

Chapitre 2

Les modèles du dispositif

2.1 Introduction

Nous définirons un *modèle du dispositif* comme un modèle de connaissances du domaine, exploité par l'un des modules du SAESE, et qui caractérise un point de vue sur le dispositif physique, support de la tâche de l'opérateur¹. Le modèle de simulation, qui fonde la spécification du simulateur, n'est pas le seul modèle du dispositif exploité par le SAESE. Par exemple, un module explicateur exploite un autre modèle du dispositif pour expliquer au stagiaire son fonctionnement.

Parmi les modèles de connaissances d'un SAESE, les modèles du dispositif sont centraux car l'environnement de résolution du stagiaire est dynamique. La résolution comporte l'analyse d'une situation dynamique qui constitue, pour le stagiaire, un des facteurs de complexité, comme dans la situation réelle. Les modèles du dispositif sont conçus pour aider le stagiaire à construire des représentations mentales du dispositif qui permettent une meilleure compréhension de la situation dynamique. Ces représentations servent de support à l'exécution de la tâche et sont désignées comme des *modèles mentaux* (Gentner & Stevens, 1983, Johnson-Laird, 1989).

Pour étayer notre discussion sur les modèles du dispositif, nous nous référons aux travaux réalisés en ergonomie cognitive sur le contrôle des systèmes complexes. Dans une situation dynamique, les connaissances sur le processus sont distinguées des connaissances sur l'action (Hoc, 1996). L'opérateur s'appuie sur une représentation du processus pour comprendre son évolution et étayer ses décisions. Dès lors que l'on s'intéresse au processus, deux questions émergent : le modèle du dispositif qui en résulte est-il unique ? est-il indépendant de la tâche considérée ?

Dans une première étape, nous décrivons deux types de modèles du dispositif, ceux utilisés pour la simulation (section 2.2) et ceux définis par les ergonomes (section 2.3) pour décrire les connaissances de l'opérateur sur le processus. La section 2.4 analyse les SAESE où prédominent les modèles fonctionnels et causaux. Nous différencierons les modèles *informationnels*, qui servent à communiquer au stagiaire des informations sur le dispositif des modèles *réservés* qui sont conçus pour exécuter des traitements internes au SAESE (section 2.5). Nous recherchons s'il existe, parmi les modèles du dispositif, un noyau de

¹ Rappelons que nous emploierons le terme de « dispositif » pour l'objet physique sur lequel la tâche de l'opérateur s'exerce et le terme de « processus » lorsqu'on fera référence au comportement dynamique du

connaissances primitives à partir duquel les autres modèles pourraient être déduits (section 2.6) de façon à faciliter la conception et la maintenance des bases de connaissances du SAESE.

2.2 Modèles de simulation

Law et Kelton classent les modèles de simulation en fonction de trois propriétés principales (Law & Kelton, 1991).

- Dans un modèle *discret*, les variables d'état¹ changent instantanément à des instants séparés dans le temps, alors que dans un modèle *continu*, les variables d'état changent continûment en fonction du temps (par exemple, le déplacement d'un avion). Une *simulation à événements discrets* est un modèle discret où les événements reçus par les entités du système provoquent les changements d'état.
- Un modèle est *dynamique* (resp. *statique*) lorsque le système représenté évolue de lui-même au cours du temps (resp. n'évolue pas).
- Un modèle est *déterministe*, à l'inverse d'un modèle *stochastique*, s'il ne contient aucune variable aléatoire. Pour un modèle déterministe, les sorties sont déterminées, une fois les entrées et les relations du modèle spécifiées.

Aux critères précédents, van Joolingen et de Jong ajoutent le critère *quantitatif/qualitatif* (Joolingen & Jong, 1991). Les variables d'un modèle quantitatif sont reliées par des lois mathématiques connues alors que dans un modèle qualitatif, les relations peuvent exprimer des propriétés non quantitatives (par exemple, l'interrupteur est allumé ou éteint) ou approcher des relations quantitatives par des relations qualitatives. Par exemple, l'équation $B=3A^2$ est approchée par la relation qualitative « si A double, alors B quadruple ». Les modèles qualitatifs ont donné naissance à de nombreux travaux en IA, en particulier dans le domaine de la simulation qualitative (Laurent & Vescovi, 1992) et du diagnostic basé sur les modèles (Chatain, 1993).

2.3 Modèles des connaissances de l'opérateur sur le processus

Nous reprenons brièvement les modèles des connaissances de l'opérateur² sur les processus en les présentant par degré d'abstraction décroissant (Hoc, 1996).

dispositif. Nous englobons dans les modèles du dispositif, les modèles relatifs au processus pour ne pas multiplier le vocabulaire.

¹ L'état d'un système est caractérisé par un ensemble de variables nommées variables d'état.

² Hoc utilise le terme de système de représentation plutôt que celui de modèle de connaissance. Nous avons unifié la terminologie en adoptant celle de l'IA.

2.3.1. Inventaire des modèles

Les modèles causaux

Pour décrire le comportement d'un dispositif, Iwasaki et Simon exploitent un graphe dont les nœuds sont des variables du dispositif et les arcs, des liens de dépendance causale entre ces variables (Iwasaki & Simon, 1986). Ce graphe causal est construit à partir d'équations reliant les variables du dispositif (figure 2.1). D'autres graphes causaux peuvent être construits pour le même dispositif. Un graphe causal peut refléter le point de vue de l'opérateur en reliant des variables du processus par des relations causales pertinentes pour une action donnée. Par exemple, si deux variables A et B du dispositif sont reliées et si l'opérateur peut contrôler A, alors la relation causale est établie de A vers B. Dès lors, la structure causale d'un système n'est pas unique : elle s'appuie sur la conduite du dispositif.

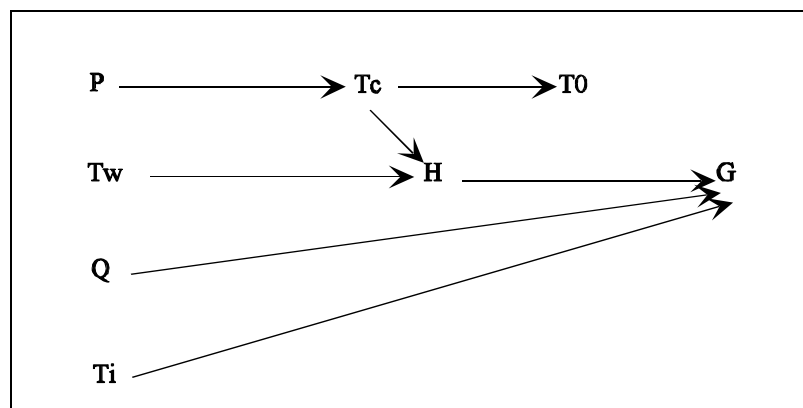


Figure 2.1 : Graphe causal d'un évaporateur (Iwasaki & Simon, 1986)

Les modèles fonctionnels

Les modèles fonctionnels décrivent les fonctions réalisées par les composants du système. Ils sont souvent plus abstraits que ceux décrivant les composants physiques et leurs relations car la décomposition fonctionnelle du dispositif ne recoupe pas toujours la décomposition structurelle. Lorsque ces modèles servent de base à la construction de représentations graphiques du dispositif, ils permettent de relier les buts de l'opérateur aux commandes à réaliser.

Les modèles transformationnels

Les modèles transformationnels décrivent les transformations successives des états du dispositif. Ils sont souvent construits dans le contexte de processus discrets où l'opérateur intervient directement sur les transformations. Les transformations lui servent alors de guide

pour structurer ses connaissances. En revanche, dans certaines situations comme la conduite d'un haut fourneau, où l'opérateur n'influe pas directement sur l'état du dispositif, les opérateurs ne s'appuient pas sur des modèles transformationnels (Hoc & Samurçay, 1992).

Les modèles topographiques

Les modèles topographiques précisent la localisation relative des composants. Ces connaissances sur la structure du dispositif peuvent étayer un diagnostic. Les modèles topographiques peuvent de plus, être hiérarchisés pour faciliter la tâche. Ils sont rarement utilisés seuls et sont combinés aux modèles causaux, fonctionnels et transformationnels.

2.3.2 Articulation des modèles

Les études ergonomiques menées sur des tâches particulières ont permis de mettre en évidence les différents types de modèles et leur rôle de support pour l'exécution de ces tâches spécifiques. Chaque type de modèle est rarement utilisé seul mais en interconnexion avec un ou plusieurs autres. En revanche, le rôle respectif de chaque type de modèle et leurs interrelations sont encore mal connus et sont l'objet de recherches. Notre démarche consistera donc à traiter chaque situation de travail dans sa spécificité. Nous retiendrons des travaux en ergonomie cognitive que les représentations mentales de l'opérateur pouvaient faire appel à plusieurs modèles du dispositif et que l'occurrence d'un type de modèle dépendait de la tâche de l'opérateur.

2.4 Modèles de connaissances dans les SAESE

Pour présenter les modèles de connaissances des SAESE, nous nous référerons à certains travaux plus généraux lorsqu'ils s'appliquent à des contextes applicatifs similaires à ceux des SAESE. La particularité des SAESE tient davantage au type de connaissances privilégié pour structurer le domaine qu'à l'existence d'un seul type de modèle. Nous présentons ces travaux selon la prédominance fonctionnelle ou causale des modèles des connaissances du domaine.

2.4.1 Prédominance du modèle fonctionnel

Chandrasekaran, dans le cadre des systèmes de diagnostic, examine les liens entre les fonctions des systèmes physiques, leur structure et les processus causaux en jeu dans le système (Chandrasekaran, 1994). Il note que la décomposition structurelle d'un système ne fournit pas toujours le bon niveau d'abstraction pour décrire son comportement. Le

comportement intéressant n'est pas nécessairement associé à un seul composant. Il propose de recourir à une représentation fonctionnelle du dispositif à partir de laquelle le comportement de chaque composant est décrit par ce qu'il apporte à la réalisation de la fonction. Une représentation fonctionnelle est hiérarchique et dirigée par les buts sous-jacents de la fonction. Elle comporte trois aspects : structure, fonction, comportement. Pour Chandrasekaran, la fonction ne désigne pas uniquement le rôle mais aussi un état distingué du système pour un observateur du système. La structure énumère les composants et leurs fonctions, ainsi que les relations entre ces composants. Enfin le comportement décrit comment le dispositif réalise la fonction. Chandrasekaran applique ce cadre de représentation des connaissances à différentes tâches : simulation, diagnostic, conception.

Vasandani et Govindaraj proposent une organisation des connaissances analogue à celle de Chandrasekaran pour représenter des systèmes complexes dans un environnement d'apprentissage du diagnostic fondé sur la simulation (Vasandani & Govindaraj, 1995). Ils appliquent ce cadre à la conception d'un SAESE Vyasa, associé à un simulateur Turbinia, pour la formation au dépannage des ingénieurs de marine. Le modèle de l'apprenant est construit sur la base de cette représentation du domaine. Des heuristiques d'évaluation sont développées pour chaque type de connaissances : structurelles, fonctionnelles ou comportementales.

2.4.2 Prédominance du modèle causal

Les modèles causaux ont été étudiés dans le contexte des environnements d'apprentissage. White et Frederiksen conçoivent des modèles causaux en progression, d'un modèle naïf à un modèle expert, pour favoriser chez l'apprenant le développement des modèles mentaux correspondants. Ils ont appliqué cette démarche au domaine des circuits électriques (White & Frederiksen, 1990). Les modèles causaux sont exploités dans des micromondes où l'apprenant construit un circuit électrique, le teste et le modifie. Les apprenants doivent expliciter leur modèle du circuit lors de l'interaction avec le système. L'état des connaissances de l'apprenant est alors décrit par l'ensemble des modèles causaux qu'il a développés au cours de la session. La progression des modèles causaux est fondée principalement sur deux typologies.

- Une typologie relative à *l'ordre* du modèle. Les modèles d'ordre 0 raisonnent sur des états binaires des composants (par exemple, la lumière est éteinte ou allumée). Les modèles d'ordre 1 exploitent des relations qualitatives (par exemple, lorsque une résistance diminue, la tension augmente).

- Une typologie relative au *degré d'élaboration* du modèle : raisonner sur les tensions, puis sur les intensités de courants.

Bien que ces micromondes soient conçus pour l'apprentissage de lois physiques (les lois d'Ohm et de Kirchhoff) et non pour une tâche professionnelle, ces travaux montrent comment la progression des modèles causaux du dispositif approfondit la compréhension d'un apprenant au-delà de l'énoncé d'une relation quantitative « $U = R I$ ».

2.5 Modèles du dispositif : informationnel ou réservé ?

Les modèles de simulation et les modèles de connaissances de l'opérateur sur le processus (sections 2.2 et 2.3) se recoupent de façon marginale. D'une part, les modèles causaux sont sous-jacents à la simulation causale, une forme de simulation qualitative (Laurent & Vescovi, 1992). D'autre part, les modèles transformationnels fondent les simulations à événements discrets. Nous proposons une terminologie plus significative pour les SAESE en parlant de *modèle informationnel* et de *modèle réservé*.

2.5.1 Terminologie

Les deux types de modèles précédents ont des orientations différentes. Les modèles de simulation ont pour vocation de produire des modèles du dispositif exécutables. Dans un SAESE, le modèle de simulation est validé expérimentalement par la fidélité des observables produits par l'exécution du modèle et conceptuellement par le modèle lui-même. Le rôle des modèles de connaissances sur le processus est central pour l'opérateur dans la mesure où ils servent de support à son activité. Selon la tâche cible de la formation, les modèles causaux, fonctionnels, transformationnels et topographiques ne constituent pas tous une représentation pertinente ou suffisante pour l'exercice de la tâche. Nous proposons de distinguer, dans un SAESE, les modèles du dispositif qui servent à communiquer au stagiaire des informations sur le dispositif de ceux qui sont conçus pour exécuter des traitements internes au SAESE. Nous qualifierons de *modèle informationnel* un modèle du dispositif dédié à la communication d'informations au stagiaire et par opposition, les autres modèles du dispositif seront qualifiés de *modèles réservés*. Cette distinction est pertinente car elle permet de développer, pour chaque type de modèle, une approche de conception propre. La conception d'un modèle réservé sera axée sur la fidélité conceptuelle pour assurer une bonne représentation du dispositif physique et sur les qualités attendues usuellement en génie logiciel comme, par

exemple, la performance ou la facilité de maintenance. La conception d'un modèle informationnel sera axée sur la spécification de modèles du dispositif pour aider le stagiaire à appréhender la dynamique du dispositif donc l'état du problème à résoudre. Il n'est pas nécessaire que chaque modèle informationnel soit complet car chacun peut présenter un point de vue distinct sur le dispositif et utile au stagiaire. Enfin, dans cette optique, l'ensemble des modèles informationnels peut être hétérogène pour s'adapter à la diversité des stagiaires.

2.5.2 Analyse des modèles du dispositif d'un SAESE

Nous analysons dans cette section, quelles sont les bases de connaissances d'un SAESE qui exploitent un modèle du dispositif¹ (figure 2.2). Cette analyse généralise certains résultats de DIAPASON qui seront présentés de façon détaillée dans le chapitre 5. Nous limiterons le champ de cette analyse à la simulation à événements discrets et à une tâche de contrôle de processus industriels.

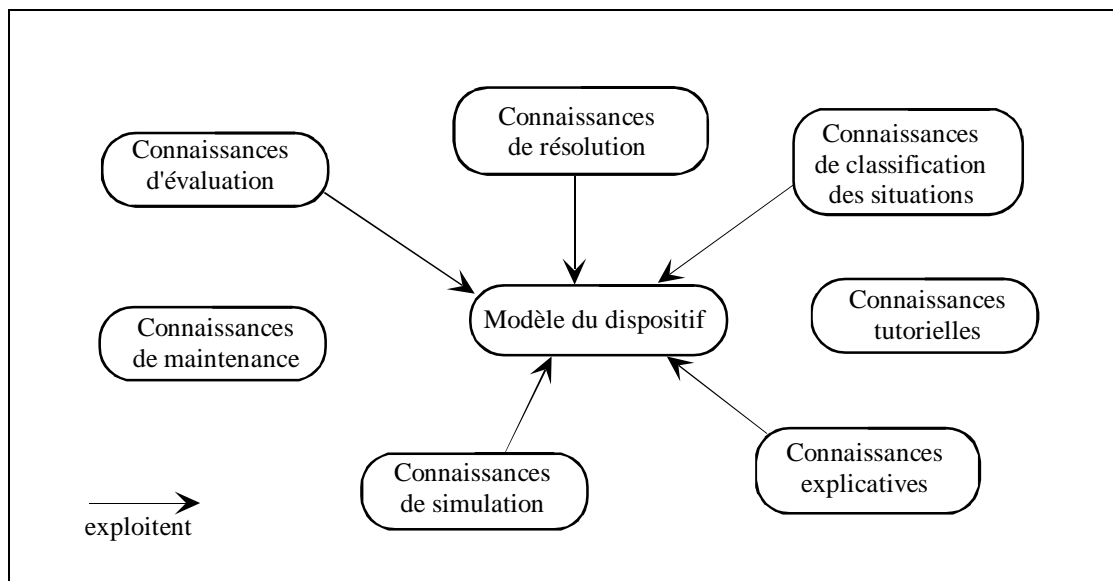


Figure 2.2 : Connaissances du SAESE ayant recours à un modèle du dispositif

Les connaissances de simulation nécessitent un modèle du dispositif pour reproduire le fonctionnement du dispositif. Par exemple, une simulation à événements discrets modélise chaque composant et les transformations d'états qu'ils subissent à la réception des événements.

Les connaissances de classification des situations classent les exercices qui seront exécutés sur le simulateur en leur associant des critères de difficulté. La classification s'appuie sur

l'analyse de la complexité relative des situations simulées. Nous proposons une classification élémentaire à partir des couples constitués des entrées et des sorties du simulateur où les entrées sont les données du scénario de simulation et les sorties, les observables émis par le dispositif. Cette classification s'appuie donc sur un modèle du dispositif. Notons cependant que cette première classification sera ensuite raffinée pour prendre en compte les aspects heuristiques liés à la tâche et l'analyse de la complexité intrinsèque de la situation faite par les instructeurs.

Les connaissances explicatives utilisent d'une part, une table des associations entre défauts et observables résultants et d'autre part, un modèle causal du dispositif². Les *entités explicatives* représentent les structures de données exploitées pour construire les explications. Ces entités mémorisent les associations entre les défauts et les observables. Elles sont conçues pour représenter les différentes interactions possibles d'un composant du dispositif avec les autres composants qui lui sont fonctionnellement liés. Chaque entité explicative contient un graphe causal des composants dont l'interaction est représentée par l'entité. Ce graphe causal est un fragment d'un modèle causal du dispositif. La sélection des entités est opérée sur la base des observables émis par le dispositif et exploite la table des associations. En parallèle, les graphes causaux internes à l'entité explicative sont parcourus au fur et à mesure de la simulation. Une fois les entités confirmées, les graphes causaux contenus dans les entités sont exploités pour construire les explications.

Les connaissances de résolution permettent au module expert de résoudre l'exercice posé au stagiaire. Nous considérons que cette résolution fait appel à un modèle du dispositif car elle doit servir de référence pour la formation des stagiaires. En effet, il ne s'agit pas de transmettre de simples règles d'action qui ne permettent pas d'anticiper sur les réactions du dispositif. En général, ce type de connaissances ne correspond pas aux objectifs pédagogiques des instructeurs qui souhaitent promouvoir une démarche raisonnée qui anticipe les effets des actions sur le dispositif.

Les connaissances d'évaluation raisonnent à partir des actions du stagiaire et de ses effets sur le dispositif. Comme pour le module expert, l'interprétation de la résolution du stagiaire, à la base de l'évaluation, nécessite un modèle du dispositif pour obtenir un niveau d'analyse

¹ Le cas échéant, comme le montre la section 2.3, plusieurs modèles du dispositif seront exploités par les bases de connaissances du SAESE.

² Rappelons ici que nous considérons une forme restreinte de l'explication, l'interprétation des observables pour expliquer le fonctionnement du dispositif.

comparable à celle de la résolution du module expert. Nous considérons que ce modèle est contenu dans le modèle du dispositif, support de la résolution.

Les connaissances tutorielles décrivent des stratégies pédagogiques, indépendantes du domaine et de ce fait n'ont pas de lien avec le modèle du dispositif. Les connaissances de maintenance gèrent la mise à jour de l'état des connaissances du stagiaire et ne sont pas reliées au modèle du dispositif.

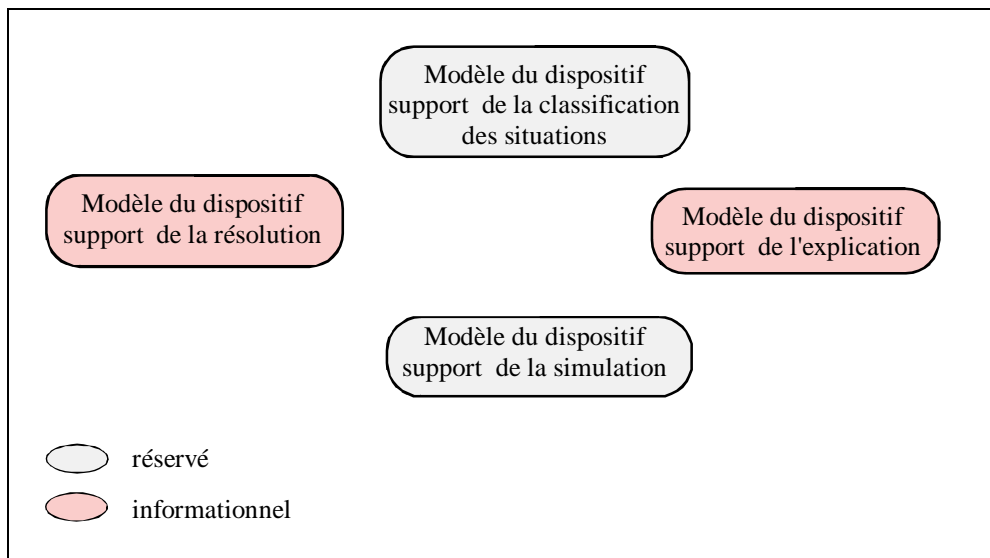


Figure 2.3 : Caractérisation des modèles du dispositif d'un SAESE

Parmi les cinq bases de connaissances qui requièrent selon nous un modèle du dispositif, la répartition entre modèles informationnels et modèles réservés s'avère simple (figure 2.3). Pour la simulation et la classification des situations, les modèles du dispositif ne servent pas directement de support pour communiquer des informations au stagiaire, nous les caractériserons donc comme des modèles réservés. En revanche, ceux qui servent de support à l'explication et à la résolution seront qualifiés de modèles informationnels, car ils servent de support à la production d'explications du fonctionnement du dispositif et à la production de commentaires sur la résolution du stagiaire comparée à celle du module expert.

2.6 Connaissances noyau et connaissances déduites

Parmi les modèles du dispositif, nous recherchons s'il existe un noyau de connaissances à partir desquelles nous pourrions déduire les autres modèles utilisés. Nous examinons l'hypothèse d'une génération partielle des modèles du dispositif à partir d'un modèle réservé, le modèle de simulation. Nous restreindrons notre cadre d'étude à des tâches de diagnostic dans des simulations à événements discrets pour concrétiser notre propos.

2.6.1 *Connaissances déduites du modèle de simulation*

Les connaissances de classification des situations peuvent être partiellement déduites de connaissances de simulation. Dans le contexte de la tâche de diagnostic, un scénario de simulation est constitué par une séquence d'événements, les défauts affectant un composant du dispositif. Auzende propose de classer les scénarios grâce à des arbres de défauts qui caractérisent les cumuls de défauts¹ et leurs effets pour un dispositif protégé² (Auzende, 1996, Auzende & Joab, 1994). La complexité du scénario sera d'abord corrélée au nombre de défauts cumulés, puis, à l'importance des effets sur le dispositif. Cette méthode est automatisable et nécessite la donnée d'une table d'associations et des connaissances techniques sur les cumuls de défauts. Une table d'associations, qui associe à un groupe d'observables, le(s) défaut(s) susceptible(s) d'affecter le dispositif peut être générée automatiquement en utilisant le simulateur. Le modèle du dispositif, support de la classification des situations peut donc être déduit du modèle de simulation. Cependant, la classification obtenue ainsi n'est pas achevée. Pour des tâches qui ne se limitent pas au diagnostic, elle sera ensuite raffinée grâce à des connaissances heuristiques qui analysent la complexité relative de cette tâche pour les scénarios considérés.

Les connaissances de résolution peuvent exploiter un modèle causal du dispositif déduit du modèle de simulation. Dans (Erce, 1995), le groupe EVA indique qu'un modèle causal du dispositif peut être déduit du modèle comportemental analogue à un modèle de simulation à événements discrets. Ce modèle causal peut servir de support au raisonnement diagnostique du dispositif. Ce modèle causal, déduit du modèle de simulation, fait partie intégrante des bases de connaissances du module expert.

Le même modèle causal du dispositif, déduit du modèle de simulation, peut être scindé entre les entités explicatives. La spécification des entités explicatives elle-même peut exploiter un modèle du dispositif. Le comportement de chaque composant est décomposé en autant d'entités explicatives qu'il existe de modes de fonctionnement différents du composant. Chaque entité explicative comporte les observables associés à cette configuration et les observables discriminants des autres configurations (Auzende, 1998). A partir de la table

¹ Les cumuls de défauts produisent des effets qualitativement différents de la somme des effets de chacun d'eux.

² Un dispositif peut être surveillé par des capteurs qui détectent les écarts à la normale de certains paramètres et qui émettent des observables pour signaler ces écarts. Un dispositif peut être protégé par un dispositif de sécurité qui élimine automatiquement certaines anomalies détectées par les capteurs de surveillance.

d'associations et de connaissances heuristiques sur les configurations, un algorithme de classification pourrait calculer automatiquement les configurations significatives des différentes entités explicatives. Le modèle du dispositif, support de l'explication, pourrait alors être déduit du modèle de simulation grâce à l'ajout de connaissances heuristiques.

L'hypothèse d'un noyau primitif des connaissances du domaine exploité par tous les composants logiciels d'un SAESE semble n'être que partiellement vérifiée. Si le modèle du dispositif, support de la résolution, peut être déduit du modèle de simulation, ce n'est pas le cas d'autres modèles qui nécessitent des connaissances heuristiques supplémentaires. Nous rejoignons les constatations du groupe EVA du PRC IA sur l'existence de connaissances primitives du domaine, de connaissances déduites ou extraites et de connaissances spécifiques absentes des modèles primitifs (Erce, 1995).

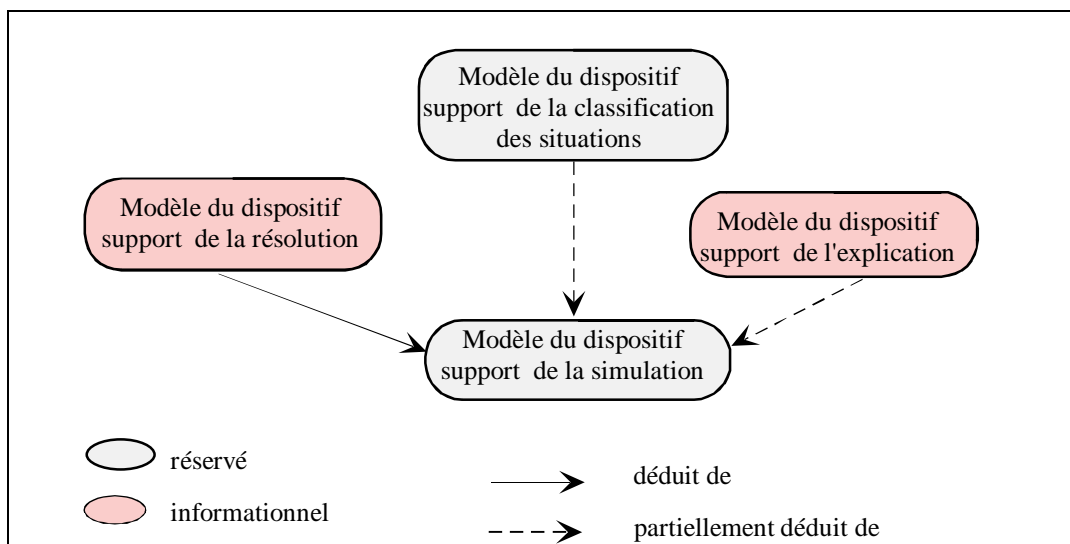


Figure 2.4 : Synthèse de nos propositions

2.6.2 Intérêt de la génération automatique

La multiplicité des modèles du dispositif pose un problème important de maintenance des bases de connaissances. En effet, à chaque modification des composants du dispositif, il est nécessaire de mettre à jour les bases de connaissances du module expert, du générateur de cursus et de l'explicateur. Fort heureusement, ces modifications importantes sont très peu fréquentes. L'introduction de nouvelles technologies dans les processus industriels est assez lente à cause de l'ampleur des investissements consécutifs à tout changement.

La maintenance des bases de connaissances pourrait donc se faire automatiquement à partir de la mise à jour du modèle de simulation. Le problème n'est pas circulaire car le modèle de

simulation est facile à maintenir si l'on suit une méthode orientée objets (par exemple UML (Kettani, et al., 1998, Muller, 1997)) : l'ajout d'un nouveau type de composant se traduit par l'ajout d'une nouvelle classe. Cet ajout reste simple si on se place dans le cadre de l'héritage simple et que la hiérarchie des classes est peu profonde. Le modèle dynamique de la classe décrit la réaction de l'objet aux événements qu'il reçoit. Ce modèle de simulation, dans la mesure où il décrit une classe de façon unitaire, est beaucoup plus simple à décrire que des interactions entre objets.

La génération automatique de bases de connaissances constitue également une aide importante à la conception des SAESE tant pour l'économie du recueil des connaissances que pour leur mise en cohérence.

2.7 Conclusion

Un SAESE, comme tous les systèmes de formation, est fondamentalement dédié à la communication des connaissances. Selon Wenger, les connaissances du domaine constituent l'objet de la communication, le modèle de l'apprenant, le destinataire de la communication et les connaissances pédagogiques, l'aptitude à communiquer (Wenger, 1987). Le modèle du dispositif est un composant central du SAESE car il concrétise la dynamique du processus. Il est constitué de modèles multiples qui ne sont pas tous communicables au stagiaire. La distinction *modèle informationnel/modèle réservé* permet d'orienter leur conception selon que le modèle soit orienté ou non vers la communication d'informations au stagiaire. Un modèle causal, fonctionnel, transformationnel ou topographique n'est pas intrinsèquement communicable mais il l'est toujours par rapport à une tâche déterminée de l'opérateur. Ce sont donc les exigences de la tâche qui fixent les modèles informationnels. Nous avons montré que les modules d'un SAESE partageaient partiellement un même noyau de connaissances. Cette hypothèse présente un intérêt considérable pour la conception et la maintenance de certaines bases de connaissances. Nous montrerons dans le chapitre 3 comment cette hypothèse peut être exploitée pour faciliter le recueil des connaissances d'un SAESE.