

## La formalisation a mis en évidence l'intérêt de la notion de processus pour l'étude des méthodes de protection des cultures

### 7.1.1 La réponse aux trois besoins des experts

Au cours de cette thèse, j'ai fourni des éléments de réponse à chacun des trois besoins :

**Communication :** Par le recueil et la formalisation d'un modèle complet du **POD** *Mildium* dans un formalisme dont l'expression graphique (Statechart) est accessible aux néophytes.

**Opérationnalité :** En implémentant un simulateur qui m'a permis de valider que les modèles recueillis peuvent reproduire les décisions prises par les experts au cours des expérimentations.

**Fiabilité :** En permettant aux experts d'améliorer, pendant le recueil de connaissances, certains points non élucidés de leur conception, mais aussi par l'analyse des simulations qui permettent d'identifier certains problèmes de conception.

Mais au-delà de la simulation, le processus de modélisation a permis de rendre le **POD** plus fiable grâce à l'emploi d'un formalisme adapté au type de problème traité.

### 7.1.2 Concevoir la décision en IPM comme un procédé

Le projet « action PIC » était pensé à l'origine comme une approche méthodologique devant aboutir à des cadres génériques pour la conception de stratégies opérationnelles de protection du vignoble. Ce point de départ était envisagé avec une terminologie et des représentations en termes de règles de décisions agronomiques. On a montré au cours du chapitre 1 que les spécificités du contrôle du mildiou et de l'oïdium de la vigne ont imposé aux experts concepteurs de penser leurs stratégies de protection comme un tout à l'échelle de la saison.

Ce raisonnement global est découpé en plusieurs étapes de décision qui donnent lieu à une séquence d'actions. Ce raisonnement m'est apparu être bien plus un **Processus Opérationnel de Décision (POD)** qu'un ensemble de règles de décision. Ce **POD** est piloté par des événements qui déclenchent tour à tour des observations au champ, des décisions de traitement ou qui conditionnent le passage d'une étape à l'autre. *L'hypothèse qu'un formalisme SED serait efficace pour représenter un POD du type de Mildium a donc été faite à partir de cette analyse.*

Pour vérifier cette hypothèse, j'ai choisi d'utiliser le langage de modélisation graphique Statechart. Il est évident que d'autres formalismes **SED** tels les Réseaux de Petri

ou encore les diagrammes d'activités auraient pu être utilisés. Cependant le choix des Statecharts s'est révélé bien adapté à la représentation à la fois : (i) d'une séquence d'étape, (ii) d'alternatives conditionnées par plusieurs variables décisionnelles et (iii) à l'expression d'états dans lesquels le temps s'écoule jusqu'à ce qu'un événement ou une condition déclenche une transition et l'exécution des actions associées à cette transition. Ainsi grâce à la possibilité de composer hiérarchiquement les états du Statechart, la représentation est concise et offre une bonne vue d'ensemble du système.

D'autre part les qualités d'expressivité formelle et de facilité d'interprétation intuitive de ces diagrammes m'ont poussé à questionner, *pour le recueil de connaissances, la possibilité d'utiliser un modèle Statechart comme truchement entre les experts concepteurs et le cognicien*. Ce travail de recueil de connaissances a été mené avec succès, confirmant l'idée que le langage, bien que mathématiquement formel, est efficace pour communiquer entre acteurs de différentes formations.

### 7.1.3 La formalisation aide à la conception par introspection

A l'issue du recueil de connaissances, on dispose de deux produits : un modèle du procédé écrit avec des notations en langage quasi-naturel (pseudo code présenté au chapitre 5) et un modèle implémenté dans un simulateur et dans lequel les notations pseudo-code sont remplacées par la syntaxe de type C++ des Statecharts Rhapsody.

Nous avons cherché à valider la qualité du modèle formel créé. Cela a donné lieu à la conception d'une méthode de validation innovante, à partir de simulation, en l'absence de modèle biotechnique.

La qualité du modèle a été validée par l'analyse des simulations. Cette analyse a surtout mis en évidence qu'en l'absence de modèle biotechnique, l'étude des séquences de décision peut être riche d'enseignement sur le comportement des expérimentateurs-experts et par extension sur la qualité même du procédé modélisé. J'ai ainsi pu démontrer qu'au cours des essais, la prise de décision s'effectue au même instant pour toutes les parcelles, même si les décisions sont prises en fonction des exigences du contexte de la parcelle et conformément au POD. C'est le positionnement temporel des décisions qui n'est pas indépendant d'une parcelle à l'autre. Les expérimentateurs-experts n'avaient pas mentionné cet allotement au moment du recueil de connaissances. L'impact de ce phénomène sur la qualité de la protection du vignoble peut ne pas être négligeable<sup>a</sup> notamment du fait des différences de précocité des cépages. Des études plus poussées sont nécessaires pour déterminer les stratégies d'allotement qu'il serait judicieux de mettre en place.

### 7.1.4 La formalisation aide à la conception par dissémination

Le Statechart en langage naturel permet de mener des expérimentations à plus large échelle. Avec ce modèle facilement compréhensible, il est possible de communiquer le POD Mildium au-delà du cercle de ses concepteurs. Le modèle a ainsi permis à l'équipe de rédiger un guide d'expérimentation, sur la base duquel des expérimentations ont pu être menées à grande échelle dans plusieurs régions de France (27 parcelles en 2008). Ces expérimentations nous permettent d'éclairer les relations temporelles entre prise de

a. Toutefois, L'impact réel de ce phénomène n'a pas pu être mesuré faute de données suffisantes.

décision, mise en œuvre et réponse biologique. Ces travaux devraient donner lieu à de nouvelles versions du **POD Mildium**, avec une itération prévue pour 2009.

### **7.1.5 Comment un Processus Opérationnel de Décision facilite le transfert de compétence en Protection Intégrée des Cultures par la preuve de concept**

Nous avons observé un grand intérêt pour le **POD Mildium**, en 2007 chez les quatre viticulteurs du réseau **ADD-Vin** et auprès des viticulteurs et techniciens des chambres d'agriculture dans le cadre des expérimentations menées en 2008. Il est certes perçu comme un objet innovant et les agriculteurs perçoivent les risques que comporte l'expérimentation, mais l'accueil est globalement positif.

A partir du bilan que **McCown (2002)** dresse de l'usage des Outils d'Aide à la Décision dans la profession agricole, et au vu de l'intérêt que suscite le **POD Mildium** : une méthode prescriptive, on s'est demandé si la démarche consistant à proposer aux agriculteurs des systèmes qui fournissent l'ensemble de l'information et qui les laissent faire les arbitrages, ne serait pas sous-efficace faute de méthode dans la prise de décision ? L'argument avancé ici se base sur l'expérience qui a poussé les phytopathologistes de **SV** à démarrer la conception de « RDD » en 2001. Après de nombreuses conférences données sur l'épidémiologie de l'oïdium, ils n'ont constaté aucun impact sur le public professionnel. La conception de **Mildium** vise à illustrer les possibilités par l'exemple et à fournir une référence technique.

Michel Rocard tenait récemment les propos suivants :

Le métier des politiques c'est de choisir entre les remèdes proposés par les spécialistes, ce n'est pas de fabriquer eux-mêmes ces remèdes

in : Michel Rocard 28 octobre 2008

Si l'on remplace le terme « politiciens » par « agriculteurs » ou « chefs d'entreprise » cette phrase illustre parfaitement mon propos. Compte tenu du fait que le métier de l'agriculteur n'est pas d'être un spécialiste de la protection des végétaux, il me semble important d'entamer une réflexion dans le cadre de la **PIC** visant à proposer à l'agriculteur des références méthodologiques et opérationnelles validées lui permettant de modifier ses pratiques en suivant des stratégies éprouvées dont les avantages et les écueils sont bien identifiés. Les guides sous forme de collections de bonnes pratiques donnent des résultats, mais on peut espérer aller plus loin en proposant des stratégies pour coordonner ces bonnes pratiques. Il faut bien évidemment pouvoir le faire en respectant les spécificités des exploitations, des cultures et des traditions.

C'est cette démarche que se propose de suivre l'unité Santé Végétale et à laquelle ce travail de thèse contribue. D'abord il permet de disséminer sans perte d'information le **POD Mildium**, et ensuite de montrer par la modélisation de processus l'intérêt d'une vision globale, séquentielle et opérationnelle de la décision.

### 7.1.6 Vers un système de gestion à la parcelle des chantiers de protection des cultures

On considère que la gestion à la parcelle des opérations polluantes est particulièrement pertinente. En effet la minimisation de la consommation de produits phytosanitaires au niveau de l'exploitation, passe tout d'abord par le raisonnement des applications, à la parcelle, à la manière du POD Mildium. Au-delà de la gestion de chaque parcelle en fonction de son état sanitaire, il convient de gérer les aspects logistiques pour aboutir à des préconisations applicables. Un système informatisé devra donc aider l'agriculteur non seulement à prendre ses décisions, mais surtout à gérer l'information (état parcelle + état POD) de chacune de ses parcelles. Un tel système devrait être aussi être capable d'aider l'agriculteur à organiser au mieux les chantiers (voir Naud et al., 2007; Hernandez, 2007), tout en lui laissant la possibilité de modifier les plans proposés et en lui indiquant l'impact de ses modifications, notamment en terme de risques épidémiques ou d'indisponibilité des ressources.

## 7.2 Vérification automatique de procédés

Au cours de cette section, on donne quelques éléments sur la vérification automatique<sup>b</sup> (« model checking ») tant de fois évoquée au cours des chapitres précédents. La présentation sera nécessairement courte, et vise à illustrer les raisons de notre d'intérêt. Les lecteurs intéressés peuvent se référer à la présentation rapide qu'en fait Hélias (2003) ou de manière plus détaillée à (Katoen, 2004, 1998; Laroussinie, 2005)

**Définition 24.** Selon Katoen (2004, 1998), le « model checking » [vérification automatique] est une technique automatisée qui, étant donné un modèle à états finis d'un système et une propriété formelle, explore tous les états possibles du système par la « force brute » (brut force manner)[c'est à dire de façon énumérative et systématique].

Il s'agit pour nous de pouvoir vérifier la qualité d'un POD dès sa conception. Ce type de vérification peut paraître aisé dans le cadre d'une gestion manuelle du POD actuel sur un très petit nombre de parcelles. Mais dans le cadre d'un système informatique automatisant la gestion phytosanitaire de l'exploitation, un « bogue du POD » pourrait causer d'importantes pertes de récoltes.

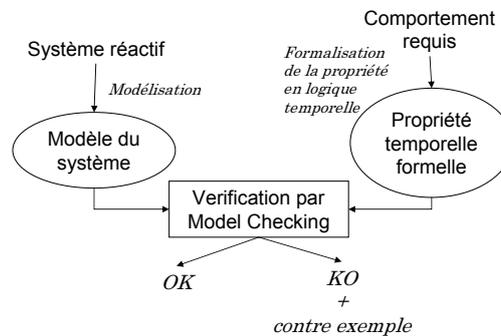
Au delà du débogage d'une stratégie représentée par un POD, le « model checking », doit permettre de tester son comportement au niveau de l'exploitation, c'est à dire la gestion combinée de plusieurs stratégies parcellaires combinées à la gestion des ressources.

La méthode est comparable à une simulation exhaustive de tous les scénarios possibles en parcourant l'ensemble du graphe d'états décrivant le système. En pratique il existe des techniques qui permettent de réduire la taille de l'espace d'états. Toutefois, le model checking reste une technique coûteuse en temps de calcul (la complexité est une exponentielle du nombre de processus concurrents), mais la validité d'une propriété testée sur un système par model checking est réputée démontrée. La méthode a été mise en œuvre dans de nombreux domaines (par exemple protocoles de communication, réseaux téléphoniques, aérospatiale. . .) mais aussi dans des applications médicales telles

b. la notion de vérification automatique en français est plus large que le seule model checking. Faute d'une meilleur traduction, on comprendra ici vérification automatique comme désignant le seul model checking

Protocure (ten Teije et al., 2006) ou en agriculture avec les travaux de Hélias (2003) et Largouët (2000).

Le principe du model checking est illustré par la figure 7.1



source : Katoen (1998)

FIGURE 7.1 – Principes du « model checking »

### 7.2.1 Logiques temporelles

Concrètement, le model checking permet, à l'aide de logiques temporelles, d'effectuer des « requêtes » sur les évolutions possibles d'un système. Les logiques temporelles sont une branche des logiques modales. Elles permettent de raisonner sur des séquences d'état. Le philosophe Prior a mené les premières réflexions dans le domaine dès 1967, mais les développements des logiques temporelles utilisées pour le model checking sont plus récents (« Linear Temporal Logic » ou « Linear Temporal Logic » (LTL) Pnueli, 1977). On se limitera ici à présenter la « Computational Tree Logic » (CTL) (Clarke and Emerson, 1981).

Les logiques de type CTL permettent d'envisager le futur comme une arborescence de choix possibles. Chaque choix ayant pour conséquence de modifier les comportements possibles à partir de l'état courant<sup>c</sup>.

Cette logique se fonde sur les opérateurs booléens traditionnels, et sur quatre opérateurs temporels

- $\exists$  : il existe,
- $\forall$  : quel que soit,
- $\bigcirc$  : suivant,
- $\cup$  : jusqu'à.

qui peuvent être composés pour représenter l'ensemble des requêtes possibles. On déduit notamment les deux opérateurs macro suivants :

- $\exists \diamond \phi \equiv \exists \text{ vrai} \cup \phi$  c'est à dire : il existe une séquence où la formule  $\phi$  est satisfaite au moins une fois.

c. Frank Herbert dans Dune, donne avec la pré science une assez bonne image de la manière dont le temps est pensé par les logiques arborescentes

- $\exists \Box \phi \equiv \exists \neg \Diamond \neg \phi$  c'est à dire :il existe une séquence où la formule  $\phi$  est toujours vraie ( $\phi$  est un invariant).

### 7.2.2 Vérifier les propriétés des systèmes critiques

Le tableau 7.1 illustre les principales propriétés des systèmes critiques<sup>d</sup> testées avec le « model checking ».

type de propriétés	signification
atteignabilité	Sous certaines conditions, un état du système peut être atteint « une panne peut survenir »
sûreté	Sous certaines conditions, quelque chose n'arrive jamais « une panne est impossible »
vivacité	Sous certaines conditions, quelque chose finit par avoir lieu « une panne arrivera un jour »
vivacité bornée	Sous certaines conditions, quelque chose finit par avoir lieu avant un certain temps « une panne arrivera dans la journée »
équité	Sous certaines conditions, quelque chose a lieu infiniment souvent « le système marche infiniment souvent »
non blocage	Le système ne se trouve jamais dans un état qu'il ne peut plus quitter « une panne peut toujours être réparée »

source : D'après Bérard et al. (2001, in Hélias 2003)

TABLE 7.1 – Classes de propriétés pouvant être vérifiés

Toutes ces propriétés ne peuvent être exprimées pour toutes les logiques temporelles. Ainsi, la vivacité bornée nécessite que le temps soit quantifié. La « Timed Computational Tree Logic » (TCTL) (Alur et al., 1993) est une extension de la CTL qui permet d'exprimer des contraintes temporelles en terme de durée quantifiée (par exemple vivacité bornée in tab. 7.1). Le temps dans TCTL est mesuré par des horloges définies dans  $\mathbb{R}$ . Un modèle TCTL est représenté par un automate temporisé (Alur and Dill, 1994). On n'en présente pas les détails par souci de simplicité et de brièveté de l'exposé, on renverra le lecteur à (Katoen, 2004; Laroussinie, 2005; Yovine, 1993; Alur et al., 1993; Hélias, 2003; Tuitete, 2006).

### 7.2.3 Le « model checking » et nos travaux

On donne ci-après des exemples de propriété que l'on peut tester sur un modèle formel de POD en protection des cultures. Certaines requêtes peuvent être traitées par CTL, par exemple, si on souhaite s'assurer qu'un POD de protection des cultures vérifie :

d. Un système est dit critique si de lui dépend la sécurité d'un être humain ou plus largement, si sa défaillance rend impossible la réalisation d'un objectif

Existe-t'il une situation où une pluie ne déclencherait pas une application alors que la parcelle le nécessite ?

Cette question est triviale pour une règle de décision spécifiant un traitement avant toute pluie. Pour un système du type de Mildium qui tire avantage de l'acquisition de la résistance ontogénique des baies à partir de la mi-fermeture de la grappe, la réponse est plus difficile à déterminer.

D'autres types de requêtes impliquent l'utilisation de la logique TCTL, une requête typique pourrait être :

Serais-je toujours capable de traiter l'ensemble de mes parcelles avant la pluie si la prévision devient « certaine » deux jours seulement avant l'évènement ?

L'usage de TCTL se justifie d'autant plus qu'on a évoqué dans les chapitres précédents la possibilité d'ajouter des contraintes temporelles sur le modèle du POD. La « temporisation » de Mildium a pour objectif de mieux rendre compte de l'imprécision de l'expertise et de la variabilité due aux phénomènes biologiques qui finalement permet d'envisager une certaine incertitude sur « l'instant » précis auquel par exemple la première observation doit être effectuée. La temporisation pourra se faire directement en Statechart temporisé (Kesten and Pnueli, 1992) et une seconde transformation vers les automates temporisés sera nécessaire pour pouvoir faire la vérification. Il serait sinon possible d'utiliser les profils UML 2.0 OMEGA<sup>e</sup> (Ober et al., 2006b; Kvas et al., 2005). Cette technologie permet de temporiser les modèles UML 2.0 et utilise la « toolbox » IFx pour le « model checking » (Ober et al., 2006a).

Le choix de la technologie la plus adaptée pour la vérification de système soumis à un environnement bioclimatique incertain n'a pas à l'heure actuelle été arrêté. Ainsi, nous ne savons pas si TCTL suffira ou s'il ne faudrait pas avoir recours à une extension stochastique tel « Probabilistic Timed Computational Tree Logic » (PTCTL) ou à une modélisation sous forme de chaîne de Markov (Kwiatkowska, 2003).

#### 7.2.4 Le « model checking » à différents niveaux d'organisation

Au-delà de la protection intégrée du vignoble, on peut imaginer que le développement de solutions et de standards pour la *Production Intégrée* puisse être rationalisé par la modélisation *des processus métiers*, en association à une base de propriétés « standardisées » permettant de vérifier des stratégies de manière générique. Cette démarche serait comparable à la formalisation des « guidelines » médicales.

Au-delà des seules propriétés temporelles il est possible de vérifier d'autres types de propriétés. En modélisation d'entreprise, Chapurlat (2007) s'intéresse aussi aux propriétés des organisations avec une conception très large de la notion de propriété, qu'il modélise comme un quintuplet  $P \models \langle C_D, E_D, R_{DD'}, D'', I_{D''} \rangle$  avec  $C_D$  l'ensemble des causes ;  $E_D$  l'ensemble des faits ;  $R_{DD'}$  la relation de causalités qui peut être une relation (i) logique, (ii) temporelle, (iii) d'influence, (iv) d'émergence ;  $I_{D''}$  l'ensemble des indicateurs permettant de suivre et de mesurer la véracité de la propriété<sup>f</sup>. Chapurlat

e. <http://www-omega.imag.fr/>

f. cette présentation du modèle CREDI est volontairement succincte notamment la notion de niveau de granularité  $D, D', D''$  n'est pas abordé.

développe les notions de base de propriété et la notion de patron d'organisation pour la modélisation d'entreprise.

### 7.2.5 Conclusion à propos de la vérification

Il serait ainsi possible de développer des stratégies de protection vues comme des POD et d'en garantir la qualité minimale grâce à des bases de propriétés, vérifiées de façon standards.

La figure 7.2 résume mon travail de thèse et indique comment la vérification automatique de propriétés temporelles pourrait le prolonger.

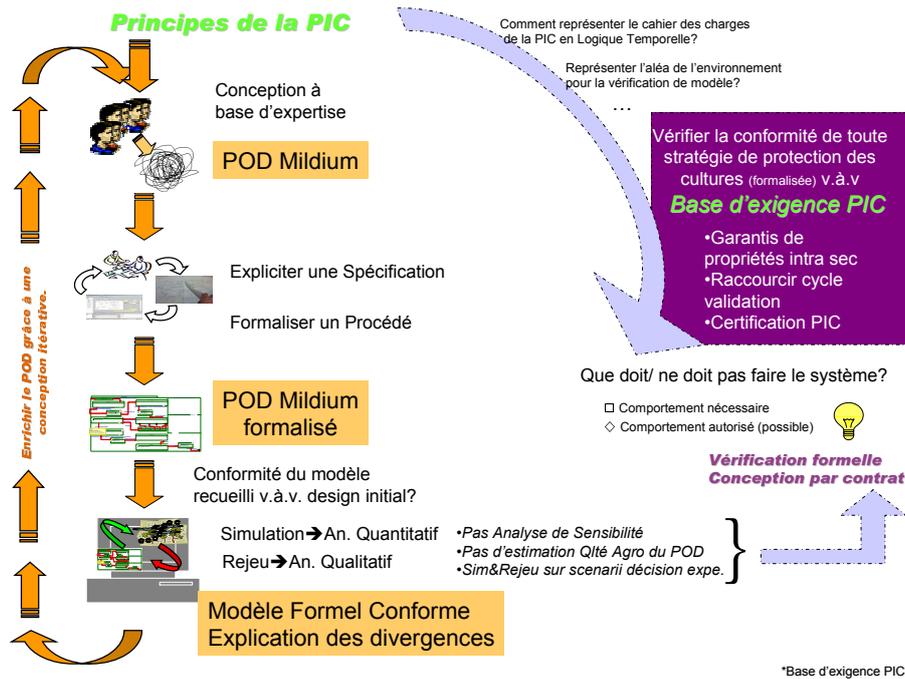


FIGURE 7.2 – Résumé des travaux présentés dans cette thèse et des perspectives proposées

## 7.3 Généricité de la formalisation de POD en dehors de la protection des cultures

Dans la section qui suit, à partir de deux exemples tirés de domaines d'application très différents de la protection des cultures : le génie des procédés agroalimentaires et la formalisation de « guidelines » médicales, j'analyse l'intérêt que peut présenter mon travail vis à vis de ces questions disciplinaires, mais également les apports potentiels que l'on peut tirer de ces recherches disciplinaires.

### 7.3.1 Le cas du génie des procédés agroalimentaires

Il n'est pas ici question de faire une revue exhaustive des travaux en génie des procédés agroalimentaires, mais simplement d'illustrer la proximité des questionnements. Les procédés agroalimentaires sont caractérisés par un grand nombre de tâches qui ne sont pas automatisées, où le recours à l'expertise de l'opérateur reste la seule méthode

de conduite du procédé (Edoura-Gaena, 2005). Par exemple, l'UMR Génie Industriel Alimentaire (GENIAL) du CEMAGREF a mené un programme de recherche visant à formaliser cette expertise, afin de l'intégrer dans une démarche de maîtrise des procédés et de la qualité.

### 7.3.1.1 Les indicateurs sensoriels

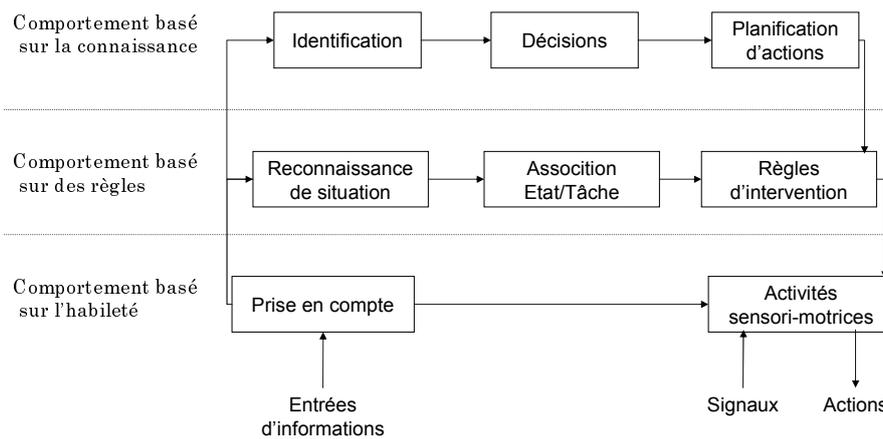
Il y a dans la démarche menée à GENIAL une proximité avec nos propres questionnements sur la manière de formaliser l'expertise portant sur le procédé Mildium. On note néanmoins des différences : Mildium est un prototype, le travail de formalisation s'inscrit alors dans une démarche de conception, quand les travaux de l'unité GENIAL s'attachent à extraire une connaissance existante, sur un procédé maîtrisé. Dans la mesure où le procédé existe et n'est pas remis en cause, la recherche porte sur l'explicitation de la décision des experts, et sur la formalisation des « *indicateurs sensoriels* » mis en œuvre par les opérateurs experts pour contrôler un procédé (étuvage du saucisson par exemple). Curt (2002) propose cette notion en concevant l'opérateur comme un « capteur » dans le procédé produisant des variables agrégatives. Avec les valeurs symboliques de ces variables, l'opérateur, dans son rôle de superviseur, est capable de prendre des décisions. Le recours aux indicateurs sensoriels est une manière de formaliser une connaissance implicite pour la transformer en connaissance symbolique utilisable dans un système expert d'aide à la conduite. Ces systèmes experts associent aux mesures sensorielles, des mesures quantitatives en ligne et produisent des préconisations (Curt, 2002; Ioannou, 2003; Edoura-Gaena, 2005).

Les méthodes d'extraction de connaissance et de formalisation d'indicateurs sensoriels devraient s'avérer utiles dans nos travaux pour préciser les définitions de variables décisionnelles telles que l'estimation de la phénologie. Cette variable est très intégrative. Une clarification des grilles d'interprétation devrait être produite, pour améliorer la qualité des résultats expérimentaux à grande échelle. Au-delà de l'expérimentation, il serait sans doute enrichissant, dans le cadre du transfert d'une version du POD Mildium, que l'agriculteur puisse s'inspirer et « étalonner » ses propres perceptions au regard des grilles d'interprétation utilisées par les experts concepteurs du système.

### 7.3.1.2 Maîtrise globale du procédé

Dans sa thèse Edoura-Gaena (2005) se réfère au modèle de Rasmussen (fig. 7.3) comme base de l'analyse du comportement de l'opérateur humain. Avec ce modèle, il étudie la conduite du procédé de foisonnement<sup>g</sup> dans la fabrication de boudoir. Il applique la méthode d'extraction de connaissances proposée par Curt sur l'ensemble du procédé de fabrication du boudoir. Sa modélisation met en évidence l'utilisation de boucles de contrôle sur l'opération de foisonnement très en aval dans le procédé. Il montre que, suite à une dérive, la plupart des commandes effectuées par les opérateurs se concentrent sur les variables d'entrée ayant la réponse la plus rapide. Ces commandes sont en général appliquées en un point unique du procédé (souvent le foisonnement dans l'étude menée).

g. Opération en biscuiterie consistant à injecter un gaz dans un pâte pour obtenir une texture spéciale par exemple génoise, boudoir



source : Edoura-Gaena (2005, d'après Rasmussen)

FIGURE 7.3 – Modèle des comportements de l'opérateur humain en situation de conduite de procédé

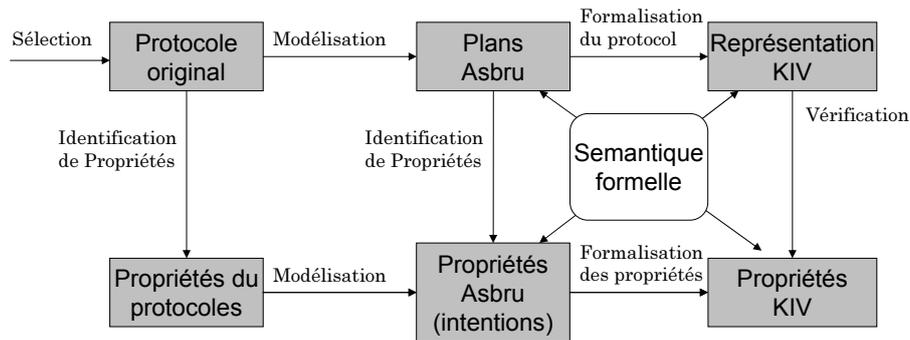
On remarque que si la plupart des cas peuvent être gérés de cette manière, il existe des situations de dérive complexe où divers effets se combinent et où la correction en un point du procédé de fabrication complet n'est pas possible. Dans ce cas, la combinatoire du problème est semble-t-il exponentielle et les systèmes automatisés sont mis en défaut<sup>h</sup>. Les opérateurs parviennent néanmoins, par leur connaissance intégrée du procédé complet de fabrication, à rétablir le système. Allais (2007) considère que la modélisation des interactions opérateurs/procédés reste un enjeu pour la discipline du génie des procédés, il nous semble que l'exemple donné par Edoura-Gaena illustre l'enjeu de cette question.

La modélisation Statechart de POD que je propose est une tentative de représentation intégrée de l'organisation des décisions et des actions d'opérateurs confrontés à un problème de production fortement contraint. La modélisation des solutions d'urgence mises en œuvre par les opérateurs experts dans l'agroalimentaire pourrait parfaitement être réalisée avec les outils proposés ici. Toutefois, un travail d'adaptation des formalismes devrait être effectué pour modéliser des réponses proportionnelles. En effet le POD Mildium ne produit que des réponses binaires.

### 7.3.2 Le cas de la vérification des « protocoles » médicaux

Les travaux en santé humaine portant sur la modélisation de protocole médicaux (« medical guidelines »), nous semble particulièrement proches de nos problématiques, dans la mesure où il s'agit de modéliser des processus métiers fortement décisionnels et qui mettent en relation l'exécution de ces processus avec une réponse biologique, de façon très similaire au POD.

h. L'exemple donné indique que la correction habituelle de la dérive par une unique commande sur le foisonnement aurait des conséquences au niveau du calibre des biscuits et qui causeraient des pertes importantes à l'emballage.



source : ten Teije et al. (2006)

FIGURE 7.4 – Formalisation et vérification de protocoles dans le projet Protocure

Les protocoles médicaux visent à regrouper les meilleures pratiques dans le traitement d'une pathologie. Le développement de ces protocoles reçoit une grande attention de la communauté médicale dans la mesure où ces outils permettent d'améliorer la qualité des soins et de diminuer les coûts de santé. Le projet Européen *Protocure*<sup>i</sup> propose d'appliquer des méthodes de modélisation formelle aux guidelines médicales, pour en vérifier la qualité (Balser et al., 2004; ten Teije et al., 2006). Les guidelines se présentent en général sous la forme d'un corpus de texte décrivant les étapes de diagnostic et du processus de soin, rédigé en langage naturel. La démarche de formalisation et de vérification des guidelines est décrite par la figure 7.4.

Le protocole informel est tout d'abord modélisé avec le langage programmation de plans médicaux<sup>j</sup> : *Asbru* (Miksch et al., 1997; Balser et al., 2002). Ce langage permet de représenter et d'exécuter les plans, mais n'est pas suffisamment formel pour permettre la vérification selon Balser et al. (2004). Le modèle *Asbru* est donc transformé en modèle formel KIV<sup>k</sup> pour être interprété par le « theorem prover » KIV (Balser et al., 2000). Le processus de modélisation a permis d'identifier un certain nombre d'incohérences et d'inconsistances.

En parallèle les propriétés requises d'une bonne guideline sont identifiées pour être formalisées en *intentions Asbru*. En *Asbru*, les *intentions* sont une structure permettant d'exprimer les objectifs d'un plan. Les propriétés qui ont été utilisées pour vérifier les guidelines sont tirées de listes d'indicateurs de bonnes pratiques qui sont élaborées systématiquement par des experts médicaux (par exemple Van Gendt et al., 2005). Le passage d'indicateurs ou de propriétés exprimés en langage naturel vers des propriétés de logique temporelle (ici « interval temporal logic » ou ITL Moszkowki, 1985, in ten Teije et al. 2006) s'effectue en cinq étapes en utilisant un langage pivot. L'usage de ce « Goal Definition Language (GDL) » permet de garantir : (i) l'absence d'ambiguïté dans la transformation, (ii) la minimisation de la variabilité liée au cognicien, (iii) la préservation entre le langage naturel et la formule ITL, (iv) la traçabilité et (v) la réutilisabilité des éléments de la formule au cours de la formalisation des propriétés. Les

i. <http://www.protocure.org>

j. Au sens des *plans* vu au chapitre 3.

k. Karlsruhe Interactive Verifier

cinq étapes de la formalisation des propriétés sont :

**La réduction** : les experts fixent les propriétés en terme de pourcentage mesurant la qualité *ex post* du processus. Les valeurs des pourcentages sont sans intérêt pour la vérification, le but des ces statistiques est en général soit de maximiser une pratique, soit de minimiser un critère. La réduction cherche donc à réduire la propriété désirée à l'essence de son objectif : maximiser/minimiser un critère sous certaines conditions.

**La normalisation** : vise à faire apparaître les éléments de la condition temporelle à vérifier : un prédicat doit déclencher un comportement à partir d'un moment jusqu'à un autre moment

**La formalisation** : transforme le langage naturel en formule GDL implémentant essentiellement le découpage apparu lors de la normalisation : précondition ; début ; fin ; comportement attendu ;

**L'attachement** : consiste à remplacer les propositions en langage naturel de la formule GDL par leurs équivalents formels issus du modèle à vérifier, c'est essentiellement une étape d'interfaçage.

**La traduction** : consiste à produire une formule de logique temporelle bien formée à partir de la formule GDL. C'est une opération mécanique.

Cette méthode de formalisation des propriétés (Stegers et al., 2006) est une des rares méthodes de décomposition d'un objectif opérationnel vers une propriété formelle. Il me semble pourtant que cette question est centrale pour la dissémination de ces techniques de vérification automatique vers un public plus large.

Il nous faudra évaluer l'intérêt du langage *Asbru* pour la formalisation de **POD**. Le langage n'est pas graphique, mais la possibilité de modéliser les intentions d'une action constitue une possibilité formelle très intéressante pour le recueil de connaissances et la formalisation de **POD**.

Plus largement, il est certain que la recherche menée par le projet *Protocure* dans le domaine médical bénéficie grandement de l'intérêt porté par la profession médicale pour l'organisation du travail selon de protocoles standardisés. La manière dont les guidelines ont été disséminées en médecine constitue une piste intéressante pour choisir les meilleures techniques pour transférer et disséminer le **POD Mildium** dans la profession.

Ce tour d'horizon d'autres domaines, permet de mesurer toute l'actualité des questions posés par la modélisation de processus expert.

## 7.4 Le mot de la fin

A l'issu de ma thèse, le programme de recherche sur les **POD** a progressé techniquement avec la formalisation du **POD Mildium**, mais aussi en terme d'organisation et de synergies avec les acteurs de la filière qui montrent leur intérêt pour expérimenter et développer **Mildium**.