérance plus faible, résulte de l'impossibilité de réaliser au moins une de ces interventions dans la fenêtre temporelle agronomiquement correcte sans violer sa condition de faisabilité. Le nombre de jours de travail (y compris en mauvaises conditions), calculé en tenant compte des ressources disponibles et des compétences variées des travailleurs, permet de montrer que, dans le système de culture choisi, l'implantation d'une variété de pois de printemps est plus risquée et engendre davantage de travail globalement sur l'exploitation, qu'une variété de pois d'hiver.

vitesse des labours (ha/jour)		8	10	15
vitesse des semis de blé et de colza (ha/jour)		10	15	20
durée de la journée de travail (h)	8	111	86	69
	10	91	69	58

Tab. 2. Nombre de jours travaillés (NbJT), en fonction de la durée de la journée de travail et de la vitesse des opérations (exprimée en surface opérable dans une journée de travail standard de 8h)

Intervalle de condition hydrique défavorable			Pois de printemps		Pois d'hiver	
Labour	travail superficiel	semis	NbJT	NbMC	NbJT	NbMC
0,9 (+5%)	0,8 (+20%)	0,8 (+20%)	échec		Echec	
0,95 (+10%)	0,85 (+30%)	0,85 (+30%)	86	7	74	2

Tab. 3. Fréquence d'implantation du pois en mauvaise condition (NbJT nombre de jours de travail pour le semis du pois; NbMC= nombre de jours de semis du pois en mauvaise condition) selon le groupe variétal, sous différentes définitions de la mauvaise condition. Les bornes de l'intervalle défini par « 0,95 (+5%) » sont $[wc/fc.0,95 wc/fc.0,95.(1+0,05)]$, où wc est la teneur en eau du sol et fc sa capacité au champ.

Ces observations ne sauraient constituer l'analyse complète de l'effet des facteurs considérés dans notre contexte d'étude. Ils sont seulement l'illustration d'un type de questions qu'on peut aborder par l'expérimentation virtuelle fondée sur un modèle de la dynamique d'un système.

Discussion et conclusion

Cette recherche s'inscrit dans une démarche de prise en compte de l'organisation du travail dans une exploitation agricole pour évaluer *ex ante* l'intérêt d'innovations. D'après Le Moigne (1990), on ne peut appréhender le fonctionnement de systèmes complexes, tels que l'organisation du travail dans une exploitation agricole, que par la modélisation – y compris conceptuelle – et la simulation. En effet, compte tenu des caractéristiques d'un tel système (interrelations des objets et des niveaux d'organisation, instabilité, irréversibilité et assujettissement à des facteurs incontrôlables), il est impossible d'en déterminer les propriétés d'intérêt autrement qu'en se confrontant à sa dynamique contextuelle et en examinant la portée des activités sur le système dans sa globalité, sur la base d'un modèle dynamique de ce système (Attonaty *et al.*, 1994 ; Joannon *et al.*, 2005). Simuler l'organisation du travail dans un système de production aide à examiner des questions telles que : les activités sont-elles planifiées de manières pertinentes (timing, cohérence entre elles) ? Les ressources et les activités fonctionnent-elles bien ensemble eu égard aux objectifs et contingences vraisemblables ? Quels sont les aspects les plus critiques relativement aux buts visés et quelles améliorations sont envisageables ? Telle innovation d'origine extérieure peut-elle être adoptée sans bouleversement de l'organisation du travail ? Quels sont les risques liés à l'adoption de l'innovation ? L'exemple traité montre en particulier l'intérêt d'utiliser le nombre de jours travaillés pour juger de l'intérêt de chaque type variétal. Le modèle permet également de simuler la répartition du travail au cours de l'année, et de choisir par exemple le système de culture qui permet la répartition la plus équilibrée, pour éviter les pointes de travail non gérables avec les ressources humaines disponibles. Il permet également d'analyser la sensibilité de l'organisation du travail et des performances du système, en fonction des compétences des travailleurs (polyvalent ou spécialisé pour certains types d'activités, par exemple). Il permet également de juger de la faisabilité de partager des mêmes ressources (matérielles et humaines) entre plusieurs exploitations (dans le cas de CUMA, par exemple), et d'en analyser les conséquences sur les performances.

La comparaison de types variétaux de pois est encore inachevée, mais le couplage entre un modèle de culture et le modèle d'organisation du travail devrait permettre d'estimer les conséquences des retards de semis et des

conditions d'implantation parfois médiocres sur la production (moyenne et variabilité) des différents types variétaux, Dans une première approche destinée à tester la faisabilité d'un couplage entre ces 2 types de modèles, Vocanson (2006), utilisant OTELO (Attonaty *et al.*, 1994) comme modèle d'organisation du travail, a montré que, pour des performances analogues en l'absence de contraintes de travail, la productivité des variétés d'hiver était moins affectée par les contraintes liées au travail que celle des variétés de printemps. Dans le panorama des recherches portant sur l'utilisation de modèles pour évaluer des variétés avant leur mise en culture ou même avant leur sélection, aucune autre à ce jour n'inclut la prise en compte de l'organisation du travail (Boote *et al.*, 2001 ; Mavromatis *et al.*, 2001 ; Barbottin, Le Bail et Jeuffroy, 2006 ; Fargue *et al.*, 2006).

La modélisation du travail dans un système de production agricole, même scrupuleusement guidée par l'objectif de l'étude, n'échappe pas à la difficulté de trouver la valeur optimale d'une qualité multicritère, à savoir une représentation fine du système, l'utilisation de connaissances et de données maîtrisées, fiables et de portée générale, une instrumentation informatique pratique et performante. Le modèle SILASOL ne considère pas l'organisation fine du travail comme par exemple les aspects relatifs à la préparation du matériel, ni les activités annexes telles que l'entretien du matériel ou la gestion comptable. Une autre difficulté de cette approche par simulation est la mise au point d'un plan d'expérimentation virtuelle approprié (Monod, Naud et Makowski, 2006), compte tenu du nombre de facteurs en jeu, de leurs interactions hypothétiques et de l'éventail des contextes environnementaux (essentiellement climatiques) pour lequel on veut produire des résultats valides. Une analyse de la nature stochastique du modèle est alors nécessaire.

Parce qu'une analyse de ce type est centrée sur les relations étroites entre l'organisation du travail agricole et les fonctions biophysiques de la production, elle ne peut aboutir qu'en se limitant à un atelier de production relativement simple associé à un gestionnaire unique et indépendant dans ses objectifs et ses décisions. L'approche par modélisation ne permet pas à ce jour d'aborder les questions relatives à l'interaction entre gestionnaires de plusieurs ateliers de production (coordination des objectifs, entraide et partage de ressources, échange d'information et d'expérience, décision hiérarchisée, etc.), c'est-à-dire, plus généralement les questions relatives au caractère social du travail et de son organisation dans les systèmes de production agricoles. Enfin, la modélisation des travailleurs fait complètement abstraction de leur capacité cognitive à raisonner ou à apprendre, et de facteurs tels que la fatigue.

Références

- Attonaty, J.-M., Chatelin, M.-H., Poussin, J.-C., Soler, L.-G., 1994. OTELO : un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail, in *Le conseil en agroéquipement et en organisation du travail. Outils et premières expériences* », Paris, APCA, 37-49.
- Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F., Papy, F., 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution de système de culture, *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 31, 25-43.
- Barbottin, A., Le Bail, M., Jeuffroy, M.H., 2006. The Azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars, *Agronomy for Sustainable Development*, 26, 107-115.
- Boote K.J., Kropff M.J., Bindraban P.S., 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement, *Agric. Syst.* 70, 395-420.
- Cialdella, N., Rellier, J.-P., Martin-Clouaire, R., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2009. SILASOL: A model-based assessment of pea cultivars accounting for crop management practices and farmers' resources, in *Proceedings of Farming Systems Design 2009*, Monterey, CA.
- Dedieu, B., Laurent, C., Mundler, P., 1999. Organisation du travail dans les systèmes d'activités complexes, *Economie Rurale*, 253, 28-35.
- Fargue, A., Colbach, N., Pierre, J., Picault, H., Renard, M., Meynard, J.M., 2006. Predictive study of the advantages of cleistogamy in oilseed rape in limiting unwanted gene flow, *Euphytica*, 151, 1-13.
- Hoc, J.-M., 1996. *Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique* , Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble.
- Jansen-Vullers M., Netjes M., 2006. Business process simulation – a tool survey, in *Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools*, Aarhus, Denmark, October. <http://www.daimi.au.dk/CPnets/workshop06/>.
- Joannon, A., Papy, F., Martin, P. & Souchère, V., 2005. Planning work constraints within farms to reduce runoff at catchment level, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111,1-4, 13-20.
- Le Moigne, J.-L., 1990. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris, Dunod.
- Madelrieux, S., Dedieu, B., 2008. Qualification and assessment of work organisation in livestock farm, *Animal*, 2, 3, 435-446.
- Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., 2006. *Fondements ontologiques des systèmes pilotés*. Rapport interne UBIA-INRA Toulouse. http://carlit.toulouse.inra.fr/diese/docs/ri_ontologie.pdf

- Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., 2009. Modelling and simulating work practices in agriculture, *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4, 1/2, 42-53.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., Hoogenboom, G., 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials, *Crop Science Society of America*, 41, 40 - 51.
- Monod, H., Naud, C., Makowski, D., 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models, in Wallach, D., Jones, J. (Eds), *Working with dynamic crop models*, Elsevier, 55-100.
- Vocanson, A., 2006. *Evaluation ex ante d'innovations variétales en pois d'hiver (Pisum sativum L.) : approche par modélisation aux niveaux de la parcelle et de l'exploitation agricole*, Thèse INA PG.