

MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA CONDUITE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION AGRICOLE

Roger MARTIN-CLOUAIRE, Jean-Pierre RELIER

Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle
INRA, Auzeville, BP 27,
31326 Castanet-Tolosan cedex, France
{rnc, rellier}@toulouse.inra.fr

RESUME : *Un cadre de modélisation et de simulation du fonctionnement dynamique d'un système de production agricole est présenté. L'accent est mis sur la représentation du comportement décisionnel d'un agriculteur dans sa tâche de conduite de la production. La modélisation s'appuie sur une ontologie des concepts du domaine, en particulier celui de stratégie qui régit la prise de décision dans un contexte fortement aléatoire à cause du climat principalement. La stratégie spécifie de manière flexible le plan qui organise les activités dans le temps, les contraintes qui doivent être satisfaites pour rendre leur exécution licite (en particulier sur les ressources), les ajustements du plan en fonction d'événements incontrôlables, les préférences à mettre en œuvre pour choisir les actions à exécuter et les règles opératoires qui complètent la détermination des actions en fonction de la situation au moment de l'exécution. Un mécanisme de simulation à événements discrets réalise l'interprétation pas-à-pas de la stratégie et l'exécution progressive des activités issues de la prise de décision. Seule l'interprétation est abordée dans cet article.*

MOTS-CLES : *système de production, stratégie de conduite, activités, ressources*

1. INTRODUCTION

Pour un agriculteur conduire un système de production consiste à prendre et mettre en œuvre au cours du processus de production les décisions successives de dimensionnement et d'opérations techniques à réaliser sur ce processus en fonction de la situation rencontrée et de ses objectifs et contraintes. La conduite d'une production agricole est une tâche notablement complexe parce que le comportement du système dépend beaucoup de facteurs exogènes sur lesquels le décideur n'a pas prise, le climat étant le plus important d'entre eux. Comme en production manufacturière, la modélisation et la simulation constituent un outil précieux pour étudier le fonctionnement des systèmes de production agricoles et aider à mieux comprendre les conditions de leur viabilité, améliorer leur efficacité et leur robustesse à l'aléa, ou trouver des manières innovantes de les conduire en présence de conditions nouvelles économiques, sociales ou réglementaires. Au cœur de ce type d'étude se trouve le problème de la représentation du comportement décisionnel d'un agriculteur dans sa tâche de conduite. Il est largement admis que le pilotage du système de production repose sur l'application de ce que nous appelons une stratégie de conduite, une sorte de programme d'action préétabli manuellement et spécifiant comment doivent être planifiées les activités de conduite, comment cette organisation doit être adaptée dans certaines situations identifiées, et quelles conditions et contraintes doivent être prises en compte dans la détermination pas-à-pas des actions à réaliser et des modalités d'exécution en fonction des circonstances rencontrées. Pour étudier le fonctionnement d'un système de production, il faut modéliser

le processus de décision et ses interactions avec les processus biophysiques objets du contrôle, le déroulement des actions résultant de la prise de décision, et les facteurs importants de l'environnement extérieur. L'agriculteur décide en fonction de la stratégie qu'il a conçue pour ses objectifs, de l'état perçu ou prévisible de l'appareil biophysique, des ressources disponibles pour l'action et de l'occurrence d'événements incontrôlables.

De nombreux modèles de simulation de système de production agricole ont été développés dans les quinze dernières années. Dans la plupart des cas (e.g. McCown et al. 2002), la modélisation du processus de décision n'a abordé que des problèmes étroits (s'intéressant isolément à un aspect de la conduite, e.g. la fertilisation) ou simplifiés par rapport à la réalité (ne traitant pas, par exemple, de la gestion des ressources), ou bien abordés à un niveau assez éloigné des considérations opérationnelles (ne traitant que du dimensionnement du système de production). Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans un projet visant à développer un cadre générique de modélisation des systèmes de production agricole et une plateforme informatique de simulation de ces systèmes dans différents scénarios climatiques.

La problématique de la spécification d'une stratégie de conduite rejoint les préoccupations abordées dans le champ de recherche en intelligence artificielle sur la modélisation des agents intelligents opérant en dans un environnement dynamique et partiellement imprévisible et, plus particulièrement, sur les langages de programmation d'agents (voir, par exemple, De Giacomo et al., 2000). Le type de modélisation dont il est question dans

cet article s'apparente à la modélisation d'entreprise (GRP, 2001) pratiquée en productique où elle constitue un outil fondamental d'analyse, de conception et de gestion de l'entreprise, en particulier dans sa fonction productive. La modélisation d'entreprise a fait l'objet de développements importants, en particulier, en connexion avec les travaux de modélisation se fondant sur l'ingénierie des connaissances et de l'analyse ontologique (Fox et Gruninger, 1998 ; Ushold et al., 1997 ; Smith et Becker, 1997). Toutefois la modélisation d'entreprise se cantonne souvent au développement de modèles descriptifs sans aller jusqu'à des approches calculatoires telles que celles de simulation que nous utilisons.

Dans la section 2 une vue systémique des systèmes de production est introduite. La section 3 présente les grandes lignes du cadre conceptuel utilisé pour la modélisation des stratégies de conduite, ce cadre constituant une partie de l'ontologie développée pour caractériser la structure et le fonctionnement des systèmes pilotés. La section 4 porte sur l'interprétation des spécifications d'une stratégie, ce qui consiste à déterminer à des moments particuliers les ensembles d'actions qu'il est licite d'exécuter compte tenu de ces spécifications.

2. SYSTÈME DE PRODUCTION AGRICOLE

Un système de production agricole peut être caractérisé d'un point de vue systémique comme schématisé dans la figure 1 où est pris l'exemple d'une production de tomates sous serre. Le système est situé dans un environnement incluant, en particulier, le contexte climatique. Trois sous-systèmes le composent : le pilote, le système opérant et l'appareil producteur ou système biophysique. Tout système a des entrées, des sorties et un agenda d'événements qui contrôlent (activent) des processus. Les événements peuvent provenir de l'environnement et en générer d'autres dans l'agenda du système ou d'autres systèmes. L'agenda d'un système de production inclut les agendas des sous-systèmes le composant.

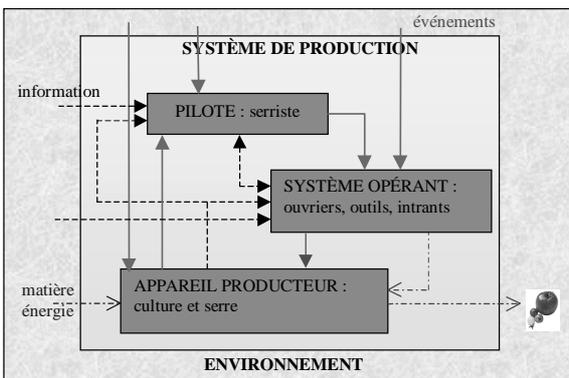


Figure 1. Système de production agricole

L'état d'un système est partiellement accessible par les autres comme l'indique les flèches en pointillés qui figurent aussi l'accès à l'information sur l'environnement. Un état est défini par les instances des objets qui existent

et par leurs propriétés. Les entrées et les sorties d'un système sont de la matière et de l'énergie. Les entrées proviennent d'un autre système ou de l'environnement. Les sorties constituent les entrées d'autres systèmes ou vont dans l'environnement. Les sorties du système de production sont celles de l'appareil producteur, certaines étant le résultat la production souhaitée, d'autres des résidus indésirables.

L'appareil producteur est composé d'entités biophysiques (e.g. des plantes dans un milieu physique) qui ont leurs propres processus (e.g. photosynthèse, dynamique du micro-climat). Parmi les événements contrôlant ces processus se trouvent ceux résultant des opérations exécutées par le système opérant. Les entrées sont des intrants tels que les produits fertilisants introduits par le système opérant et l'énergie apportée par l'environnement ou le système opérant. Les processus biophysiques peuvent générer des événements déclenchés par des changements notables de l'état du système. L'appareil producteur est généralement équipé de capteurs et de dispositifs d'alarmes qui génèrent des informations exploitées par d'autres systèmes.

Le pilote, ici le chef de culture, est responsable de la réalisation des objectifs de production. A cet effet, il possède une stratégie de conduite (voir la section suivante pour une présentation plus détaillée) qui contraint la détermination des actions exécutées par le système opérant et oriente ainsi indirectement le comportement de l'appareil producteur. La stratégie de conduite spécifie la façon flexible d'organiser les activités, les adaptations qu'elle doit subir lorsque certains événements se produisent, et les principes à respecter par le système opérant pour établir précisément les actions à exécuter. Elle définit aussi le rythme auquel le pilote doit l'examiner. Les processus attachés au pilote portent sur :

- la surveillance de l'occurrence d'événements décisifs et l'inspection de l'appareil producteur sur les aspects importants pour la conduite ;
- la révision de la stratégie dans des situations connues pour l'exiger ;
- la mise à jour des activités en fonction de l'avancée du temps et des changements survenus ;
- l'extraction par lecture de la stratégie des jeux d'activités candidats à exécution et la sollicitation du système opérant pour qu'il traite ces jeux.

Ces processus sont activés soit à des dates programmées à l'avance soit en réponse à des alarmes réclamant un traitement immédiat. En plus d'avoir accès aux données issues des capteurs des autres systèmes, le pilote a accès à certaines informations sur les autres systèmes à partir desquelles il synthétise des indicateurs pertinents pour ses décisions.

Le système opérant est en charge de la transformation des jeux d'activités candidats en un jeu complètement déterminé d'activités exécutables. Bien qu'étant subordonné au pilote, le système opérant est autorisé à prendre des décisions opératoires qui doivent être en conformité avec les principes contenus dans la stratégie et transmis

par le pilote. Le système opérant utilise ses propres procédures de prise de décision pour construire les jeux d'activités exécutables et en choisir un. Les processus dont il est doté portent sur :

- l'allocation de ressources (e.g. ouvriers, outils) en accord avec la disponibilité des ressources et les contraintes mutuelles entre elles ;
- la génération à partir d'un jeu d'activités initial de plusieurs jeux candidats lorsqu'une incompatibilité est détectée dans une tentative d'allocation ;
- la sélection du jeu d'activités préféré lorsque plusieurs demeurent ;
- la détermination des modalités (paramètres) des activités dépendant de la situation courante ;
- l'exécution du jeu choisi jusqu'au prochain changement sur la disponibilité des ressources.

La nature de l'investigation à laquelle le modèle est censé contribuer et, plus généralement, l'utilisation souhaitée de ce modèle (par exemple, support d'analyse de cas ou support de formation) induisent des besoins différents de modélisation. Par exemple, la représentation des ressources n'est utile que si l'on veut évaluer l'adéquation entre les moyens humains et matériels et les intentions d'actions dont les conditions de faisabilité dépendent de l'état courant de l'appareil producteur. Si on a l'objectif d'améliorer une façon particulière de conduire le système, il faut pouvoir évaluer l'influence des préférences et priorités du pilote, de sa conception de l'urgence, d'un retard pris dans la réalisation d'une partie du plan selon sa date de démarrage, ou encore de son appréciation des ressources à consacrer à cette partie du plan. Il faut dans ce cas une représentation assez élaborée de l'organisation flexible des activités, du processus de réalisation des actions, des contraintes et des connaissances invoquées dans les choix. La composante biophysique du modèle doit incorporer alors tous les aspects pouvant jouer sur la prise de décision ou influencer sur le déroulement de l'action. Le cadre développé permet une modélisation à des niveaux de détail plus ou moins fins. Les capacités de modélisation requises pour une investigation relative au processus de conduite sont significativement plus sophistiquées que celles classiquement utilisées dans les simulateurs agronomiques développés jusqu'à présent. Il est peu probable qu'une modélisation très caricaturale du processus de conduite puisse révéler des aspects intéressants, permettre de les comprendre et alimenter la réflexion sur son amélioration ou son adaptation à une situation nouvelle. Pour cet objectif l'utilisateur doit pouvoir évaluer des changements de la structure du modèle de décision, et pas seulement jouer sur un jeu de paramètres renseignant des procédures de décision figées.

3. STRATÉGIE DE CONDUITE

Un cadre conceptuel à vocation générique de description des systèmes de production a été développé sous la forme d'une ontologie du domaine (Martin-Clouaire et Rellier, 2002). Elle définit de manière rigoureuse les concepts et structures suffisants pour l'explicitation d'un

système de production et de son fonctionnement. Ce cadre conceptuel constitue en quelque sorte les matériaux de construction d'un modèle de système de production particulier dans le sens où tout modèle doit pouvoir s'obtenir par la particularisation des concepts génériques fournis. Les notions fondamentales formalisées concernent les concepts d'entité, de processus, d'événement et des particularisations de ceux-ci au domaine du pilotage d'un système par un décideur. Parmi ces concepts spécifiques se trouve la notion de stratégie et un ensemble de notions directement impliquées dans la modélisation de la conduite d'un système de production. Une présentation informelle en est faite dans cette section. Des caractères en italique sont utilisés pour mettre en évidence les concepts principaux lorsqu'ils sont mentionnés pour la première fois.

Au centre de la problématique de conduite se trouve le concept d'*activité*. Dans sa forme la plus simple, une activité, alors qualifiée de *primitive*, spécifie quelque chose à faire sur une entité biophysique (par exemple, une plante ou une parcelle) par un exécutant (un ouvrier, un robot ou un ensemble de ces entités). Outre ces trois composantes, une activité est caractérisée par des contraintes d'ouverture ou de fermeture définies par des fenêtres temporelles (dates au plus tôt et au plus tard) et/ou des conditions relatives à un état (e.g. atteinte d'un stade physiologique, disponibilité d'une ressource). Ces contraintes servent (avec d'autres) à déterminer les activités potentiellement exécutables ou à ne plus considérer. Toute activité, primitive ou non, a un état dont les valeurs possibles sont : dormante, en-attente, ouverte, fermée ou annulée (explicitées en Section 4.2).

La composante concernant ce qu'il faut faire désigne une transformation intentionnelle appelée une *opération* (par exemple, une plantation, un ébourgeonnage, une récolte). Pour être exécutable une opération doit satisfaire des préconditions sur l'état de l'appareil producteur (e.g. seuil d'hygrométrie dans la serre). L'exécution d'une opération se traduit par l'assignation de nouvelles valeurs à des variables d'état de l'appareil producteur. Par exemple, une opération d'éclaircissage à 4 fruits sur un bouquet de tomates a pour effet de mettre le nombre de fruits à la valeur 4 si ce nombre était supérieur. Le changement causé par une opération n'est généralement pas instantané et se réalise progressivement durant la période d'exécution ; toute opération a une vitesse d'exécution (par exemple 30h/ha avec un ouvrier pour l'éclaircissage). Les nouvelles valeurs des variables d'état dépendent de paramètres à déterminer au moment de l'exécution en fonction de la situation courante, par utilisation de connaissances empiriques sous la forme de *règles opératoires*. Certains de ces paramètres peuvent avoir des valeurs qualifiées de nominales (par exemple, la valeur 4 dans l'éclaircissage considéré plus haut) mais ces références peuvent être modifiées par les règles opératoires.

Les activités dont il a été question jusqu'ici sont primitives. Elles peuvent faire l'objet de contraintes supplémen-

taires en prenant en compte des relations temporelles entre elles (séquençement, synchronisation, délais inter-activités, parallélisme) et en utilisant des structures de programmation spécifiant des choix non-déterministes entre activités alternatives, des itérations d'une activité, le regroupement d'activités ou encore le caractère optionnel d'une activité. Ces contraintes sont exprimées par des opérateurs qui, appliqués à des activités, donnent naissance à d'autres activités. Les opérateurs de composition les plus importants sont : *before, meet, overlap, co-start, co-end, equal, or, and, iterate* et *optional*. L'ouverture et la fermeture d'une activité¹ construite par composition à l'aide d'un opérateur sont induites par les conditions d'ouverture et de fermeture des activités primitives sous-jacentes et par la sémantique des opérateurs de composition. La macro-activité dont descendent toutes les activités primitives est appelée *plan nominal*. Il est possible qu'il faille spécifier pour un plan nominal des incompatibilités entre activités qui ne peuvent pas être exécutées simultanément. Pour faire face à l'incertitude, les activités d'un plan nominal doivent être flexibles dans leur spécification, ce qui est obtenu grâce aux conditions souples d'ouverture et de fermeture et aux opérateurs temporels de composition. Le choix non-déterministe induit par l'opérateur *or* entraîne que plusieurs jeux d'activités soient candidats à l'exécution à un moment donné. Les restrictions sur l'utilisation des ressources ont la même conséquence, tout jeu ne pouvant être alloué complètement est remplacé par un ensemble de jeux contenant moins d'activités. Le choix du jeu le plus approprié se fait sur la base de *règles de préférence* qui représentent des critères divers basés, par exemple, sur des motivations de continuité dans l'exécution, sur des considérations de rentabilité ou encore d'urgence.

En plus de la flexibilité du plan quant aux instants où démarre l'exécution de chaque activité il peut être nécessaire d'adapter la stratégie si des circonstances particulières surviennent. De fait un plan nominal ne donne que l'itinéraire grossier à suivre dans les conditions normales. La spécification de quand et de quoi doit être changé dans la stratégie se fait à travers un *ajustement conditionnel*. Sa partie déclencheur est soit un prédicat temporel qui devient vrai dès qu'un date de référence est atteinte soit une condition relative à un état qui est satisfaite quand l'état courant correspond à la situation décrite par la condition. La partie conséquence d'un ajustement conditionnel peut être n'importe quel changement sur le plan nominal (suppression ou insertion d'activités), sur les ressources à utiliser dans l'exécution de certaines activités, sur les règles opératoires attachées à une opération ou encore sur les ajustements conditionnels eux-mêmes. Grâce aux ajustements conditionnels, la conduite peut faire face aux fluctuations inattendues (bien que

connues comme possibles) du climat et à diverses contingences.

Les états référencés dans les conditions d'ouverture et de fermeture des activités, dans les règles opératoires et dans les ajustements conditionnels sont des informations sur l'appareil producteur directement accessibles au pilote (via les capteurs ou ses propres observations) ou qu'il synthétise subjectivement sous la forme d'*indicateurs* de prise de décision (par exemple, un indice de risque de maladie). Un indicateur peut se baser sur des faits passés concernant par exemple des états biophysiques ou des activités exécutées. Il peut aussi tenir compte de prédictions.

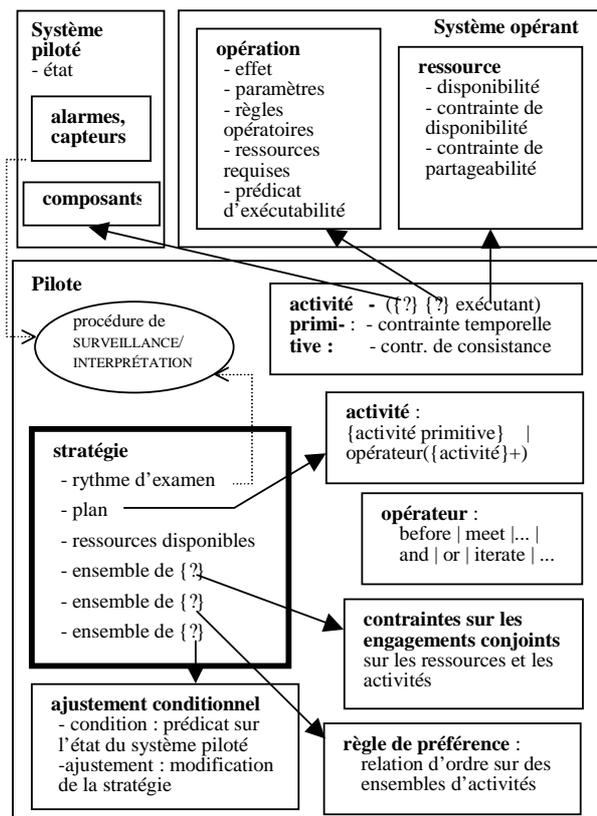


Figure 2 : Composants du pilote et principales références aux autres sous-systèmes
 {?} : référence à une instance de la notion pointée par →

Les activités primitives accompagnées des contraintes temporelles, des structures de programmation, des contraintes d'incompatibilité, des règles opératoires, des contraintes entre les ressources, les ajustements conditionnels et les règles de préférence constituent une *stratégie de conduite* (voir Figure 2). Une stratégie est aussi caractérisée par les rythmes auxquels le pilote doit d'une part, surveiller l'occurrence d'événements décisifs nécessitant une adaptation de la stratégie et d'autre part, inspecter l'appareil producteur et le plan nominal de façon à procéder au suivi nécessaire (mise à jour de l'état des activités).

Au niveau opérationnel, une stratégie décrit de manière à la fois déclarative et procédurale le comportement que

¹ Pour être exact, il faudrait parler de spécification d'activité plutôt que d'activité pour garder à ce dernier terme le sens d'intervention exécutée alors qu'il s'agit ici de tâche intentionnelle incomplètement déterminée et éventuellement jamais exécutée (cas d'utilisation dans les opérateurs *or* et *optional*).

les exécutants doivent avoir pour atteindre les objectifs selon la projection du pilote. Une stratégie, plus spécifiquement son plan nominal, n'est pas simplement une séquence d'activités complètement spécifiée à l'avance comme cela est supposé dans beaucoup de modèles de systèmes de production agricole. Lors de sa construction, la stratégie doit rester assez abstraite sur quelles opérations doivent être exécutées à un instant donné, et sur quelles entités précises elles doivent porter. La programmation des opérations dépend des conditions spécifiques rencontrées au moment où l'exécution est envisagée. Il est impossible de dire à l'avance quand une opération sera exécutée, avec quelle durée et en parallèle avec quelles autres opérations. Les objets transformés par les opérations n'apparaissent pour certains qu'en cours d'exécution d'une stratégie. La partie de la stratégie correspondant à l'instant courant doit alors être expansée jusqu'à ce que soit complètement déterminé ce qu'il convient d'exécuter et comment ; c'est l'essence de la procédure d'interprétation présentée dans la section suivante.

4. INTERPRÉTATION D'UNE STRATÉGIE

4.1 Procédure globale

Conduire le système de production signifie exécuter pas-à-pas la stratégie. Dans le cadre conceptuel présenté plus haut la simulation de cette tâche consiste à exécuter itérativement les deux processus suivants :

- révision des parties de la stratégie qui doivent l'être selon les spécifications d'ajustements conditionnels ;
- détermination à partir du plan de l'ensemble d'activités primitives à exécuter et lancement de l'exécution.

Ces deux processus réalisent l'interprétation du programme particulier qu'est une stratégie. Le premier est déclenché à chaque occurrence de circonstances spécifiques qui, pour le décideur, peuvent justifier une modification de la stratégie. Le déclenchement d'une règle d'ajustement peut être immédiate si l'événement réclame un examen réflexe. Elle n'intervient sinon qu'à des moments programmés déclarés dans la stratégie. Le second processus est contrôlé par des événements liés à des discontinuités particulières telles que l'examen périodique de la situation, ou un changement dans la disponibilité des ressources (absence de certains ouvriers, début d'une journée de travail). Dans un premier temps le plan nominal est visité pour mettre à jour l'état de chaque activité (voir la sous-section suivante). Dans un deuxième temps sont formés les jeux d'activités primitives exécutables. Ces jeux sont initialement constitués en prenant les activités primitives ouvertes et en tenant compte des éventuelles spécifications de disjonctions. Au sein du mécanisme d'allocation de ressources, ces jeux sont ensuite éclatés et/ou épurés si l'allocation ne parvient pas à les doter en totalité compte tenu des différentes contraintes sur les ressources et les incompatibilités entre certaines activités. Dans un troisième temps, un des jeux exécutables est choisi en fonctions des règles de préférences décrites dans la stratégie. Enfin, l'exécution

est lancée en parallèle sur l'ensemble des activités primitives du jeu choisi, ce qui amène la déclenchement des règles de détermination des paramètres des opérations. L'exécution se poursuit jusqu'à ce qu'arrive un événement touchant la disponibilité de certaines ressources (par exemple, la fin d'une opération ou la fin de la journée de travail qui libère les ouvriers). Un plan nominal échoue si une activité ne peut plus être ouverte alors qu'elle n'est pas optionnelle ou si elle ne peut plus être fermée sans violer une contrainte la liant à une autre activité via un opérateur de composition.

4.2 Mise à jour de l'état des activités

L'avancée du temps et l'évolution de l'état du système de production sont susceptibles de rendre vraies les conditions locales régissant le changement d'état des activités primitives. La mise à jour de l'état des activités est réalisée soit lors des examens périodiques de la stratégie soit lorsque une opération est terminée. Tout changement d'état d'une activité est propagé aux activités qui lui sont liées directement ou indirectement via les opérateurs de composition.

Rappelons qu'une activité est dormante, en attente, ouverte, fermée ou annulée. La valeur *dormante* est celle donnée à toute activité à sa création. Elle signifie que les conditions d'ouverture de l'activité n'ont pas encore à être examinées. L'état passe à la valeur *en-attente* dès que les conditions d'ouverture de l'activité doivent être examinées. Par exemple, dès qu'une activité se termine (et pas avant), il convient de surveiller les conditions d'ouverture de celle qui la suit dans une séquence (avec l'opérateur *before*). Le plan en tant qu'activité est déclaré *en-attente* à l'initialisation de la simulation. L'état d'une activité passe à la valeur *ouverte* lorsque ses conditions d'ouverture sont satisfaites. L'état passe de la valeur *ouverte* à la valeur *fermée* lorsque les conditions de fermeture de l'activité sont satisfaites, ou bien, s'il s'agit d'une activité primitive, lorsque l'opération en jeu est terminée. L'état d'une activité passe à la valeur *annulée* lorsqu'il n'y a plus lieu d'opérer un quelconque changement d'état. Typiquement, cela se produit lors d'un choix entre deux ou plusieurs activités alternatives (opérateur *or*) : l'état des activités non choisies passe à *annulée*.

Le changement de l'état des activités lors d'examen périodique du plan est réalisé par une procédure qui vérifie si les conditions d'ouverture ou de fermeture (conditions sur dates et/ou prédicats surétats) sont satisfiables et si les contraintes liant cette activité à d'autres activités par les opérateurs de composition seraient satisfaites si le changement était opéré. Cette procédure, appliquée sur la macro-activité qu'est le plan, induit un examen récursif de l'ensemble des activités qui ne sont pas dormantes ou annulées. Toute activité dont le changement d'état est validé est mise à jour et le changement est immédiatement propagé aux activités liées. Un exemple est donné ci-après : il porte sur les 3 activités primitives *a*, *b*, *c* liées par le plan $P = \text{and}(\text{co-start}(c, b), \text{meet}(a, b))$ et ayant

pour fenêtres d'ouverture et de fermeture les intervalles montrés en Figure 3.

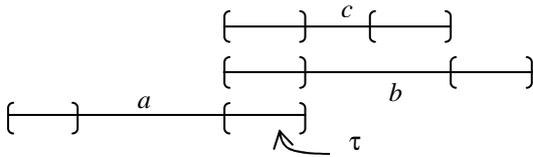


Figure 3. Fenêtres temporelles des activités a , b et c

Il est supposé que juste avant le temps τ , les activités a et and sont déjà ouvertes, b , c et $co-start$ sont dormantes. En τ , on est dans la fenêtre de fermeture de a , ce qui autorise le test du prédicat de fermeture. On suppose que celui-ci est vérifié. On cherche alors à vérifier (hypothèse H1) que le passage de a à fermée ne violerait aucune contrainte sur les activités qui lui sont liées, c'est-à-dire b directement et c via b . L'activité $meet$ contraint b à être ouverte dès la fermeture de a . L'activité $co-start$ contraint c à être ouverte dès l'ouverture de b . En τ , on est dans la fenêtre d'ouverture de b , ce qui autorise le test de son prédicat d'ouverture. On suppose que celui-ci est vérifié. On cherche alors à vérifier que l'activité $co-start$ peut, selon sa définition, être ouverte, ce qui amène à vérifier que c , en conformité avec la même définition, peut être ouverte, et que l'activité and peut être ou est ouverte, ce qui est le cas. En τ , on est dans la fenêtre d'ouverture de c , ce qui autorise le test du prédicat d'ouverture. On suppose que celui-ci est vérifié. H1 est donc vérifiée. On est alors en droit de réaliser le passage de a à fermée, puis d'en propager les conséquences, lesquelles découlent de la définition des opérateurs. On passe d'abord b à ouverte, ce qui provoque le passage de $co-start$ à ouverte, ce qui provoque enfin le passage de c à ouverte. Noter que la fermeture d'une activité primitive intervient aussitôt que possible, même si la réalisation de l'opération n'est pas terminée.

5. CONCLUSION

Dans le cadre présenté, la modélisation du comportement de conduite de la production agricole s'appuie sur la notion de stratégie qui spécifie un plan nominal sous la forme d'une organisation procédurale flexible des activités et un ensemble d'ajustements à faire en réaction à certains événements possibles. Pour être exécutable une activité doit satisfaire des conditions temporelles, des conditions relatives à des états perçus du système de production, des contraintes de cohérence avec d'autres activités auxquelles elle est liée, et des contraintes mutuelles entre les ressources. Une fois réunies les conditions pour que l'exécution d'une activité soit reconnue licite selon le plan il faut, pour passer à l'action, déterminer certains paramètres ou modalités de l'opération qui dépendent de la situation courante au moment de l'exécution. Conformément à la réalité, l'exécution d'une stratégie dépend des facteurs incontrôlables de l'environnement extérieur (événements et entrées matérielles ou énergétiques) qui rendent impossible de calculer pré-

sément a priori l'enchaînement d'actions, les ressources utilisées et le comportement du système biophysique. L'évaluation de l'intérêt d'une stratégie doit se faire pour une gamme de possibilités pour ces facteurs incontrôlables ; des générateurs de climats aléatoires peuvent être utilisés à cet effet.

La modélisation faite à partir de ce cadre permet d'étudier les interactions entre divers phénomènes devant faire l'objet d'un suivi et éventuellement de décisions de conduite et d'interventions sur le système. Elle permet d'explorer les intérêts et les limites (voire la faisabilité) de différentes organisations du système de production (dont l'organisation spatiale et temporelle des tâches et l'utilisation des moyens) et, en particulier, de tester des manières innovantes de procéder. Le cadre conceptuel doit permettre d'éviter les ambiguïtés, faciliter la conception de modèle et la réutilisation de composantes existantes et, du fait du partage du langage, faciliter la communication à propos du fonctionnement des systèmes de production agricole. Il fonde le travail en cours de développement d'un outils de simulation à événements discrets.

Le fait que les notions formalisées dans l'ontologie ne sont pas spécifiques à l'agriculture laisse conjecturer que le cadre est pertinent pour une classe plus large de systèmes de production. Toutefois, l'hypothèse de décideur unique sous-jacente à la situation de conduite considérée induit des limitations fortes face à des problèmes comportant des processus de décision à plusieurs agents et plusieurs niveaux hiérarchiques.

RÉFÉRENCES

- Fox M.S., M. Gruninger, 1998. Enterprise modeling. *AI magazine*, 19, p. 109-121.
- GRP - Groupe de Recherche en Productique – Groupe Modélisation d'Entreprise, 2001. <http://www.eerie.fr/grp/>
- De Giacomo G., Y. Lespérance, H. Levesque, 2000. Congolog, a concurrent programming language based on the situation calculus. *Artificial Intelligence*, 121, p. 109-169.
- Martin-Clouaire R., Rellier J.-P. (2002) Fondements ontologiques des systèmes pilotés. Rapport interne de l'UBIA- INRA Toulouse.
- McCown R.L., Hochman Z., Carberry P.S. (eds) (2002) Probing the enigma of the decision support system for farmers: learning from experience and from theory. Special issue of *Agricultural Systems*, 74.
- Smith S., M. Becker, 1997. An ontology for constructing scheduling systems. *Proc. of AAAI Symp. on Ontological Engineering*, Stanford.
- Ushold M., M. King, S. Moralee, Y. Zorgios, 1997. The enterprise ontology. *Knowledge engineering*, 13, p. 71-88.