

Expérimentation virtuelle de l'organisation du travail en agriculture : enjeux et méthode. Application à l'analyse de l'insertion du pois dans les systèmes de grande culture

J.-P. Rellier^a, R. Martin-Clouaire^a, N. Cialdella^b, M.-H. Jeuffroy^c, J.-M. Meynard^d

^a: INRA, UR 875 Biométrie et Intelligence Artificielle, Toulouse, France

^b: CIRAD, Département Environnements et Sociétés - UMR Innovation, Montpellier, France

^c: INRA, UMR 211 Agronomie, Grignon, France

^d: INRA, Département Science pour l'Action et le Développement, Grignon, France

Résumé

Le travail dans un système de production agricole est un objet d'étude, qui 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 les études de cas et leur évaluation. L'approche présentée dans cet article s'inscrit dans une démarche d'instrumentation par simulation de l'étude de l'organisation du travail dans un système de production agricole. Il s'appuie sur un cadre conceptuel (ontologie) et un outil de modélisation/simulation DIESE. L'article présente informellement les principaux aspects du cadre conceptuel qui porte sur l'organisation du travail. Il illustre la démarche de modélisation et d'utilisation de l'outil DIESE pour étudier l'intérêt et la difficulté d'insérer du pois dans un système de production en grande culture.

1 Introduction

Les préoccupations liées à l'augmentation des tensions dans les situations de travail sont réactualisées par la forte incitation à réduire les effets négatifs des pratiques agricoles tout en maintenant, voire améliorant les performances économiques des systèmes de production. Ces performances dépendent des propriétés des espèces végétales cultivées ou animales élevées, et de celles des intrants utilisés (phytosanitaires, aliments, etc.) en interaction avec l'environnement (climat, terrains), mais aussi des propriétés de la conduite des systèmes par l'agriculteur, en interaction avec les ressources matérielles et humaines disponibles. Nous définissons ainsi l'organisation du travail dans un système de production agricole donné, comme la spécification structurelle, d'une part, des activités de gestion prévues et de leur articulation sous forme de plan flexible dans le temps et dans l'espace pour un objectif donné, et d'autre part, d'une configuration des structures physiques de l'appareil producteur (e.g. le découpage des terres en entités opérationnelles) et des moyens matériels (ressources) qui permettent d'agir sur cet appareil. En plus de ces aspects structurels, l'organisation du travail comporte une spécification fonctionnelle portant sur la manière de prendre les décisions en relation avec le contexte considéré et les conditions particulières qui peuvent survenir. Les plans véhiculent les connaissances agronomiques profondes de l'agriculteur, pilote du système (sa compréhension du fonctionnement des systèmes) et des connaissances heuristiques (qui amènent par exemple à éviter de créer des pointes de travail difficilement compatibles avec les ressources disponibles).

En agriculture, la complexité de la conduite de production et la gestion de l'organisation du travail augmentent rapidement (Dedieu *et al.*, 1999) mais sont encore très peu présentes dans les problématiques de recherche des disciplines concernées (Madelrieux et Dedieu, 2008). 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 (ou processus opérationnel) de l'entreprise, c'est-à-dire i) un ensemble logiquement et temporellement structuré de tâches à accomplir et ii) des moyens humains et matériels à mobiliser pour leur réalisation. La simulation de la gestion en situation dynamique (Hoc, 1996) permet une modélisation réaliste de la dynamique des processus de production qui inclut le processus de décision concernant la conduite de cette production. L'objet de cet article est de présenter un développement de ce type d'approche par simulation à des systèmes de production agricoles. Ce travail 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.

Simuler l'organisation du travail dans un système de production encourage et aide à examiner par exemple les questions suivantes : 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 ?

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 pour évaluer la possibilité d'insérer des variétés innovantes de pois dans les systèmes de cultures à base de céréales dans le Bassin parisien. Dans ce modèle, 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 détériorer ses conditions d'implantation ou de récolte. L'expérimentation virtuelle d'une gamme d'assolements sous différentes séries climatiques et avec des stratégies de conduite variées peut faire émerger les types variétaux du pois qui, en probabilité, améliorent le plus la performance économique globale du système de culture, y compris sur un horizon pluriannuel.

L'article présente la conception du modèle, qui repose sur la connexion entre d'une part les sous-modèles biophysiques des cultures, et d'autre part un modèle de conduite technique des différentes cultures d'une sole. Le modèle de la conduite repose sur un plan d'activités qui traduit la mise en œuvre parallèle des itinéraires techniques de chaque culture, mais nous insistons ici sur les aspects directement liés à l'organisation du travail dans le modèle. Parmi les résultats issus des simulations, on montre que certains choix sur des aspects particuliers de l'organisation du travail ont un impact sur le fonctionnement global et la performance du système.

2 Une conceptualisation du travail dans un système de production

L'étude du travail en agriculture est un objet d'étude, qui 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 en cohérence avec (Aubry *et al.*, 1998).

2.1 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 le l'agriculteur à 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, et le sujet est l'acteur mobilisé par cet élément de gestion. 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. Ce changement est intentionnellement visé par le gestionnaire, par opposition aux changements initiés par la dynamique propre de l'objet impacté. 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 sont considérés comme des RESSOURCES dont la disponibilité est nécessaire pour l'opération. Dans l'exemple du semis, l'installation du peuplement de pois requiert un tracteur et un semoir à céréale. 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, et c'est important lorsqu'on s'intéresse à la ressource particulière qu'est le temps de travail, 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 journée de travail 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, c'est-à-dire sans référence (même implicite) à un objectif assigné au système de production. C'est seulement au niveau de l'activité (primitive) qu'on met en cohérence, pour la gestion du système, les objectifs, les contraintes et les préférences. De manière générale, on distingue donc, 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. Relevant des contraintes, on spécifie qu'un tracteur lourd ne peut être piloté que par un ouvrier qualifié et que celui-ci n'est pas disponible le dimanche. 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 sa période de vie étudiée qui détermine la gestion globale du système. L'organisation spatiale, *stricto sensu*, d'un ensemble d'activités consiste à le construire de telle manière que les activités puissent s'exécuter concurremment. A cette fin, et à titre d'exemple, deux semis requérant le même opérateur sur deux parcelles différentes ne feront pas partie du même ensemble à exécuter. L'organisation temporelle, *stricto sensu*, d'un ensemble d'activités consiste à le construire de telle manière que toutes les conditions liées au temps soient toujours satisfaites. Par exemple, puisque la récolte du pois intervient après l'atteinte de la maturité, puisque la maturité succède biologiquement à la levée et parce que la levée est provoquée par un semis, le semis d'une parcelle doit être programmé avant la récolte. En pratique, la gestion d'un système de production requiert l'organisation spatio-temporelle des activités, au sens où 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'OPERATEUR SUR LES ACTIVITES. 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'impose 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 matériels, 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, c'est-à-dire une activité qui n'est elle-même argument d'aucun opérateur sur activités. 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.

2.2 L'organisation du travail dans un système de production

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). Dans cet article, on se focalise sur les dispositions portant sur le pilotage, et particulièrement sur les aspects relatifs à la gestion de la main d'œuvre.

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 notre domaine-exemple d'un système de culture 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. Leur programme de travail est 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). Le programme de travail hebdomadaire est répété 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 : « une activité de semis dont le sujet comprend au moins un ouvrier à temps partiel est inconsistante ». Pour exprimer une compétence exclusive, on précisera la condition d'inconsistance par un prédicat de validité : « une activité A dont le sujet comprend un ouvrier saisonnier CUMA est inconsistante » / « A ne doit pas être 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.

L'organisation de la journée de travail consiste 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 des interventions candidates. Par exemple, un semis candidat sur une parcelle donnée qui se terminera 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'une part d'examiner ou non immédiatement après s'il convient de mettre en œuvre d'autres activités, et d'autre part le moment de la journée avant lequel la question est pertinente. 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 rapport de la vitesse à la quantité à opérer. 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, si la vitesse exprimée pour le semis est « 20 ha par journée de travail normale » (implicitement de 8h), la vitesse calculée sera 5 ; en période de pointe de 12h/j, seules les parcelles de moins de 30ha pourront être semées dans une même journée.

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 dynamiquement 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 –le climat, les avertissements) impacte aussi l'organisation du travail. Soit directement quand on considère ces tâches comme des activités, à ordonnancer vis-à-vis des autres et requérant des ressources (au moins du temps). Soit indirectement quand la mise en œuvre d'une activité (ou la faisabilité technique d'une opération) est conditionnée par l'obtention et le contenu de cette information.

On rappelle enfin que la configuration de l'outil matériel de production (le parcellaire) et du pool de ressources autre que la main d'œuvre modifie le contexte dans lequel sera raisonnée l'utilisation de la main d'œuvre. De plus, différentes configurations du plan d'activités n'ont pas les mêmes conséquences sur les marges de manœuvre dans l'organisation quotidienne du travail (étalement des pointes de travail, flexibilité sur les fenêtres d'action, rigidité des contraintes d'inconsistance, etc.).

3 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'adéquation des propriétés des ressources à 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 idéales ou innovantes. De plus, la sensibilité et la mémoire de l'outil matériel de production (les sols, les végétaux) vis-à-vis d'événements climatiques, même ponctuels, 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 déficiente, 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 de tels systèmes permet d'affronter cette complexité.

3.1 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 par ordre croissant de leurs instants 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'opération technique. A chaque classe d'événements est associée une (typiquement) 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 (cet intervalle est le 'pas' du processus). 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.

3.2 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 celles 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 (par reprogrammation automatique dans l'agenda) 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 qui pourra remettre en cause leur candidature à la mise en œuvre.

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 que le gestionnaire a mémorisé ou qu'il recherche au moment même de la décision. 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. On comprend que la réduction du pas a un coût en temps de calcul et, pour certains modèles, en affecte la validité. Dans les systèmes de cultures, le pas des 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. L'algorithme d'allocation intensifie l'usage des ressources : il rejette un jeu d'activités tel qu'on pourrait l'étendre avec une autre activité ouverte requérant une ressource disponible. 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 arbitrairement le premier jeu parmi ceux qui contiennent l'opération de plus forte priorité, mais une décision multicritère est plus généralement opérée en réalité.

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 de 0 à 1, en fonction de la vitesse déclarée. En conséquence, les ressources mobilisées par l'opération ne seront libérées qu'une fois l'opération terminée, et dans l'exemple du semis d'une parcelle de pois, les placettes adjacentes 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.

3.3 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. Si une activité A peut être opérée par un ouvrier d'une des sous-classes R1 et R2 de R, l'algorithme générera l'alternative $\{A1|r1\}$ vs. $\{A1|r2\}$ et le gestionnaire choisira en fonction d'un certain critère. Si une autre activité candidate A2 requiert un ouvrier de la classe R2, l'algorithme générera le jeu d'activités $\{A1|r1 A2|r2\}$.

4 Exemples de résultats attendus de la simulation d'un système de production

On s'appuie ici sur un travail, en cours de réalisation, d'analyse et de conception de systèmes de grande culture incluant la culture de différentes variétés de pois protéagineux, si besoin innovantes. La concurrence

d'autres cultures jugées prioritaires en termes d'utilisation des ressources conduit parfois à implanter le pois dans de mauvaises conditions ; les variétés classiques sont très sensibles à ces conditions d'implantation. Des caractéristiques variétales moins sensibles, ou une meilleure organisation du travail permettant des marges de manœuvres pour le semis du pois sont alors recherchées.

Les considérations développées dans cet article nous ont conduits à construire, dans l'environnement DIESE, un modèle de simulation, SILASOL, dans lequel les ressources considérées sont les travailleurs (ouvriers permanents et saisonniers, avec leurs calendriers de travail et compétences propres) et le matériel agricole (avec leurs contraintes d'utilisation et leurs performances propres). Il s'agit donc d'étudier les facteurs de variabilité des performances de diverses variétés de pois, puis de proposer des combinaisons de modalités constituant des systèmes de culture acceptables. Pour une variété de pois donnée, ces facteurs relèvent de deux groupes : la place faite au pois dans l'assolement, relativement aux autres cultures (en termes de surface et de cultures précédentes et suivantes), 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).

Nous donnons ici un aperçu de l'utilisation du simulateur pour explorer ces questions, sur un système simulé de structure très simplifiée, sur un petit nombre de facteurs étudiés, et sur deux critères d'appréciation seulement. 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 (tableau 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, de telle sorte que le pois succède réellement au colza lors de trois 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

Tableau 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 :

- le volume de travail total sur les quatre campagnes, en nombre de journées occupées peu ou prou par une intervention quelconque sur une des trois cultures,
- la fréquence des opérations d'installation du pois en condition d'humidité du sol défavorable.

Les facteurs de variation considérés sont :

- la durée de la journée de travail et la vitesse des opérations d'implantation (tableau 2)
- la superficie du bloc-rotation (tableau 3)
- le degré de tolérance de mauvaise condition d'implantation (tableau 4)
- le groupe variétal du pois : printemps vs. hiver (tableau 4)

vitesse des semis de blé et de colza (ha)	durée de la journée de travail (h)	vitesse des labours profonds et superficiels (ha)		
		8	10	15
10	8	111	92	80
	10	91	75	69
15	8	103	86	72
	10	83	69	61
20	8	100	81	69
	10	80	69	58

Tableau 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)

Durée de la journée de travail (h)	Surfaces des parcelles (ha)			NbJT
	P1	P2	P3	
8	10	16	25	53
	20	32	50	86
10	10	16	25	48
	20	32	50	69

Tableau 3 : Tendence d'évolution du nombre de jours travaillés (NbJT) en fonction de la surface des parcelles

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

Tableau 4 : Fréquence d'implantation 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 $[wc/fc, 0,95 \cdot wc/fc, 0,95 \cdot (1 + 0,05)]$, où wc est la teneur en eau du sol et fc sa capacité au champ. La situation d'échec résulte de l'impossibilité de réaliser une intervention sans violer sa condition de faisabilité. Elle est rencontrée quand on exige un sol moins humide avec une tolérance faible.

Dans ces conditions, on compare deux systèmes différenciés seulement par le type de Pois (hiver ou printemps). Le pois d'hiver est installé par un labour immédiatement suivi d'un semis (sans passage intermédiaire superficiel). De manière plus précise, on considère quatre modalités de mauvaise condition, plus ou moins tolérantes vis-à-vis de la norme agronomique. 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).

5 Conclusion

Ce travail s'inscrit dans une démarche d'étude par simulation de l'organisation du travail dans un système de production agricole. D'après Le Moigne (1990), on ne peut appréhender le fonctionnement d'un tel système complexe 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. Analyser la manière dont l'agriculteur décide des interventions sur l'appareil producteur (les activités considérées, leur agencement et dans le temps et dans l'espace, les conditions restreignant leur mise en œuvre, les ressources humaines et matérielles mobilisées) permet d'expliquer en grande partie les différences de performance entre agriculteurs et les difficultés rencontrées.

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, 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. Ne sont ainsi pas abordées 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.

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* », p37-49. Juillet 1994. APCA, Paris.
- 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.
- 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.
- Hoc J.-M. (1996) *Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique*. Presses Universitaires de Grenoble, 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/>.
- 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-Auzeville. http://carlit.toulouse.inra.fr/diese/docs/ri_ontologie.pdf
- Martin-Clouaire R., Rellier J.-P. (2009) Modelling and simulating work practices in agriculture. *Int. J. of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1/2), 42-53.