

TRAVAIL HUMAIN : THEORIES ET METHODOLOGIES

Titre long : Analyse des stratégies de correction de défauts en plasturgie à l'aide d'un modèle de résolution de problème à base de contraintes¹

Titre court : Analyse des stratégies de correction de défauts

Auteurs : Jean-François Richard², Pierre Pastré³, Pierre Parage³, Emmanuel Sander², Michel Futersack⁴ et Jean-Marc Labat⁵

Summary

Keywords: Problem-solving, computer simulation, individual protocol analysis, constraint

Title. Analysis of strategies for correcting defects using a constraints model

The constraints model has been applied to a professional task, dealing with the regulation of a pressing-machine devised to manufacture plastic products so that visual and structural defects are avoided. This problem-solving model has been formerly developed for classic puzzles such as tower of Hanoi or river crossing problems. The basic idea is that solving a problem is a compromise between three categories of constraints: goals based on knowledge about the situation, interpretations of objects and actions, and everyday learning heuristics. Constraints are rules defined on the set of possible actions, which allow some of them and prohibit the rest. They may be combined in such a way that restrictions are cumulated and that a set of constraints is a more restrictive constraint. This addition may result in an impasse, a situation where each action is prohibited by at least one constraint. Resolving the impasse is obtained by the relaxation of the least preferred constraint, which assumes an ordering of constraints. Contrary to other problem-solving models, the constraints model makes it possible not only to simulate a protocol but also to make a diagnosis of the set of constraints, which enables to simulate at best the protocol. In that way it provides an analysis of the solving process at the individual level and makes obvious the differences as well as similarities in the way problems are solved. At first the possible rules have to be extracted through a hand-made analysis of protocols and expressed in the form of constraints. A set of algorithms have been programmed which, through a series of steps, select the best set

¹ La recherche a été financée par une subvention du programme de sciences cognitives TCAN du CNRS

² Laboratoire Paragraphe, équipe CRAC, Paris8, richard@univ-paris8.fr, Emmanuel.Sander@univ-paris8.fr

³ Chaire de communication didactique, CNAM, pastre@cnam.fr, pierre.parage@cnam.fr

⁴ Faculté de Droit, Paris5, mrf@math-info.univ-paris5.fr

⁵ Lip6, Paris6, jean-marc.labat@upmc.fr

of constraints using a measure of distance between the data and the results of simulation. As the task implies both asking for information and changing the parameters which regulate the pressing- machine, two sets of decisions have to be considered and then two decision spaces have to be defined: (i) choosing between an action on the device or an information request about which defects are present at the moment or how the curve of pressures which provides indications about the state of some of the parameters of the system looks (ii) when it has been decided to modify the system decide which parameter to change and in what direction. The protocols of 13 regulators having solved a series of problems have been collected in an experimental setting, which simulates the interaction with the machine. For each of them it has been possible to find a set of rules, which simulates the behaviour very accurately. The analysis has revealed outside general heuristics three main strategies in dealing with the task. The simpler one does not take information from the curve into account and relies only on knowledge of the possible causes of defects and on trial-to-trial feedback. The second one relies only on the information provided by the curve in order to modify the parameters readable from the curve, and requests information about defects only when the curve looks normal. The third one always compares the information provided by the defects and the information provided by the curve. The results are discussed in relation with the types of strategies described in the literature for diagnostic tasks.

Différentes méthodes ont été développées pour l'analyse de la résolution de problème. La première est l'analyse manuelle des protocoles individuels qui vise à donner une interprétation des comportements observés soit en termes de procédures mises en œuvre (Nguyen-Xuan, Cauzinille, Frey, Mathieu, & Rousseau, 1983 ; Nguyen-Xuan & Hoc, 1987) soit en termes d'interprétation de la situation et de buts sous-jacents (Richard & Poitrenaud, 1988), à partir de la confrontation de différents protocoles et de ce qui est connu de la situation. Cette analyse est difficile à systématiser et ne permet pas de justifier l'interprétation choisie par rapport à des interprétations alternatives. Des essais de systématisation ont été faits dans plusieurs directions.

Le premier est la modélisation à l'aide des systèmes de productions qui vise à simuler des stratégies de résolution et comparer les protocoles aux résultats des stratégies simulées. L'exemple le plus connu est la modélisation par Anzai et Simon (1979) de l'évolution des stratégies d'un sujet adulte au cours de séances successives de résolution d'un problème de tour de Hanoi. Cette approche a été mise en œuvre notamment pour étudier l'évolution des stratégies au cours du développement (Klahr & Robinson, 1981, pour des problèmes de tour de Hanoi ; Nguyen-Xuan et al. 1983, pour la classification multiple) et a surtout été utilisée par Anderson

(1993) pour l'analyse des activités de planification. La caractéristique d'un système de productions est qu'il décrit une stratégie pour une tâche donnée. Or les stratégies peuvent varier d'un sujet à l'autre ou chez un même sujet. Pour ajuster le formalisme à l'analyse individuelle, différents auteurs ont utilisé des modèles probabilistes où les paramètres expriment les différences individuelles d'activation de règles d'action ou de mémorisation des événements passés : Atwood et Polson (1976) pour des problèmes de jarres, Karat (1982) pour la tour de Hanoi, Schmalhofer et Polson (1986) pour des problèmes de missionnaires et cannibales.

Une autre approche d'un esprit très différent a été développée plus récemment par Hoc et Amalberti (1999) et appliquée à diverses situations de travail. Elle propose un cadre d'analyse formalisé pour la description des représentations et des opérations de traitement identifiées dans un protocole : elle consiste à découper le protocole en unités dont la description est codée à l'aide d'un formalisme prédicats/arguments. Les prédicats codent les opérations de traitement et les arguments en précisent les composantes, les représentations impliquées ainsi que les conditions et circonstances de mise en œuvre. L'ambition n'est pas de proposer un mécanisme qui engendre ces opérations pour une situation donnée mais de dégager un cadre général de description qui puisse s'appliquer à l'analyse de l'activité de différents spécialistes d'une tâche mais aussi à l'analyse de différentes tâches en vue d'une analyse comparative.

L'approche que nous illustrons ici porte sur une situation spécifique et tente de formaliser la démarche d'interprétation qui est celle de l'analyse des protocoles individuels en utilisant une forme de modélisation qui définit une règle à partir de la notion de contrainte et permet de faire un diagnostic automatique d'un protocole, c'est-à-dire d'engendrer par programme une interprétation de celui-ci répondant à certains critères. Une règle, qui exprime une contrainte, est une restriction sur l'ensemble des options possibles qui constituent l'espace de décision. L'intérêt de ce format de règle est que les restrictions provenant de plusieurs contraintes peuvent se cumuler et moyennant un mode de composition approprié définir une contrainte globale qui est de même nature et a les mêmes propriétés que les contraintes élémentaires.

En combinant le fait que tout assemblage de contraintes élémentaires est une contrainte et le fait qu'une règle exprimant une contrainte peut aussi bien définir un but, une interprétation ou une heuristique, qui sont des restrictions sur les choix possibles, on peut décrire un processus de résolution caractérisé par des heuristiques, des interprétations et une structure de buts comme un assemblage de contraintes. La recherche de la meilleure interprétation du protocole se ramène donc à la recherche du meilleur assemblage, celui qui produit la suite de choix la plus proche de celle observée dans le protocole. La recherche de cet assemblage suppose évidemment que l'on ait identifié préalablement les contraintes de base qui permettent d'écrire les règles élémentaires.

Cette identification est le travail du chercheur, la recherche du meilleur assemblage qui constitue l'interprétation du protocole est réalisée par le programme. C'est en ce sens que l'on peut dire que le diagnostic est automatique, mais bien évidemment la qualité du diagnostic dépend du degré d'exhaustivité de l'inventaire des contraintes élémentaires : celui-ci peut être complété au fur et à mesure de la simulation de nouveaux protocoles, l'idéal étant qu'il contienne toutes les règles élémentaires en termes d'heuristiques, d'interprétations et de règles de génération de buts qui peuvent se rencontrer chez les sujets étudiés.

Une contrainte élémentaire ressemble à une règle de production (elle est déterministe, elle fait partie d'un ensemble de règles), mais un assemblage de contraintes est nettement différent d'un système de productions. Tout d'abord un système de productions a une structure qui est définie par le chercheur, alors qu'un assemblage de contraintes est un pur agrégat : l'assemblage de contraintes qui modélise le processus de solution d'un sujet est bien l'analogue d'un système de productions en ce sens qu'il simule le comportement du sujet, mais la façon dont il est produit diffère complètement de la façon dont est construit un système de productions.

Une seconde différence est qu'un assemblage de contraintes peut définir non seulement une stratégie mais un processus de solution hétérogène qui comporte à la fois des embryons de stratégie mais également des heuristiques et des interprétations, caractéristiques des phases d'exploration. Ainsi Richard, Poitrenaud et Tijus (1993) ont pu simuler à l'aide de contraintes la première séance du sujet dont Anzai et Simon (1979) ont simulé seulement les séances suivantes, dans lesquelles les stratégies sont stabilisées. Ainsi la modélisation de la résolution de problème comme recherche d'un compromis entre contraintes permet de dissocier les composantes interprétative et heuristique de la composante stratégique et de simuler des protocoles comportant outre des stratégies des activités d'exploration ou des changements d'interprétation.

La troisième différence découle des précédentes : du fait que les contraintes expriment une diversité de processus intervenant dans la résolution et que l'ensemble de ces contraintes est un agrégat, elles peuvent être identifiées par combinaison progressive jusqu'à obtention de l'assemblage qui simule au mieux le protocole, et de ce fait une interprétation du protocole peut être engendrée automatiquement. Cela n'a pu être fait avec des systèmes de production, bien que ce soit une préoccupation présente depuis longtemps en EIAH (environnements informatiques pour l'apprentissage humain). Les recherches se sont orientées vers le diagnostic des connaissances possédées par l'élève plutôt que vers celui des stratégies de résolution (Wenger, 1987). Deux seulement, à notre connaissance, ont tenté une interprétation automatique du comportement de résolution. Khider, Sander, Labat et Richard (2005) proposent un système doté d'une interface permettant de recueillir les calculs réalisés dans la résolution de problèmes

arithmétiques et de coder automatiquement les erreurs selon un ensemble de catégories déterminées préalablement, mais il ne modélise pas pour l'instant le processus de génération de l'erreur. Chaachoua, Nicaud et Bittar (2005) ont développé pour le système d'apprentissage de l'algèbre *Aplusix* un système de diagnostic qui, à partir des transformations opérées, identifie les règles de transformation utilisées par un élève. Ce système fait bien le diagnostic à partir du comportement, mais il se limite à l'exploration des règles correctes : il peut identifier les règles apprises mais non simuler l'ensemble du protocole et notamment les erreurs.

Le modèle de résolution par contraintes n'a été appliqué qu'à des problèmes expérimentaux de transformation d'état : tour de Hanoi, missionnaires et cannibales (Richard et al. 1993, Richard, 1999), test de Passalong (Richard & Zamani, 2003). L'objectif est de l'appliquer à une situation industrielle de diagnostic et correction de défauts, de façon à déterminer si ce type de modélisation peut s'appliquer à une situation plus complexe. Après la description de la situation étudiée, nous présenterons le modèle et les modifications apportées à celui-ci pour exprimer la complexité de la situation, nous décrirons les contraintes qui ont été identifiées ainsi que la méthode de diagnostic puis nous indiquerons comment nous avons évalué la qualité de la simulation. Nous montrerons ensuite comment à partir des résultats de la simulation on peut prolonger l'analyse des stratégies réalisées dans l'étude ergonomique et enfin dans la discussion nous verrons comment, à partir de la simulation, on peut caractériser les procédures de diagnostic en référence aux critères utilisés dans la littérature et ainsi permettre la confrontation des nos résultats avec ceux obtenus avec d'autres approches.

I- La tâche professionnelle

I-1- La situation de travail

La tâche étudiée est une tâche de réglage de presses à injection plastique en vue de corriger des défauts observés sur les produits. Une presse à injecter est une machine qui transforme des granulés plastiques en objets moulés. La matière plastique est chauffée jusqu'à son point de fusion puis injectée sous forte pression dans les empreintes d'un moule, où elle est refroidie jusqu'à solidification. On distingue une phase dynamique d'injection et une phase statique de maintien au cours de laquelle une pression de maintien est appliquée sur la matière injectée pour compenser le retrait de matière consécutif à la solidification. Le passage de l'une à l'autre s'appelle la commutation. Une presse à injecter n'est pas un système dynamique, au sens donné par Hoc (1990) : les transformations résultent de l'action des opérateurs. On peut donc traiter les corrections de défauts comme un cas particulier de problèmes de transformation d'états.

I.2- La tâche expérimentale

La situation professionnelle est simulée sur un simulateur construit à partir d'entretiens avec un expert (Pastré, 1994) qui retient les possibilités de demande d'information et les modifications des réglages de la tâche professionnelle avec quelques simplifications. Deux types d'informations peuvent intervenir pour le diagnostic : les défauts et la courbe des pressions. Les défauts s'affichent en clair sur l'écran au début du problème ou après demande de l'opérateur. Il y a quatre couples de défauts possibles, un seul défaut du couple pouvant apparaître à la fois :

- manque/bavure,
- serrage en excès / en défaut (défaut de côtes produisant un mauvais ajustement des pièces)
- présence d'une brûlure/ présence de stries sur la pièce
- retassure/cassure (la pièce présente une dépression ou elle est sujette à casser)

La seconde information est la courbe des pressions (figure 1) qui informe sur les valeurs de cinq paramètres : le temps d'injection (noté T_i), c'est-à-dire la durée de la phase d'injection, la pression de commutation (P_c , le niveau de pression qui déclenche le passage de la phase d'injection à celle de maintien, la contre-pression (C_p : pression appliquée au moment du dosage de la matière à injecter), la pression de maintien (P_2) et le temps de maintien (T_2), à savoir le temps pendant lequel est appliquée la pression de maintien.

(figure 1 ici)

Figure 1- Exemple de courbe stylisée des pressions sur le simulateur

Figure1- Example of schematic curve of pressures as presented on the simulator

Les possibilités de réglage sont le changement de valeur de sept paramètres entre trois possibles (normale, élevée, faible) : les cinq indiqués ci-dessus plus le temps de refroidissement (T_3), la température de la matière (T°), et le changement de la buse d'injection (B) qui peut être matée et réduire le passage de la matière. Les actions consistent à cliquer sur la flèche *augmenter* ou *diminuer* de chaque paramètre et sur la commande *changer* de la buse. Si on tente de dépasser la valeur limite, un message apparaît indiquant que la limite est atteinte.

I-3 Les opérateurs

Les observations ont été recueillies par P. Pastré (1994) auprès des 13 réglieurs d'une entreprise de plasturgie spécialisée dans la fabrication de produits exigeant une grande qualité de finition. Leur niveau de compétence ainsi que leurs parcours professionnels sont très variés : certains ont une formation technique, mais beaucoup ont fait leur apprentissage sur le tas et leur expérience professionnelle est variable. Il serait difficile de les répartir entre novices et experts.

I-4- La procédure

Un problème débute par la présentation des défauts : on peut alors faire un réglage ou demander la courbe. Après un réglage, on peut soit faire un nouveau réglage soit demander la

courbe ou les défauts ; après avoir été informé sur la courbe et/ou les défauts, on peut faire un réglage ou décider que le problème est terminé. Quand une nouvelle information apparaît, l'autre disparaît, mais la précédente peut être redemandée. La première séance comportait neuf problèmes et la seconde huit. Seulement huit régleurs ont participé à la seconde séance.

II- L'adaptation du modèle des contraintes à la tâche de diagnostic et correction des défauts

On a construit une architecture adaptée à la complexité de la tâche de diagnostic. Dans les situations de transformation d'états il y a un seul espace de décision constitué par les actions autorisées qui définissent les changements d'état possibles et donc l'ensemble des états accessibles. Dans la situation de diagnostic il y a plusieurs espaces de décision, celui de la recherche d'information et celui de la modification des réglages : il faut donc définir des règles de choix à l'intérieur de chaque espace et des règles de passage d'un espace à l'autre.

Toutes les règles sont exprimées sous la forme de contraintes. Cela permet de conserver les deux avantages majeurs des contraintes : pouvoir exprimer des impasses (états dans lesquels les contraintes présentes interdisent toute action) et pouvoir agréger des contraintes élémentaires. On peut donc exprimer le processus de résolution comme un assemblage de contraintes et ses modifications éventuelles par des changements de celles-ci et procéder par programme à la recherche de l'assemblage qui avec des modifications éventuelles simule au mieux le protocole.

Nous rappellerons les définitions de base et les propriétés du langage des contraintes, nous décrirons la modélisation qui a été faite de la situation, nous présenterons les contraintes élémentaires qui ont été identifiées à partir de l'étude ergonomique et de l'analyse des protocoles puis nous indiquerons comment se fait la recherche des contraintes permettant de simuler un protocole et enfin nous préciserons comment on évalue la qualité de la simulation.

II.1-Le langage des contraintes

Une contrainte est définie sur un ensemble d'options possibles : c'est une restriction sur ces options qui en autorise certaines et en exclut d'autres. Elle peut aussi être indifférente : si ses conditions ne s'appliquent pas elle n'exclut rien. Formellement une contrainte est un vecteur booléen qui pour chaque option a l'une des valeurs : autorisée (0), interdite (1)

Toutes les contraintes d'un même espace de décision doivent porter sur les mêmes options : c'est la condition pour les combiner. On utilise la règle suivante : étant donné un ensemble de contraintes, une option est autorisée si elle est autorisée par chacune d'elles, elle est interdite si une ou plusieurs l'interdisent, à l'image d'une décision collective avec droit de veto. Avec cette règle de composition tout assemblage de contraintes est une contrainte : la règle qui exprime l'assemblage cumule les restrictions apportées par chaque contrainte élémentaire.

Pour toute contrainte (élémentaire ou assemblage), on peut déterminer une distance au

protocole : on définit un indice qui tient compte du fait que l'option observée dans le protocole est ou non une des options compatibles avec la contrainte et du fait que la contrainte est plus ou moins restrictive. Entre deux contraintes compatibles avec le protocole à un essai donné, la plus restrictive est plus proche du protocole parce qu'elle est plus prédictive de ce qui est observé. Si l'on calcule cet indice sur l'ensemble des essais du protocole, sa valeur moyenne est une sorte de coefficient de corrélation avec le protocole. Dans le diagnostic des contraintes simulant un protocole, cet indice permet d'éliminer les contraintes non corrélées avec le protocole et de retenir parmi celles qui sont corrélées le sous-ensemble qui présente la corrélation la plus forte.

Il se peut que le cumul des restrictions fasse qu'aucune option ne soit permise : c'est l'impasse. Un assemblage de contraintes est muni d'un ordre de priorité, estimé à partir des cas d'incompatibilité de chaque contrainte avec le protocole: la moins prioritaire est suspendue provisoirement, le temps de la décision, et si cela ne suffit pas la précédente l'est également. Ainsi les règles peuvent avoir des exceptions, mais celles-ci sont régies par la règle de priorité. Le fait que le processus de solution est régi par le cumul de restrictions permet de formaliser l'idée que la résolution est un compromis entre des exigences provenant de sources diverses éventuellement contradictoires : des buts, des interprétations, des heuristiques. Quelle que soit la source des restrictions, celles-ci se comportent de la même manière.

Le tableau 1 montre sur un exemple extrait de la simulation d'un protocole comment fonctionne le mécanisme de décision en cas d'impasse. Les contraintes actives pour l'essai sont présentées de la première à la dernière ligne selon leur ordre de priorité : 0 indique que l'action est autorisée par la contrainte, 1 qu'elle est interdite. Les deux premières contraintes sont des heuristiques d'action et les deux suivantes des buts. Le cumul des contraintes selon la règle ci-dessus aboutit à une impasse (contrainte globale, ligne 5). La contrainte de moindre priorité, celle de la ligne 4, est donc levée et la règle de décision appliquée aux trois premières aboutit à la décision qui est en dernière ligne : augmenter la pression de commutation P_c .

Tableau 1 ici

Tableau 1 : Exemple illustrant le mécanisme de cumul des contraintes (voir I.2 pour la signification des sigles)

Table 1 : Example showing how constraints are combined to generate a decision (see I.2 for the meaning of abbreviations)

II.2- La modélisation de la situation

La tâche de réglage est une situation de diagnostic. Le régleur ne voit pas directement les états comme un sujet qui résout la tour de Hanoi. Il doit décider quand prendre de l'information et quand agir : on définit pour cela un espace de décision appelé gestion de la tâche. Une fois

prise la décision d'agir, il faut choisir le réglage : on appelle cette décision choix des réglages. On a donc deux espaces de décision et par suite deux ensembles de contraintes.

Dans la gestion de la tâche il y a deux états possibles, celui où on vient d'agir sur le système (on l'appellera état réglage), où le choix est entre faire un nouveau réglage et prendre de l'information, et celui où on est en train de prendre de l'information (état de prise d'information) et où on peut demander la courbe, demander les défauts, passer à l'action ou encore décider que le problème est terminé (Figure 2). En cas de demande de courbe ou de défaut, on reste dans l'état de prise d'information ; dans le cas où l'option choisie est de passer à l'action, on procède au choix d'un réglage et dans le cas de choix de la dernière option le problème est terminé. Au début du problème on est dans l'état de prise d'information : on peut demander la courbe ou les défauts, ou décider que l'on a assez d'information et passer à l'action. Ainsi dans l'état action sur le système on a deux options et dans l'état prise d'information on en a quatre.

Figure 2 : Schéma de gestion de la tâche

Figure 2 : Schema showing the model of the task

Une fois qu'on a décidé d'agir (passage ou retour à l'état réglage), on est dans l'espace de choix des réglages : les options sont les actions possibles (15 au total) sur les 7 paramètres qui peuvent être modifiés dans un sens ou dans l'autre et le changement de la buse qui n'a qu'une possibilité. Outre les décisions concernant la prise d'information et le choix des réglages, définies à l'aide des contraintes qui seront décrites plus loin, il y a deux éléments supplémentaires à modéliser, qui décrivent la compétence des régulateurs : la lecture de la courbe et la connaissance des causes de défauts.

La lecture de la courbe est décrite par cinq paramètres, correspondant à l'état des réglages pour lesquels on peut avoir une information sur la courbe. Ils peuvent prendre trois valeurs qui expriment d'une part la conscience qu'a le régulateur de savoir lire la courbe et d'autre part sa capacité de la lire correctement :

0 : le paramètre n'est pas considéré comme lisible sur la courbe d'où pas de demande de courbe

1: le paramètre est lisible, la courbe est demandée et la valeur du paramètre est lue correctement

0,5: le paramètre est lisible, la courbe est demandée mais elle peut être lue correctement ou non

Les connaissances sur les causes de défauts sont représentées comme des buts exprimant les hypothèses sur les causes de défauts, comme on le précisera plus loin.

II.3- L'inventaire des contraintes potentielles

L'inventaire des contraintes élémentaires est une phase essentielle de la modélisation : la simulation du protocole résultant d'un assemblage de contraintes élémentaires, il est indispensable de définir les éléments susceptibles d'entrer dans l'assemblage. Cet inventaire doit

être fait pour chaque situation car les interprétations et les buts sont spécifiques : seules les heuristiques qui sont des règles générales d'action sont communes à diverses situations.

Cet inventaire a été fait à partir des résultats de l'analyse ergonomique réalisée par P. Pastré (1994) et de l'analyse des protocoles. L'identification des contraintes se fait en plusieurs étapes : on simule d'abord celles qui sont les plus apparentes en se centrant sur les protocoles qui sont les plus intelligibles à la première analyse et qui par ailleurs diffèrent le plus les uns des autres. Au vu des résultats de la simulation réalisée avec les premières contraintes identifiées, beaucoup de comportements restent inexplicables : on se centre alors sur ceux-ci, on examine dans quelles conditions ils apparaissent, et on recherche ce qui peut leur être commun et suggérer une règle de décision ayant un sens pour la tâche. L'expérience montre que des règles subtiles indécélables en première analyse apparaissent assez facilement après ce filtrage du protocole. Ainsi une fois testées des règles immédiates telles que « *demander la courbe après avoir agi sur un paramètre lisible sur la courbe* », ou « *demander seulement le défaut après avoir agi sur un des paramètres non lisibles sur la courbe* », on a observé que les demandes de courbe suivant des actions où normalement on ne demande que le défaut concernent les cas où l'action a aggravé le défaut ou l'a laissé inchangé. Demander la courbe en ce cas est raisonnable, car cela peut permettre d'inférer que l'on est dans une situation où deux paramètres mal réglés se compensent. Ainsi, la règle « *si après avoir agi sur un paramètre non lisible sur la courbe, le défaut est aggravé ou inchangé, faire un réglage ou demander la courbe* » a-t-elle été ajoutée. Comme on l'a dit, on a deux ensembles de contraintes correspondant aux deux espaces de décision, celles qui concernent la gestion de la tâche et celles qui relèvent du choix des réglages

II.3.A- Les contraintes de gestion de la tâche

Elles sont divisées en trois sous-groupes (voir le détail en annexe) :

- les contraintes qui concernent l'arbitrage entre un nouveau réglage et une prise d'information : elles interviennent dans l'état de réglage et précisent les conditions de choix de ces deux options. Ce sont le fait que le dernier réglage est valide ou non, le fait qu'il est l'inverse du précédent et donc l'annule ou encore le fait qu'il visait à corriger la courbe. Si le dernier réglage n'est pas valide, rien n'a été modifié et le régleur étant informé peut donc faire un nouveau réglage ; de même en cas de retour à l'état précédent, l'information a été donnée et peut être retrouvée en mémoire, il n'est pas nécessaire de la demander. De même si l'action précédente visait à corriger un paramètre de la courbe, l'état de celle-ci peut être anticipé et il n'y a pas besoin de la revoir si elle est bien lue. Ces contraintes concernent l'utilité de la demande d'information
- les contraintes qui interviennent dans l'état de prise d'information comportent quatre options : demande de courbe, de défaut, passage au réglage ou arrêt du problème. Ces contraintes

précisent les conditions du choix de chaque option : ce sont les informations demandées depuis le dernier réglage (courbe et ou défaut), la nature de celui-ci (le fait qu'il porte ou non sur un paramètre sur lequel on peut avoir une information sur la courbe, le fait que le régleur pense pouvoir lire la valeur du paramètre sur la courbe (c'est-à-dire qu'il soit caractérisé par une valeur du paramètre différente de zéro), l'évolution de la situation (par exemple le fait que le défaut ait été aggravé par la dernière action). Les conditions de l'option arrêt du problème définissent le niveau d'exigence de l'opérateur pour décider que le problème est résolu. Les contraintes expriment les variations de ce critère selon les régleurs : il peut ne porter que sur les défauts ou prendre en compte à la fois à la fois l'état de la courbe et celui des défauts.

II.3.B- Les contraintes de choix des réglages

Les options possibles pour ce choix sont les 15 actions permises par le simulateur : sept paramètres dont la valeur peut être augmentée ou diminuée et un paramètre sur lequel une seule action est possible (changer la buse). Trois types de contraintes interviennent dans ce choix: les heuristiques, les buts qui expriment les hypothèses sur les causes des défauts et les buts qui visent à corriger les paramètres défectueux de la courbe sans considérer les défauts. Ces sources de décision peuvent être en compétition en ce sens qu'elles peuvent ne pas conduire aux mêmes actions et l'opérateur peut donner priorité à l'une ou l'autre de celles-ci: c'est une composante importante des stratégies dont nous parlerons plus loin.

Les heuristiques sont des règles d'adaptation de la vie quotidienne. Les unes sont liées au feedback : par exemple si le dernier réglage aggrave le défaut, on revient en arrière en l'annulant ou encore s'il n'est pas valide, on fait le réglage inverse (si on a tenté d'augmenter un paramètre et que l'on est informé que c'est impossible, on le diminue). Les autres (contraintes mnésiques) sont liées au souvenir de ce qui a été fait auparavant : si on a modifié récemment un paramètre, on évitera de le modifier à nouveau (voir le détail en annexe).

Les buts liés aux connaissances sur les causes de défauts visent à ramener les paramètres potentiellement responsables à leur valeur normale : si, par exemple, la cause supposée d'un défaut est la pression de maintien trop élevée, le temps de maintien trop long ou les deux, la contrainte autorise de diminuer pression de maintien et de diminuer le temps de maintien et interdit les autres options. Ces buts ont été définis à partir de l'analyse réalisée par Pastré (1994) à partir d'entretiens avec un expert et de l'analyse de la tâche : il y a des buts associés à chaque défaut mais également à certains couples de défauts, l'association de deux défauts conduisant à des hypothèses spécifiques. Les causes potentielles d'un défaut sont hiérarchisées : il y a des causes principales et des causes annexes qui peuvent interagir. Cet ordre d'importance est exprimé dans le modèle par un ordre de traitement : les causes principales sont traitées en

priorité et les causes annexes ne sont envisagées que si les principales ont été traitées et que si, dans le cas d'un paramètre lisible sur la courbe, le paramètre n'est pas à sa valeur normale. On a défini ainsi un modèle représentant les connaissances expertes et l'on a affaibli ces connaissances de deux façons pour représenter les différences entre régleurs. Tout d'abord on a supposé que les régleurs pouvaient ne pas connaître la hiérarchie entre les causes mais ne faisaient pas d'hypothèses erronées sur celles-ci. Ensuite on a considéré qu'ils pouvaient ignorer une cause ou en avoir une connaissance incomplète : par exemple savoir qu'un paramètre est concerné mais ne pas savoir en quel sens le modifier. Les buts correspondant à ces connaissances dégradées ont été également exprimées sous la forme de contraintes. Le traitement de ces buts fait intervenir à la fois les connaissances sur les causes de défauts et les informations lues sur la courbe : ainsi si l'opérateur simulé sait lire la courbe et si la valeur d'un paramètre qui est une cause possible du défaut est normale, alors ce paramètre est exclu comme cause du défaut. De ce fait la compétence en matière de lecture de la courbe intervient dans le traitement de ces buts.

La contrainte qui exprime le but de corriger les paramètres défectueux de la courbe ne tient pas compte des défauts mais seulement des valeurs lues sur la courbe. Pour les paramètres lus correctement (valeur 1), la contrainte n'autorise que les réglages corrigeant ceux qui sont mal réglés. Pour ceux qui sont lus correctement ou non (valeur 0,5) elle autorise la modification du réglage dans les deux sens. Si tous les paramètres de la courbe sont lus correctement et s'ils sont à leur valeur normale, la contrainte permet de modifier seulement les paramètres hors courbe.

Les premières tentatives de simulation ont montré que les trois catégories de contraintes ne contribuaient pas également au choix des réglages : il faut supposer des priorités entre elles. En effet sur plusieurs essais, on peut n'avoir que des demandes de courbe : sans information sur les défauts, ni les heuristiques ni les buts ne peuvent intervenir. A l'inverse, il peut n'y avoir que des demandes défauts, alors les réglages ne peuvent pas dépendre de la courbe. L'identification de ces priorités a été faite ainsi: la stratégie de correction de la courbe n'est possible que s'il y a eu une demande de courbe depuis le dernier réglage . A l'inverse, les buts portant sur les défauts ou les heuristiques supposant un feedback ne peuvent intervenir s'il n'y a pas eu de demande de défaut depuis la dernière action. S'il y a eu à la fois demande de défaut et demande de courbe depuis le dernier réglage, alors la priorité ne peut être déterminée qu'a posteriori en regardant avec quelle catégorie de contraintes l'action effective est compatible.

II.3- Le diagnostic des contraintes permettant de simuler un protocole

Nous ne donnerons que le principe du diagnostic car la mise en œuvre est techniquement assez complexe. On explore l'espace défini par les combinaisons possibles des contraintes pour rechercher l'assemblage qui, avec le moins de changements possible, prédit les choix les plus

proches de ceux observés dans le protocole. On commence par tester chaque contrainte isolément et on retient celles qui sont corrélées avec le protocole en utilisant la mesure de distance évoquée plus haut qui est basée sur la compatibilité (l'action du protocole est autorisée ou non par la contrainte) et sur la prédictibilité (nombre d'actions permises). On agrège progressivement les contraintes en commençant par les plus corrélées : à chaque ajout d'une contrainte on calcule la distance de l'assemblage au protocole et on ne la retient que si la distance est plus faible. Cette démarche est permise par le fait que tout assemblage de contraintes respectant la règle d'assemblage est une contrainte (donc on peut lui associer une distance).

Du fait que les contraintes font intervenir la compréhension de la courbe, il faut explorer les combinaisons possibles des valeurs de compréhension et rechercher le patron de valeurs qui conduit à la simulation la plus proche du protocole. Il faut aussi identifier quelles sont les causes de défauts connues d'un régleur : on se base pour cela sur les modifications de réglages qu'il a choisies quand le défaut est présent. La recherche est compliquée par le fait qu'il peut y avoir des changements dans le jeu des contraintes en raison des apprentissages qui peuvent intervenir au cours de la résolution des différents problèmes. On recherche la configuration de contraintes qui avec un minimum de contraintes et le minimum de changements produit la simulation qui sur l'ensemble des problèmes est la plus proche du protocole.

II.4- Les résultats de la simulation et l'évaluation de la qualité de celle-ci

Le résultat de la simulation est une suite d'épisodes, un épisode étant une suite d'essais où les contraintes sont les mêmes : pour chaque essai de l'épisode on a la liste des contraintes qui s'appliquent, les actions interdites et celles autorisées. L'évaluation de la qualité de la simulation se fait avec la mesure de distance décrite plus haut qui combine la compatibilité de la simulation avec le protocole (le choix observé est ou non une des options autorisées par la simulation) et la prédictibilité du protocole à partir de la simulation (nombre d'options autorisées par celle-ci).

Dans le tableau 2, on présente par régleur pour chaque groupe de contraintes la fréquence des cas de non compatibilité et celle des cas où la prédictibilité est maximale.

(tableau 2 ici)

Tableau 2 – Qualité de la simulation en termes de compatibilité et prédictibilité (voir texte)

Table 2- Quality of the adjustment: for each participant % of cases of inconsistency between predictions and data and % of cases of very high predictability. The participants having solved a single series of problems are marked with an asterisk

Les cas d'incompatibilité sont pour tous les régleurs rarement supérieurs à 5% : ce taux peut être considéré comme satisfaisant, compte tenu du fait que l'on utilise seulement une cinquantaine de contraintes au total outre la compréhension de la courbe et les connaissances des

causes de défauts pour simuler l'ensemble des régleurs. Vu la complexité de la tâche, c'est peu : cela signifie que ces règles sont pour la plupart partagées par un nombre important de régleurs.

Pour la prédictibilité, le tableau 2 indique le pourcentage de cas où celle-ci est maximale. Lorsqu'il y a deux options, comme pour l'arbitrage entre réglage et prise d'information (état de réglage) le pourcentage de cas où une seule option est autorisée est le complément de celui des cas d'incompatibilités, s'il n'y a pas d'essai où les contraintes n'excluent rien. On peut donc s'attendre à ce qu'il soit élevé. Lorsqu'il y en a quatre (prise d'information) le pourcentage de cas où une seule option est autorisée dans la simulation est pratiquement toujours supérieur à 50%. Beaucoup de contraintes autorisent deux choix (celles dans lesquelles on peut demander indifféremment la courbe ou le défaut), on ne peut guère attendre une valeur plus élevée.

Pour les réglages, où l'on a 15 options, nous considérons les cas où la simulation permet une ou deux options, à savoir ceux où le comportement est presque entièrement prédictible. Cela correspond en gros au cas d'un expert qui aurait le comportement optimal, compte tenu du fait que souvent plusieurs choix sont justifiés. Les différences sont fortes entre les régleurs. Pour deux d'entre eux (Cha et Jac) les deux tiers des actions sont très prédictibles: leurs stratégies ont été bien identifiées et sont performantes. Pour les autres régleurs sauf deux, le pourcentage d'actions très prédictibles varie entre 22% et 58%. Ils n'ont pas, comme on le verra plus loin, une stratégie à la fois stable et efficace : soit la stratégie est stable (Ber, Luc, Jea), mais elle ne prend en compte que les défauts, ou bien la courbe est mal lue, soit elle évolue du début à la fin de la série des problèmes. La prédictibilité plus faible reflète l'indétermination qu'il y a dans la stratégie des régleurs, le fait que celle-ci laisse plus de choix possibles. En conclusion, la qualité de la simulation est satisfaisante : la compatibilité est manifestement bonne à peu d'exceptions près et la prédictibilité est du niveau de ce qu'on peut attendre vu les stratégies des régleurs.

III- L'analyse des résultats de la simulation

La simulation informe directement sur les différences entre les régleurs concernant leur capacité de lecture de la courbe, leur connaissance des défauts et leur niveau d'exigence. Nous ne ferons qu'évoquer rapidement ces aspects, car ce n'est pas l'objet de cet article. La pression et le temps de maintien sont lus correctement par tous les opérateurs sauf trois et ces paramètres sont toujours les premiers à être traités. Les autres sont difficiles à lire : même les régleurs qui ont des stratégies performantes font des erreurs pour le temps d'injection et la pression de commutation. La connaissance des causes de défauts en revanche diffère peu entre les régleurs : ce n'est pas une source majeure de différence. Le niveau d'exigence du régleur est donné par le critère utilisé pour arrêter le problème. Les régleurs qui considèrent seulement les défauts ont au mieux le critère absence de défaut mais peuvent accepter un léger défaut de serrage très difficile

à corriger sans la courbe. Le critère le plus exigeant, absence de défaut et courbe normale, est respecté par très peu de régleurs, sans doute parce qu'il requiert de très bien lire la courbe.

Les résultats de la simulation peuvent être également être considérés et traités comme des données : on peut faire sur eux des analyses statistiques comme sur les comportements de base. L'avantage est que ce sont des données intelligibles puisqu'elles sont une interprétation du protocole : elles permettent donc des analyses complexes comme celle des stratégies. Nous allons montrer comment on peut à partir des résultats de la simulation prolonger l'analyse de P. Pastré (1994 , 2004) qui dégagait deux grands types de stratégies. Dans la première, les prises d'information portent à la fois sur la courbe des pressions et les défauts. Elle est le fait des régleurs les plus compétents, elle aboutit à une solution sans défaut et où la machine est bien réglée. La seconde est le pilotage par les défauts : les prises d'information portent cette fois uniquement sur les défauts : ceux-ci sont corrigés mais la machine est souvent mal réglée.

Dans notre analyse, certaines stratégies peuvent être identifiées directement à partir des contraintes présentes dans la simulation : c'est le cas des stratégies de gestion des réglages .

III.1. Les stratégies de gestion des réglages

Nous avons vu que les contraintes qui définissent le choix à faire après un réglage (nouveau réglage ou demande d'information) s'ordonnent sur une dimension représentant la tendance à repousser de plus en plus loin le moment de la demande d'information. À une extrémité, la demande d'information n'est pas nécessaire (elle est faite après un réglage non valide) : ce cas n'apparaît pratiquement jamais. Il faut donc qu'une modification du système soit intervenue pour qu'il y ait demande d'information. La plupart du temps (88%), celle-ci intervient dès qu'un réglage valide a été réalisé. Les stratégies plus élaborées, consistant à faire plus d'un réglage avant de demander l'information, parce qu'on peut inférer l'état du système, sont relativement rares. L'inférence peut consister à se référer à un état antérieur connu, c'est le cas lorsqu'un réglage a été annulé: si l'information a été demandée avant le réglage annulé, il n'est pas nécessaire de la redemander puisqu'on est revenu au même état. Ces cas ne sont pas très fréquents globalement (6%) mais ce comportement est néanmoins systématique, vu la rareté des cas de retour à un état précédent : ils se rencontrent chez les trois quarts des régleurs. L'inférence peut être aussi une anticipation de l'effet d'un réglage : un régleur sachant lire la courbe et ayant modifié un de ses paramètres défectueux n'a pas besoin de la demander, car il sait que ce paramètre a été ramené à la normale : il peut immédiatement corriger un autre paramètre dont la courbe indique qu'il est défectueux. Ces cas sont du même ordre d'importance que les précédents (5%). Pratiquement est respecté le principe de demander de l'information dès qu'un réglage a été modifié, à moins que l'état du système puisse être inféré, auquel cas un nouveau

réglage est possible. C'est le principe de base de la méthode expérimentale : pour rechercher la variable responsable d'un changement, ne faire varier qu'une variable à la fois. Un seul régleur ne respecte pas ce principe (dans 5% des cas il fait deux actions de même sens sur un paramètre).

L'analyse des autres stratégies est basée sur les conjonctions de contraintes : si certaines contraintes sont présentes simultanément dans certains protocoles et pas dans d'autres, ces contraintes conjointes sont des macro-règles interprétables comme des stratégies. Cette analyse a été faite pour la demande d'information et le choix des réglages

III.2- Les stratégies de demande d'information

Trois stratégies ont été identifiées: on trouvera en annexe les contraintes qui les définissent désignées par les lettres D (pour défauts), C (courbe) et CD (courbe/défauts).

- Le pilotage par les défauts ignore complètement la courbe. Au début du problème, comme les défauts sont présents, un réglage est fait immédiatement ; le défaut est demandé aux essais suivants avant de faire un réglage, et s'il reste des défauts un réglage est fait.

- Dans le pilotage par la courbe, les décisions sont les mêmes pour les réglages portant sur un paramètre hors courbe ou sur un paramètre de la courbe non lisible. En revanche après un réglage sur un paramètre lisible, la courbe est toujours demandée d'abord et jamais le défaut. Si elle est anormale, elle est aussitôt corrigée : le défaut n'est demandé que si la courbe est normale. Une fois que courbe et défaut ont été demandés, un réglage est fait. Cette stratégie donne la priorité au traitement de la courbe : sont corrigés d'abord les paramètres défectueux qu'on sait lire et ensuite seulement sont pris en compte les défauts imputables aux autres paramètres.

- La stratégie de pilotage par la courbe et les défauts utilise à la fois l'information de la courbe et celle des défauts et examine leur compatibilité. Des effets de compensation entre les paramètres peuvent en effet créer des discordances entre les premières et les secondes. L'information sur la courbe et le défaut sont demandées systématiquement, notamment après un réglage sur la courbe ou même après un réglage sur un paramètre hors courbe, si le défaut est inchangé ou aggravé. La différence avec le pilotage par la courbe est très nette quand sont présentes à la fois l'information sur la courbe et celle sur le défaut. Au lieu de prescrire toujours un réglage, cette stratégie autorise aussi de redemander soit la courbe soit le défaut selon ce qui a été demandé en dernier dans les cas suivants : il n'y a plus de défaut et la courbe est anormale, la courbe est normale mais il y a des défauts, le défaut est inchangé ou aggravé, les paramètres défectueux de la courbe ne sont pas les causes connues du défaut.

III.3- Les stratégies de choix des réglages

Dans le choix des réglages on a, outre les trois stratégies définies pour la prise d'information, la stratégie basée sur les heuristiques, : celle-ci est définie par le fait que les

contraintes de la catégorie heuristiques sont les seules à déterminer le choix du réglage à l'exclusion des buts portant sur la correction de la courbe ou sur la correction des défauts.

Les stratégies de pilotage par les défauts, par la courbe, par la courbe et les défauts peuvent être identifiées à partir de la contrainte exprimant le but de corriger les paramètres défectueux de la courbe et des contraintes exprimant les buts liés aux hypothèses sur les causes de défaut. Le pilotage par la courbe est défini par la correction prioritaire de la courbe, ce qui est cohérent avec la prise d'information : il y a demande de courbe, correction et vérification sur la courbe de l'effet du réglage. Le pilotage par les défauts correspond aux cas où les buts liés aux causes de défauts sont prioritaires dans le choix des réglages, où la courbe est absente et les défauts présents. Le pilotage par la courbe et les défauts correspond aux cas où ces mêmes buts sont prioritaires mais où courbe et défauts sont présents.

III.4- Les résultats de l'analyse des stratégies

La stratégie de pilotage par les défauts est présente chez quatre régleurs, du début à la fin pour deux d'entre eux (Luc et Jea), avec une transition vers la stratégie courbe/défauts à la fin du protocole pour deux autres (And et Ber). La stratégie de pilotage par la courbe est présente chez un seul régleur (Cha). La stratégie de pilotage par la courbe et les défauts s'observe chez quatre régleurs qui diffèrent par ailleurs beaucoup dans leurs compétences en lecture de la courbe. L'un (Jac) lit bien, quoique non parfaitement, tous les paramètres et se révèle très performant, les trois autres (Fran, Eti et Mic) lisent seulement trois paramètres. A l'examen, il faut distinguer dans cette stratégie deux groupes de contraintes : les contraintes de base consistant à ne pas faire de réglage tant qu'on n'a pas à la fois l'information sur la courbe et le défaut et les contraintes de comparaison des deux types d'information quand il y a des discordances entre les deux. Un régleur (Jac) a toutes ces contraintes, deux autres n'ont que les contraintes de base (Eti et Mic) et le troisième (Fran) est intermédiaire. Les quatre autres régleurs ont une stratégie qui évolue de la stratégie de pilotage par les défauts vers la stratégie de pilotage par la courbe.

Les heuristiques fonctionnent comme des interruptions des autres stratégies. Leur importance est très variable selon les régleurs. La fréquence des essais où le choix du réglage dépend seulement des heuristiques va d'un peu moins de 10% jusqu'au tiers des essais.

IV- Discussion

Pour évaluer l'apport de la simulation dans l'étude des situations de travail, nous discuterons les résultats présentés et ceux résultant d'analyses complémentaires en référence aux questions débattues dans la littérature concernant les stratégies de diagnostic. Nous suivrons le cadre d'analyse proposé par Hoc et Carlier (2000) à la suite de leur synthèse des travaux visant à caractériser les stratégies de diagnostic, en distinguant, comme le font ces auteurs, la

représentation de la situation et le traitement qui en est fait. Nous retenons pour le premier aspect le type de représentation et le type de connaissance du dispositif et pour le second les heuristiques et la complexité du traitement.

Concernant le type de représentation, on oppose les représentations topographiques aux représentations fonctionnelles. Pour le dispositif étudié une représentation spatiale n'est pas pertinente, mais une représentation temporelle peut l'être dans la mesure où le processus se déroule en deux phases, l'injection et le maintien et où les défauts se rattachent à l'une ou à l'autre : on peut se demander si les régleurs traitent préférentiellement les défauts liés à l'injection. Les essais critiques pour le voir sont ceux pour lesquels on peut savoir sur quelle base a été fait le choix du réglage, défaut d'injection ou défaut de maintien: ce sont ceux où il y a à la fois des défauts d'injection et de maintien connus du régleur, où les buts liés aux défauts interviennent dans le choix du réglage (ni les heuristiques ni la stratégie de correction de la courbe n'ont la priorité) et où la modification de réglage choisie est compatible avec une hypothèse de défaut d'injection et incompatible avec une hypothèse de défaut de maintien ou l'inverse. Le traitement d'un défaut d'injection est privilégié si la fréquence des cas où le choix est conforme à une hypothèse liée à un défaut d'injection (et donc non conforme à une hypothèse de défaut de maintien) est plus forte que la fréquence de ceux où il est conforme à une hypothèse liée à un défaut de maintien. Pour faciliter la comparaison, on fait la différence entre la première fréquence et la seconde: si la différence est positive le traitement du défaut d'injection est privilégié. Il est à noter que la simulation ne distingue pas ces cas : le choix est considéré comme compatible avec les buts liés aux défauts s'il est conforme à une hypothèse de l'un des buts connus liés à chaque défaut présent. Le calcul a été fait à partir de la simulation de chaque régleur : la différence est positive pour dix régleurs et négative pour trois, elle est marginalement significative (χ^2 corrigé = 2,77, $p < .10$). Donc dans les cas où le choix n'est pas compatible avec les deux défauts, il y a empiriquement une tendance à privilégier dans l'ensemble le défaut d'injection, sans que l'on puisse conclure : il est à noter que les défauts de maintien ne sont pas moins bien connus que les défauts d'injection.

La connaissance du dispositif réfère à la distinction entre deux points de vue, celui de la conception du fonctionnement du dispositif et celui de la connaissance des dysfonctionnements ou incidents. Le type de connaissance utilisé peut être identifié directement à partir des stratégies. Le pilotage par la courbe et le pilotage par la courbe et les défauts manifestent la prise en compte des paramètres qui signalent l'état du dispositif : la première de ces deux stratégies donne la priorité au rétablissement à l'état normal de tous les paramètres sur lesquels une information est accessible avant d'utiliser les connaissances sur les défauts, la seconde traite en

parallèle la connaissance de l'état du dispositif et la connaissance des défauts. La stratégie de pilotage par les défauts repose exclusivement sur la connaissance des causes de défaut.

Les heuristiques sont un aspect du traitement sur lequel nous avons une information directe à partir des résultats de la simulation : elles sont bien détectées par notre analyse qui montre qu'elles jouent un rôle important. Elles forment deux catégories distinctes. Les premières reposent sur le souvenir des actions réalisées précédemment : elles excluent des choix déjà faits dans un passé récent et contribuent avec d'autres contraintes à déterminer les choix possibles. Les secondes suffisent à déterminer le choix en se basant exclusivement sur le feedback. La règle consistant faire la modification inverse si la modification tentée est invalide exprime l'inférence immédiate que si la modification demandée est impossible, c'est que le paramètre a déjà atteint la valeur extrême et qu'il faut donc le ramener à la valeur moyenne. Elle exprime donc une connaissance de bon sens, les autres ont trait au contrôle de la situation. Elles consistent à annuler la modification qui vient d'être faite l'une quand le défaut est aggravé, l'autre non seulement quand il est aggravé mais également quand il est inchangé. Une stratégie optimale peut provoquer dans un nombre non négligeable de cas une aggravation momentanée du défaut. La présence de l'une ou l'autre de ces deux règles chez tous les régleurs et pour la plupart des essais sauf pour trois d'entre eux laisse penser que les régleurs n'acceptent pas une aggravation de la situation : en ce cas ils préfèrent revenir à l'état précédent. Cela montre que c'est là un aspect essentiel du contrôle de la situation: il est très difficile de s'éloigner du but immédiat qui est de corriger les défauts et de faire prévaloir une hypothèse qui va à l'encontre de ce but. C'est sans doute la raison pour laquelle la résolution est rarement directe.

Le dernier aspect sur lequel nos résultats apportent une information est la complexité du traitement. Dans les situations de pur test d'hypothèses, on oppose la stratégie de traitement d'une hypothèse à la fois, consistant à utiliser l'information obtenue pour tester une seule hypothèse, à la stratégie de traitement complet qui utilise celle-ci pour tester toutes les hypothèses encore plausibles. Dans notre situation la complexité du traitement peut se mesurer par le fait qu'un seul défaut ou que l'ensemble des défauts présents est pris en compte dans le choix de la modification de réglage. Le traitement un défaut à la fois consiste à prendre au hasard un des défauts présents, et à choisir entre les causes connues de ce défaut, c'est-à-dire entre les options autorisées par le but correspondant. Le traitement complet se définit ainsi : dans les cas où il y a au moins une option commune autorisée par tous les buts connus correspondant aux défauts présents, l'option choisie doit être cette option car elle doit être compatible avec les causes connues de chacun des défauts; dans les cas où il n'y a pas d'option commune autorisée

pour tous les buts en question, mais où il y a un but connu correspondant à un couple de défauts présents, l'option choisie doit être une cause connue du but correspondant au couple de défauts.

Le traitement un défaut à la fois peut conduire dans certains cas au même choix que le traitement complet, car le choix au hasard d'une des options peut conduire au choix de l'option commune. On a donc calculé cette probabilité pour chaque régleur, car elle dépend des hypothèses connues : la fréquence observée des cas où l'option choisie est l'option commune doit être comparée à cette valeur et à la valeur 1,00, qui est la valeur attendue du choix de l'option correspondant au traitement complet si le traitement complet est appliqué. Pour faciliter la comparaison, on divise l'intervalle entre la probabilité du choix de l'option commune dans le cas du traitement une hypothèse à la fois et 1,00 en quatre intervalles égaux : la classe 1 indique le traitement d'un défaut à la fois, la classe 4 un traitement complet. La fréquence observée correspond à la classe 2 pour huit régleurs, à la classe 3 pour trois régleurs et à la classe 4 pour deux régleurs. La majorité des régleurs se trouvent donc dans les classes intermédiaires, ce qui veut dire que leur traitement est moins partiel que le traitement un défaut à la fois sans être un traitement complet. Deux régleurs seulement prennent en compte tous les défauts.

V- Conclusion

La première conclusion est qu'une situation complexe peut être modélisée à un niveau de finesse suffisant pour mettre en évidence les stratégies de traitement suivies par chaque opérateur ainsi que les compétences et connaissances mises en jeu dans la résolution. Le fait qu'il y a peu d'incompatibilités signifie que les contraintes identifiées sont bien respectées et montre d'une part que les protocoles ont une bonne cohérence et d'autre part que l'on peut rendre compte du comportement des différents régleurs à partir d'un nombre de règles relativement restreint. Les stratégies sont bien identifiées pour presque tous les régleurs, elles sont plus prédictives des actions dans le cas de la prise d'information que dans celui des réglages car les paramètres exprimant les différences individuelles ont moins d'incidence. En effet dans la prise d'information intervient seulement le fait que pour décider de demander la courbe ou non le régleur l'estime lisible ou non. Dans le choix du réglage intervient le fait qu'elle ait été demandée ou non et si c'est le cas le fait de la lire correctement ou non. Les différences liées à la lecture de la courbe font donc que l'information disponible varie beaucoup d'un régleur à l'autre et comme l'information de la courbe permet d'exclure d'emblée un certain nombre d'hypothèses, il y a d'autant plus d'indétermination dans le choix du réglage que la courbe est moins bien lue. La simulation fait bien apparaître que la principale cause des différences de comportement entre les régleurs est la capacité de lecture de la courbe et non la connaissance des causes des défauts.

La seconde conclusion est qu'outre la mise en évidence des mécanismes responsables des différences individuelles, que seule la modélisation permet, les résultats de la simulation complétés par des analyses complémentaires apportent des informations sur les questions d'ordre général abordées dans la littérature, notamment sur les processus difficiles à identifier soit parce qu'ils requièrent l'analyse de beaucoup de données comme les heuristiques soit parce qu'ils sont peu explicites comme certaines stratégies de traitement. Comme nous l'avons montré, on peut à partir des résultats de la simulation, procéder à des analyses qui répondent à des questions d'ordre général et qui sont plus fines que les analyses que l'on peut faire à partir des seuls protocoles. Ainsi les analyses que nous avons présentées dans la discussion concernant le traitement des hypothèses font intervenir à la fois des données du protocole et des données de la simulation car elles prennent en compte à chaque essai les hypothèses de chaque régleur tel qu'il est simulé, lesquelles dépendent à la fois de ses connaissances sur les causes du défaut mais aussi de ses capacités de lecture de la courbe qui si elles sont bonnes permettent d'exclure certaines hypothèses incompatibles avec l'information fournie par la courbe. Ce sont des analyses qui tiennent compte des paramètres individuels négligés par les analyses statistiques standard.

La dernière remarque concerne l'intérêt de la modélisation des processus individuels de résolution. Il faut dire que concernant l'objectif majeur de la psychologie ergonomique qui est d'apporter des informations utiles à l'amélioration des situations de travail et à l'efficacité des opérateurs, cette approche est d'utilité restreinte, car pour cet objectif il n'est pas nécessaire de connaître le détail des différences individuelles : il suffit d'appréhender les caractéristiques générales représentatives de la population des opérateurs. Même si cette approche peut apporter des informations complémentaires, on peut se demander si elle justifie l'investissement nécessaire. La réponse est sans doute différente si l'objectif est la formation (Pastré, 2005), car dans ce cas il est important de disposer d'un diagnostic individuel des processus qui ont conduit à la réussite (qui n'est pas nécessairement due à une bonne stratégie) ou à l'erreur pour pouvoir adapter une aide appropriée afin d'éliminer la cause de l'erreur. Nos résultats suggèrent que dans la situation de réglage des presses il faudrait s'attacher d'abord à la lecture de la courbe en général et aux difficultés spécifiques de lecture de certains paramètres pour certains régleurs détectables par la simulation, avant d'aborder l'apprentissage des stratégies. Le diagnostic fourni par la simulation est essentiel pour le pilotage d'une formation assistée par ordinateur, mais il serait également utile pour le formateur en séance de *debriefing*.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, J.R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ : Erlbaum
- Anzaï Y. & Simon H.A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86, 124-140.
- Atwood M.E. & Polson P.G. (1976). A process model for water jugs problems. *Cognitive Psychology*, 8, 191-216.
- Chaachoua H., Nicaud J.F. & Bittar M. (2005). Détermination automatique de théorèmes-en-acte des élèves en algèbre. Le cas des équations et inéquations de degré 1. In P. Tchounikine, M. Joab et L. Trouche (Eds.)_ *Actes de la Conférence EIAH 2005*, Montpellier 25-27 mai.
- Hoc J.M. (1990) . Les activités de diagnostic. In J.F. Richard, C. Bonnet & R. Ghiglione (Eds.) *Le traitement de l'Information symbolique, Traité de Psychologie cognitive 2*. Paris : Dunod
- Hoc JM & Amalberti R (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62, 97-130
- Hoc J.M. & Carlier X. (2000). A method to describe human diagnostic strategies in the relation to the design of human-machine cooperation. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4, 297-309.
- Karat J. (1982). A model of problem solving with incomplete constraint knowledge. *Cognitive Psychology*, 14, 538-559.
- Khider H., Sander E., Labat, J-M, & Richard J-F. (2005). DIANE, a diagnosis system for arithmetical problem solving. In C.-K. Looi, G. McCalla, B. Bredeweg, & J. Breuker (Eds). *Supporting Learning through Intelligent and Socially Informed Technology. Frontiers in Artificial Intelligence and applications*. The Netherlands, IOS Press pp. 628-635
- Klahr D. & Robinson M. (1981). Formal assessment of problem-solving and planning processes in preschool children. *Cognitive Science*, 13, 113-148.
- Nguyen-Xuan A.,Cauzinille E.,Frey L.,Mathieu J. & Rousseau J. (983). *Fonctionnement cognitif et classification multiple chez l'enfant*. Monographies Françaises de Psychologie, 60.
- Nguyen-Xuan A. & Hoc J.M. (1987). Learning to use a command device. *Cahiers de Psychologie Cognitive*,7, 5-31
- Pastré, P. (1994) *Evolution des compétences et formation : Le cas de régleurs de presses à injecter*, Rapport de fin d'étude d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur et par l'AGEFOS-PME Bourgogne
- Pastré P. (2004). Le rôle des concepts pragmatiques dans la gestion de situations problèmes : le cas des régleurs en plasturgie. In P. Pastré & Samurçay R. (Eds.) *Recherches en didactique Professionnelle*. Toulouse, Octares.

- Pastré P., (2005) Apprendre par la résolution de problèmes : le rôle de la simulation. In P. Pastré (Ed.) *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse, Octares
- Richard, J.F. (1993). Le rôle de la modélisation dans la simulation des comportements et l'analyse des données expérimentales. N M. Denis & G. Sabbah (Eds) *Modèles pour la science cognitive*. Grenoble :PUG. pp. 25-36.
- Richard J.F. (1999). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Richard J.F. & Poitrenaud, S. (1988). Problématique de l'analyse des protocoles individuels. In J.P. Caverni, C. Bastien, P. Mendelsohn & G. Tiberghienp. Grenoble : PUG pp. 405-425.
- Richard J. F., Poitrenaud S., & Tijus C. (1993). Problem solving restructuration : Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.
- Richard J.F. & Zamani M. (2003). A Problem-Solving Model as a Tool for Analyzing Adaptive Behavior. In R.J. Sternberg, J. Lautrey & T. Lubart (Eds) *Models of intelligence : International Perspective*. Washington, DC: American Psychological Association. pp.213-226.
- Sander E., Fattersack M., Labat J.M., Parage P., Pastré P. & Richard J.F. (2006). Modélisation des stratégies de récupération de défauts en plasturgie chez des régleurs de presses à injecter. Rapport PI-TCAN Programme interdisciplinaire CNRS
- Schmalhofer F. & Polson P.G. (1986). A production system for human problem solving. *Psychological Research*, 48, 113-122
- Wenger, E. (1987). *Artificial Intelligence and Tutoring systems*. Los Altos : Morgan Kaufman Pub. Inc.

Résumé

L'article présente une adaptation du modèle des contraintes à une situation professionnelle de correction de défauts en plasturgie. On présente le modèle de résolution par compromis entre contraintes et on décrit la démarche d'élaboration du modèle et de diagnostic des contraintes à retenir pour la simulation d'un protocole. On analyse les stratégies des régleurs en utilisant les résultats de la simulation et on discute les résultats en référence aux caractéristiques des stratégies de diagnostic décrites dans la littérature.

Mots-clés : résolution de problème, simulation, contraintes, analyse de protocoles individuels.

ANNEXE : Liste des contraintes de prise d'information

A gauche est indiquée la stratégie à laquelle elles appartiennent: C signifie courbe, D défauts, CD courbe-défauts. Au milieu sont les conditions :la condition qui est commune à toutes les contraintes de la case est en gros caractères. A droite est la décision.

Stratégie	Conditions	Action
C CD C-CD CD C-CD-D	Il n'y a pas encore eu de réglage la courbe est absente et lisible la courbe est absente et lisible mais si le défaut a une cause unique la courbe est présente la courbe est présente mais s'il y a incompatibilité entre la courbe et le défaut la courbe n'est pas lisible	demander la courbe demander la courbe faire un réglage faire un réglage faire un réglage redemander courbe ou défaut faire un réglage
C-CD CD C-CD C CD CD CD	il y a eu un réglage sur paramètre de la courbe <u>lisible</u> ni les défauts ni la courbe n'ont été demandés ni les défauts ni la courbe n'ont été demandés la courbe est normale, le défaut n'a pas été demandé la courbe n'est pas normale la courbe n'est pas normale il y a encore des défauts il n'y a plus de défaut	demander la courbe demander la courbe ou le défaut demander le défaut faire un réglage réglage ou demande de défaut réglage ou demande de courbe demander la courbe
C-CD-D C-D CD	il y a eu un réglage sur paramètre courbe non <u>lisible</u> ni les défauts ni la courbe n'ont été demandés il y a encore des défauts il y a encore un défaut, le défaut est inchangé ou aggravé	demander le défaut faire un réglage réglage ou demande de courbe
C-CD-D C-D CD	il y a eu un réglage sur paramètre hors courbe il n'y a pas eu de demande de défaut il y a encore des défauts il y a encore un défaut, le défaut est inchangé ou aggravé	demander le défaut faire un réglage réglage ou demande de courbe
C CD CD	il y a eu un réglage et au moins une demande de courbe et une demande de défaut si la courbe n'est pas normale ou s'il y a des défauts soit la courbe est normale et il y a encore des défauts, soit la courbe n'est pas normale et il n'y a plus de défaut si la courbe est anormale et il y a encore des défauts et les paramètres défectueux de la courbe ne correspondent pas aux causes connues des défauts	faire un réglage réglage ou demande de courbe ou de défaut selon ce qui a été fait avant soit faire un réglage ou soit demande de courbe ou de défaut selon ce qui a été fait en dernier

*Les contraintes fixant les conditions d'arrêt du problème.***Conditions d'arrêt du problème, de la moins exigeante à la plus exigeante:**

on arrête s'il n'y a plus de défaut sauf pour le serrage pour lequel un écart léger en plus ou en moins est toléré
on arrête s'il n'y a plus du tout de défaut mais on ne tient pas compte de la courbe
on arrête s'il n'y a plus du tout de défaut et si les paramètres de la courbe sont à leur valeur normale

Les heuristiques liées à la mémorisation

- ne pas faire le même réglage qu'à l'essai précédent
- ne pas répéter un réglage qui a déjà été fait sur le problème sauf si c'est pour changer de 2 valeurs le paramètre ou si c'est après être revenu en arrière), pour mettre le paramètre à une valeur différente
- ne pas agir deux fois dans les 2 essais précédents du problème sur le même paramètre sauf si l'action est interdite ou si c'est pour revenir en arrière ou après retour arrière pour mettre le paramètre à une valeur différente
- même chose pour les 4 essais précédents du problème sur le même paramètre

Les heuristiques liées au feedback

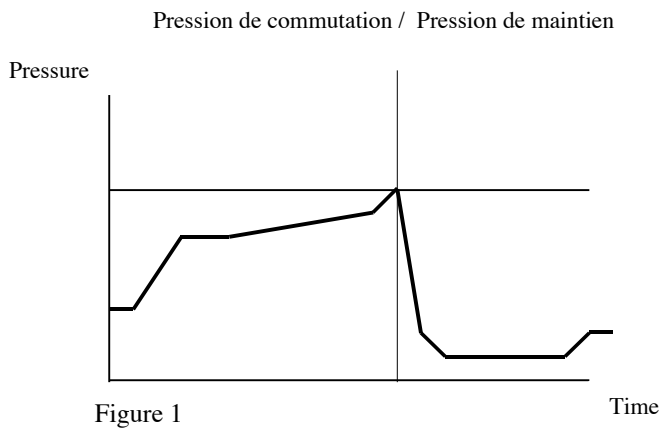
- si le réglage est interdit faire le réglage inverse immédiatement ou le coup d'après
- si après un réglage valide et après demande de défaut le défaut est aggravé, alors faire le réglage inverse
- si après un réglage valide et après demande de défaut, le défaut est aggravé ou inchangé, faire le réglage inverse

	Ti+	Ti-	Pc+	Pc-	Cp+	Cp-	P2+	P2-	T2+	T2-	T3+	T3-	T°+	T°-	Bu
Heuristique :ne pas modifier le même paramètre qu'aux deux essais précédents	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Heuristique :si le réglage n'est pas valide faire le réglage inverse	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
But :corriger la courbe en priorité	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
But :si on a un serrage en excès : diminuer la pression de maintien	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Contrainte globale : impasse	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Relâchement de la dernière contrainte	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 1

	Contraintes de gestion de la tâche						Contraintes de choix des réglages		
	Dans l'état de réglage			Dans l'état de prise d'information			La décision a été prise de faire un réglage		
	Nombre d'essais	Incompatibilités	% de cas 1 action	Nombre d'essais	Incompatibilités	% de cas 1 action	Nombre d'essais	Incompatibilités	% de cas 1/2 actions
And	66	.12	.83	246	.06	.62	141	.10	.22
Ber*	143	.07	.93	117	.03	.69	55	.04	.29
Cha	55	.05	.92	179	.01	.78	75	.01	.65
Chr	75	.04	.93	223	.04	.58	146	.02	.29
Dan	91	.07	.93	142	.05	.71	136	.01	.27
Eti *	103	.02	.77	111	.03	.52	51	.0	.39
Fra	52	.04	.93	192	.03	.63	76	.03	.47
Geo	76	.08	.82	189	.04	.53	90	.04	.24
Hen*	90	.07	.91	142	.04	.55	67	.01	.40
Jac	68	.03	.97	176	.02	.63	71	.01	.68
Jea *	71	.15	.85	64	.03	.72	33	.0	.55
Luc*	33	.0	1.0	68	.01	.94	34	.03	.38
Mic	34	.05	.92	154	.05	.60	66	.0	.36

Tableau 2



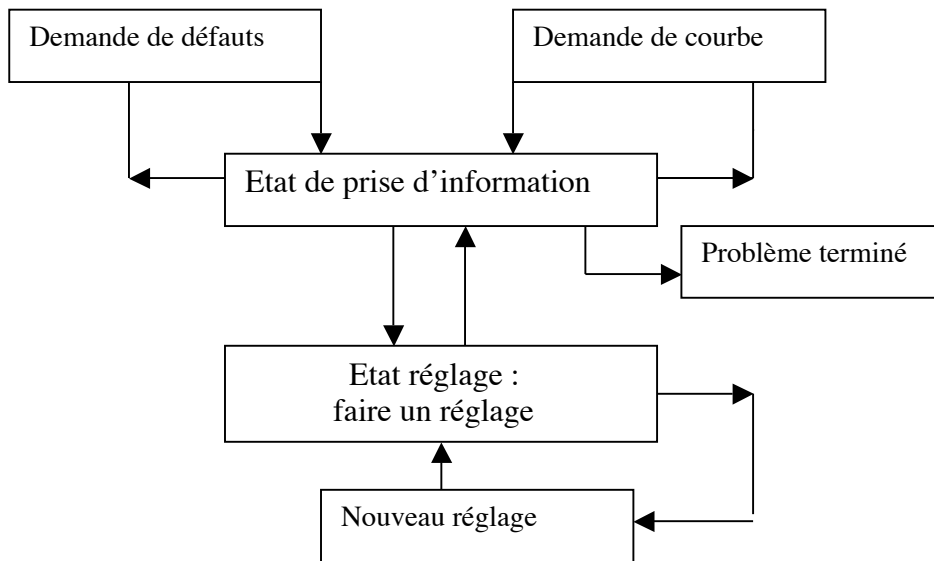


Figure 2