

Quatrième École Thématique du CNRS sur les EIAH

**Simulation, réalités virtuelles et augmentées pour les apprentissages professionnels**

Du dimanche 2 au vendredi 7 juillet 2006 à La Grande Motte

## **Atelier 4**

*Articulation d'analyses pluri-disciplinaires*

Jean-Marc Labat, Pierre Pastré, Jean-François Richard

## **Canevas de l'atelier Plastur**

L'atelier sera composé de 3 parties :

### **1/ Présentation du contexte et de la tâche (30 minutes) : P. Pastré**

- Le contexte de la recherche : correction de défauts produits par des régleurs sur presses à injecter à commande numérique
- La tâche : structure conceptuelle de la situation : règles d'action d'un modèle simplifié et règles d'action d'un modèle incluant les compensations
- Présentation du simulateur
- Présentation de 4 protocoles de Rdp réalisés par des régleurs : 2 pbs simples, 2 pbs complexes, résolus par deux régleurs aux stratégies différentes.

### **2/ Travail en sous-groupe de 4 (45 minutes)**

Chaque groupe dispose des protocoles des 4 problèmes. Il doit chercher à caractériser les stratégies mises en œuvre dans chacun des protocoles

Une personne ressource (P. Pastré) sera à la disposition des groupes pour répondre aux questions qui lui seront posées.

### **3/ La question de la modélisation de l'activité (45 minutes) : J-F Richard, J-M Labat**

Présentation des deux approches cherchant à modéliser l'activité de résolution de problèmes professionnels :

- l'approche par les contraintes
- l'approche par les modèles à base de connaissances.

**Rem :** E. Sander enverra un document (mix de 2 rapports) permettant de bien comprendre la situation, l'analyse de la tâche et des éléments sur l'analyse de l'activité



## ***1.1. Rappel du projet***

### ***1.1.1. Objectifs généraux***

Le projet porte sur la modélisation des stratégies de résolution de problèmes en situation naturelle, en l'occurrence la récupération de défauts en plasturgie chez des régleurs de presses à injecter. Une caractéristique importante, relevée par (P. Pastré 1994a) est le fait que cette résolution s'appuie sur une prise en compte du contexte, en particulier la capacité d'interprétation des valeurs des paramètres par les régleurs. Plusieurs protocoles ont déjà été recueillis dans une variété de tâches à partir d'un simulateur de résolution de problèmes à usage d'apprentissage. Les simulations mettent en scène une classe de problèmes qu'une analyse fine du travail a permis d'identifier comme faisant partie du cœur du métier. Les tâches consistent dans la récupération de défauts à partir de situations définies par un ensemble de paramètres. Dans ce domaine, pour lequel une expertise approfondie et un ensemble de données existent du fait de l'une des composantes du projet (Pastré, 2004), on vise à construire un modèle de simulation du raisonnement des régleurs fondé sur un ensemble de conceptions (contexte interne et externe, espace sémantique, niveaux de conceptualisation) et de méthodes (modèle à base de règle, modèle des contraintes) portées par les différents partenaires du projet qu'il s'agira d'articuler et de développer au travers de cette situation. Ce projet a donc un double objectif : (i) sur un plan appliqué, il s'agit de modéliser les stratégies de récupération des défauts en plasturgie chez les régleurs et de tester ces modèles avec des régleurs virtuels et (ii) sur un plan fondamental, il s'agit de confronter des modélisations issues d'analyses reposant presque exclusivement sur des données recueillies dans des contextes artificiels avec des situations réelles en contexte écologique. La question des niveaux de conceptualisation sera revisitée, et ce travail pourrait déboucher avec nos partenaires du monde industriel sur la définition de formations s'appuyant sur la prise en compte des niveaux de conceptualisation.

## 1.2. Description de la situation

### La situation de travail

La mise en place de situations simulées de travail nécessite d'explicitier la tâche et les compétences concernées (Béguin, Pastré, 2002, Joab et al., 2000). Les deux paragraphes suivants présentent ainsi le fonctionnement d'une presse à injecter puis la tâche du régleur en situation naturelle.

#### 1.2.1. Le fonctionnement d'une presse à injecter

La technique d'injection plastique s'apparente au travail de fonderie. Elle consiste à chauffer une quantité précise de matière plastique jusqu'à son point de fusion. Rendue à l'état pâteux, elle est alors injectée, sous forte pression, à l'aide d'une vis (cf. Figure 1) dans les empreintes d'un moule. Cette première étape d'injection est la phase dynamique du processus de fabrication et dure environ 3 secondes. Suit une phase statique – environ 2 secondes – durant laquelle une pression de maintien est appliquée au moule pour compenser le retrait de la matière qui se rétracte en se solidifiant. Si nécessaire, une seconde injection peut avoir lieu durant la phase statique. La pression est ensuite relâchée pour laisser la pièce moulée se refroidir. Enfin, le moule s'ouvre et la pièce est éjectée.

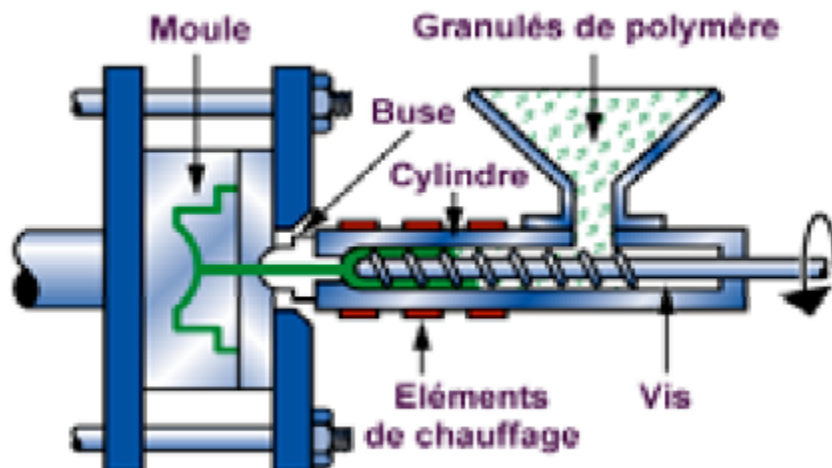


Figure 1 : presse à injecter

Remarques :

Le passage de la phase dynamique d'injection à la phase statique de maintien est appelé le point de commutation. Il se produit lorsque la pression d'injection atteint une certaine valeur, dite « pression de commutation ». Pour les presses à commandes numériques un capteur de pression gère automatiquement la commutation.

Le changement d'état – de pâteux à vitreux – de la matière pendant la phase statique de maintien, entraîne une diminution du volume (retrait) et un changement de la structure interne. Ce passage est une étape délicate. La qualité finale des produits en dépendra fortement. Il est associé à ce changement d'état la notion de bourrage – équilibre entre la pression exercée par la machine et celle exercée par la matière –. Un bourrage insuffisant nécessitera une seconde injection durant la phase de maintien alors qu'un bourrage excessif entraînera un recul de la vis.

### *1.2.2. La machine et le travail des régleurs*

La tâche choisie pour servir à l'analyse de résolutions de problèmes en situation professionnelle est une tâche de réglage de presses à injecter à commande numérique. Les caractéristiques de la tâche sont les suivantes :

- Une presse à injecter est une machine qui transforme des granulés plastiques en objets moulés ayant une forme définie. La technique de l'injection plastique s'apparente au travail de fonderie : on chauffe une quantité précise de matière plastique jusqu'à son point de fusion. On l'injecte alors sous forte pression dans les empreintes d'un moule, où elle est refroidie jusqu'à solidification. Il y a deux phases dans l'injection, une phase dynamique (l'injection proprement dite) et une phase statique (le maintien pendant la solidification). Pendant la phase de maintien, une pression de maintien est appliquée sur la matière injectée pour compenser le retrait de matière consécutif à la solidification. Le passage de la phase statique à la phase dynamique s'appelle le point de commutation.
- Les opérateurs qui ont été observés sont des régleurs : leur tâche consiste principalement à intervenir en cas d'apparition de défauts sur les produits pour les corriger. Ces défauts sont assez nombreux et assez fréquents. Ils peuvent apparaître en phase dynamique comme en phase statique. Ceux produits en phase statique sont les plus nombreux et les plus difficiles à réduire. Les défauts peuvent avoir plusieurs origines : défauts de matière plastique, défauts de réglage de la machine, usure des pièces de celle-ci. Notre analyse a porté sur la correction de défauts dus au réglage et partiellement sur la correction de défauts dus à l'usure de pièces, dans la mesure où cette usure avait un impact sur les réglages.
- Les machines qui ont servi de support à l'analyse de la tâche sont des presses à injecter à commande numérique de l'avant-dernière génération. En effet, la plasturgie étant une industrie relativement jeune, l'évolution technique y est assez rapide. Les machines de dernière génération ont abouti à une relative déqualification des compétences des régleurs : des procédures strictes de réglage leur sont imposées et ils ne peuvent manifester leur intelligence de la tâche que dans des cas de plus en plus réduits. Les machines d'avant-dernière génération laissent beaucoup plus d'initiative aux régleurs : ils se trouvent beaucoup plus souvent en situation de résolution de problèmes. C'est pourquoi nous avons choisi ce type de situations.
- Une presse à injecter n'est pas un système technique dynamique, au sens donné par Hoc : il n'y a pas (ou très peu) de dynamique propre au système. Les transformations résultent de l'action des opérateurs. On peut donc traiter les corrections de défauts comme un cas particulier de résolution de problèmes par transformation d'états : un état initial (la présence d'un défaut) entraîne un nombre  $N$  ( $N$  pouvant être égal à 1) d'opérations de la part du régleur, jusqu'à obtention d'un état final (absence de défaut). Mais dans le cours du traitement le régleur peut exécuter des opérations qui font apparaître de nouveaux défauts. Deux cas sont possibles : ou bien l'apparition d'un nouveau défaut n'est qu'un trait de surface et n'empêche pas l'opération exécutée de rapprocher de l'état final. Ou bien l'opération exécutée éloigne de l'état final et transforme la nature du problème, en rendant ce dernier plus difficile à traiter.

### *1.2.3. Défauts, paramètres d'action et indicateurs*

#### *1.2.3..1 Identification des défauts de réglage*

Les principaux défauts de réglage peuvent être présentés par couples :

1. Le couple manque-bavure : il se manifeste par un défaut ou un excès de matière sur le produit fabriqué. Les savoirs de métier aboutissent à la constitution d'une échelle qualitative de 7 valeurs (gros manque, manque moyen, manque léger, produit normal, bavure légère, bavure moyenne, grosse bavure). Chaque élément de cette échelle est bien identifié par la communauté professionnelle. Par exemple, une bavure légère est un très petit débordement de matière qui apparaît toujours au même endroit (au plan de joint) ; une grosse bavure se traduit par le fait que tous les produits fabriqués forment un seul bloc : il est alors nécessaire de démonter le moule avant de reprendre la fabrication.
2. Le couple striage – brûlure : ces deux défauts, assez différents<sup>1</sup>, forment un couple dans la mesure où ils sont occasionnés par une cause unique, agissant soit par excès, soit par défaut : la vitesse d'injection. Il n'y a qu'un état pour les brûlures ; il y en a deux pour le striage : striage moyen ou striage léger. D'où une échelle qualitative à 4 valeurs.
3. Le couple retassure – cassure. Les retassures se manifestent par une légère dépression à la surface du produit fabriqué. La cassure représente un risque, qui ne se réalise généralement qu'une fois le produit démoulé. On peut faire les mêmes remarques que pour le couple précédent : d'une part, il y a 4 valeurs pour cette échelle qualitative : retassure moyenne, retassure légère, produit normal, risque de cassure. D'autre part, ce qui en fait un couple est la présence d'une cause unique : la valeur de la pression de maintien (et du temps de maintien), en excès ou en défaut ; avec toutefois une différence : pour le risque de cassure, il y a bien une seule cause directe (le maintien), mais il y a aussi des causes indirectes, qui accentuent ou diminuent le risque de cassure. Il n'y a pas de causes indirectes pour les retassures, sauf la température de la matière.
4. Le couple serrage fort – serrage faible. Ce défaut est spécifique au produit qui a servi de support à l'analyse : la fabrication d'une boîte. Mais il exprime un processus physique beaucoup plus général : le retrait du plastique au moment de la solidification. Ce retrait est fonction du volume du produit : dans une boîte, le fond étant plus épais que le couvercle, tout problème de retrait va s'exprimer par un défaut de serrage. On a coutume de distinguer 5 valeurs pour cette échelle, selon que le défaut est acceptable ou inacceptable (un couvercle qui ne tient pas, ou qu'on n'arrive pas à ôter).

#### *1.2.3..2 Les paramètres de réglage*

Pour corriger les défauts sur les produits, un régleur peut agir sur un certain nombre de paramètres. Voici les principaux :

- La pression de commutation, **PC**, permet d'agir sur la quantité de matière injectée. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions (Figure 1)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Le striage se manifeste par de légères ondulations sur la surface du produit. Les brûlures sur la surface du produit ne sont pas dues à une température trop haute, mais à une vitesse d'injection trop rapide, qui chasse trop vite l'air contenu dans les empreintes au moment de l'injection. D'où noircissement du produit fabriqué.

<sup>2</sup> La pression de commutation est la variable centrale utilisée pour le réglage initial d'une MOCN. Dans les machines automatiques à commande manuelle (première génération des presses à injecter), le dosage de la matière se faisait par des cames de position : la matière dosée étant contenue dans un cylindre, on jouait sur la longueur du cylindre. Ce réglage était très instable. Avec les MOCN on remplace le dosage par cames par un dosage par capteurs de pression : on définit a priori une valeur de pression (à l'intérieur du moule), par exemple 110 bars : quand la pression à l'intérieur du moule atteint cette valeur, le programme coupe la pression d'injection et arrête

- Le temps d'injection **TID** est le temps pendant lequel s'exerce la pression d'injection. Composé avec PC, il permet de calculer une vitesse moyenne d'injection<sup>3</sup>. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions.
- La contre-pression **CP** est une pression exercée sur la matière plastique pendant l'étape du dosage<sup>4</sup>. Elle n'est pas toujours employée, mais, dans le cas que nous avons retenu, elle est utilisée pour homogénéiser le mélange en augmentant sa densité apparente. Cet effet, bien mis en lumière par l'expert que nous avons interrogé, est peu connu des régleurs.
- La température du moule détermine la température de la matière **T°mat** pendant et après injection<sup>5</sup>.
- La pression de maintien **P2** permet de compenser le retrait de la matière pendant la phase de maintien. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions. Elle est réglée en pourcentage de la pression d'injection.
- Le temps de maintien **T2** représente le temps pendant lequel s'exerce la pression de maintien. Il peut neutraliser l'effet de cette dernière (quand il est proche de 0), ou l'accentuer. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions.
- Le temps de refroidissement **T3** correspond à l'intervalle entre la fin du temps de maintien et le moment de l'éjection. Il fait partie de la phase statique du cycle de la machine. C'est le moment où les produits se solidifient<sup>6</sup>. Sa valeur peut être identifiée, mais elle n'apparaît pas sur la courbe des pressions.

Parmi les actions qu'un régleur peut effectuer, certaines ne relèvent pas de paramètres de réglage. On peut en signaler deux :

- Remplacer le clapet anti-retour : c'est un objet placé à l'extrémité de la buse d'injection, qui empêche un retour en arrière de la matière quand la pression de maintien est plus faible que la pression exercée par la matière dans le moule. Ce clapet s'use et, quand il devient défectueux, laisse de la matière revenir en arrière.
- Changer la buse d'injection<sup>7</sup>, quand celle-ci est « matée », ce qui modifie le réglage d'ensemble. On verra que cette action a été retenue pour la construction du simulateur,

---

ainsi l'injection de matière : on commute alors en phase de maintien. Pour que le réglage soit correct, il faut que la valeur donnée à PC corresponde au remplissage effectif des empreintes du moule.

<sup>3</sup> En réalité, il y a plusieurs vitesses d'injection, qui se succèdent pendant cette phase : d'une façon habituelle, on commence par injecter vite et on finit lentement. Il peut y avoir jusqu'à 10 vitesses d'injection différentes pour une même phase (cf courbe figure 1). Mais pour les défauts de réglage, il suffit de considérer TID (et PC) pour agir efficacement.

<sup>4</sup> Le cycle de fabrication est composé de 4 étapes : dosage, injection, maintien, refroidissement et éjection. Les deux premières étapes forment la phase dynamique : la partie mobile de la machine (la vis) est en mouvement. Les deux dernières forment la phase statique : pas de mouvement de la partie mobile de la machine. Le dosage est l'étape complémentaire de l'injection : la vis revient en arrière, entraînant une arrivée de matière. La contre-pression consiste à ralentir le mouvement de dosage en exerçant une pression sur le mouvement de la vis. Le but est double : augmenter l'élévation de la température de la matière ; augmenter la densité apparente du mélange. La valeur de la contre-pression est exprimée en pourcentage de la pression d'injection (qui est en moyenne de 110 bars, pour le cas qui nous occupe) : elle peut varier entre 10% et 60%.

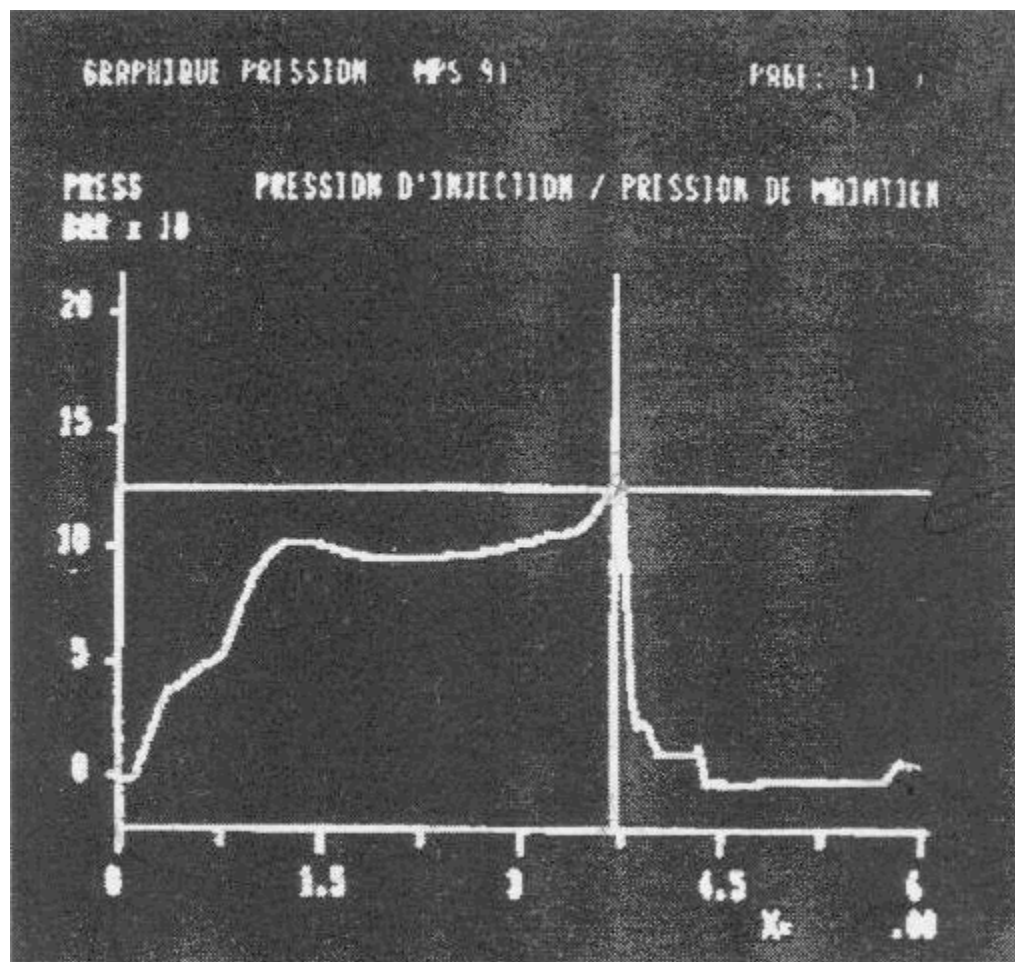
<sup>5</sup> La température de la matière est mesurée au niveau de chaque empreinte. On verra que, dans la construction du simulateur, et pour des raisons pratiques, cette évaluation de la température a été beaucoup simplifiée. Il faut remarquer que, à la différence de l'évolution de la pression, qui est représentée sous forme de courbe affichée en permanence par les opérateurs, la température et son évolution ne sont pas présentées sous la forme d'une courbe, mais sous la forme d'un tableau (beaucoup moins lisible). La courbe des pressions est un instrument de conduite. Il est douteux que le tableau des températures le soit.

<sup>6</sup> Pendant le temps de refroidissement, la matière présente au point d'injection s'est solidifiée : il n'y a plus de possibilité de compenser le retrait. Et il n'y a plus de pression exercée sur la matière.

<sup>7</sup> Toute la matière injectée passe par un orifice en bout de buse, le point d'injection, dont le diamètre, pour notre exemple, est de 0.5mm. Il arrive qu'au moment de l'injection la buse vienne heurter le moule. Le résultat est que la buse se « mate », ce qui entraîne une diminution du diamètre du point d'injection, donc une baisse de débit d'injection. En conséquence le réglage d'ensemble est modifié.



dans la mesure où elle représente un cas typique où l'usure d'une pièce modifie le réglage d'ensemble. La particularité de cette action est qu'elle n'a pas de symétrie : en changeant la buse, on agit unilatéralement sur le diamètre du point d'injection. On augmente le diamètre, mais on ne peut pas diminuer un diamètre qu'on jugerait trop grand. Dans la réalité, les régleurs ne changent pas toujours une buse matée : il leur arrive de passer un fil de fer dans le trou de la buse pour augmenter légèrement le diamètre.



**Figure 1 : la courbe des pressions**

### ***1.2.3..3 Les prises d'information***

1/ Les défauts visuels : c'est la principale prise d'information de la part des régleurs : tous les régleurs commencent par identifier et catégoriser les défauts à corriger. Par exemple : un manque léger, une retassure moyenne, une brûlure. Le risque de cassure n'est identifié qu'après coup. Chaque défaut met sur la voie d'une ou plusieurs causes possibles : un répertoire de connaissances liées au domaine est associé à la liste des défauts. Certains régleurs, rares, n'utilisent comme observables que les défauts visuels. Certaines situations comportent deux ou plusieurs défauts : dans ce cas, il peut y avoir soit une seule cause, soit plusieurs.

2/ La lecture de la courbe des pressions : la majorité des régleurs complètent la lecture des observables par la consultation de la courbe des pressions. Celle-ci est affichée en permanence sur l'écran du système de pilotage de la machine : c'est un instrument de conduite, à la différence d'autres programmes (tableaux des températures par exemple) qui sont peu utilisés. La courbe des pressions, pour qui sait la lire dans son intégralité, fournit la valeur de 5 variables : la pression de commutation, le temps d'injection dynamique (d'où on peut inférer la vitesse

d'injection), la pression de maintien, le temps de maintien, la contre-pression. La lecture de la courbe des pressions permet notamment de savoir si la machine ne comporte pas de **situations compensées**. On appelle situation compensée une situation où le mauvais réglage d'une variable est compensé par le mauvais réglage d'une autre variable, en sorte que le produit final peut être sans défaut, alors que la machine ne fonctionne pas normalement (et donc s'use plus vite). L'exemple le plus simple est représenté par une pression de maintien trop forte assortie d'un temps de maintien trop court. Dans ce cas, P2+, T2- est équivalent à P2=, T2=. Un régleur qui ne se sert pas de la courbe des pressions n'a pas les moyens de diagnostiquer des situations compensées. Normalement quand les 5 variables représentées sur la courbe des pressions ont une valeur normale, il ne doit plus y avoir de défauts sur les produits.

3/ Mais ce n'est pas toujours le cas. Dans des cas rares la courbe des pressions est correcte alors qu'il subsiste des défauts produits. Le régleur peut alors consulter le tableau des températures pour chercher la cause des défauts de ce côté. S'il ne trouve rien, c'est que c'est un problème d'usure des pièces de la machine. Dans ce cas, le régleur ne dispose pratiquement d'aucun observable et doit raisonner par inférences.

#### **1.2.4. Le répertoire des connaissances du domaine**

L'articulation entre prises d'informations et actions sur les paramètres de réglage se fait par la mobilisation du répertoire des connaissances spécifiques au domaine. Le tableau 1 liste ces connaissances. Il est présenté dans le sens paramètre de réglage – variable de résultat (défaut). La représentation inverse (comment remonter d'un défaut à sa cause) est beaucoup plus complexe et sera présentée dans la partie suivante. Il a fallu distinguer trois types de relations de causalité entre un paramètre de réglage et son ou ses effet(s) :

- un effet direct
- un effet indirect : la variable accentue ou diminue (quelquefois inhibe) l'action directe de la variable qui est la cause principale
- pas d'effet.

**Tableau 1 : Relations de causalité entre paramètres d'action et défauts**

##### **1/ TID (temps d'injection dynamique)**

Manque – bavure	TID lent => Manque faible TID rapide => Bavure	Effet indirect Idem
Striage	TID lent => striage TID rapide => sans objet	<b>Effet direct</b> <i>Pas d'effet</i>
Brûlure	TID rapide => Brûlure TID lent : rien	<b>Effet direct</b> <i>Pas d'effet</i>
Retassure (dépression)		<i>Pas d'effet</i>
Cassure	TID lent = diminue cas TID rapide = augmente cas	Effet indirect Idem
Serrage		<i>Pas d'effet</i>

##### **2/ PC (pression de commutation)**

Manque – bavure	PC- => manque PC+ => bavure	<b>Effet direct</b> <b>Idem</b>
Striage	PC+ diminue striage PC- : négligeable	Effet indirect Idem
Brûlure		<i>Pas d'effet</i>

*CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Programme interdisciplinaire TCAN*

Retassure		<i>Pas d'effet</i>
Cassure	PC- = pas de cassure PC+ = pas d'effet	Effet indirect (inhibiteur) <i>Pas d'effet</i>
Serrage		<i>Pas d'effet</i>

**3/ CP (contre-pression)**

Manque – bavure	CP+ => bavure CP- => manque	Effet indirect Idem
Striage	CP+ diminue striage CP- : pas d'effet	Effet indirect <i>Pas d'effet</i>
Brûlure		<i>Pas d'effet</i>
Retassure		<i>Pas d'effet</i>
Cassure	CP- : pas de cassure CP+ (associé à P2 ou T2 => cassure	Effet indirect (inhibiteur) Effet indirect
Serrage	CP+ accentue serrage CP- diminue serrage	Effet indirect idem

**4/ P2 (pression de maintien)**

Manque – bavure	P2+ (si PC-) : corrige M ou augmente B P2- : pas d'effet	Effet indirect <i>Pas d'effet</i>
Striage		<i>Pas d'effet</i>
Brûlure		<i>Pas d'effet</i>
Retassure	P2- => retassure P2+ => pas de retassure	<b>Effet direct</b>
Cassure	P2+ => cassure P2- => pas de cassure	<b>Effet direct</b>
Serrage	P2- => Serrage – P2+ => serrage +	<b>Effet direct</b> <b>idem</b>

**5/ T2 (temps de maintien)**

**Accentue ou diminue l'effet P2**

- P2- et T2+ = P2 égal et T2 égal
- P2 égal et T2+ => P2+
- P2 égal et T2- => P2-

**6/ T° (température matière)**

Manque – bavure	T° - => manque T° + => bavure	Effet indirect (accentuant) Idem
Striage	T° - => striage T° + diminue striage dû à TID	Effet indirect Idem
Brûlure		<i>Pas d'effet</i>
Retassure	T° - : pas d'effet T° + : augmente retassure.	<i>Pas d'effet</i> Effet indirect
Cassure	T° - : diminue cas T° + : pas d'effet	Effet indirect <i>Pas d'effet</i>

Serrage	T°+ : diminue serrage T°- : augmente serrage faiblement	Effet indirect idem
---------	--	------------------------

### 7/ **T3 (temps de refroidissement)**

Serrage	T3- diminue serrage T3+ augmente serrage	<b>Effet direct</b> <b>idem</b>
---------	---	------------------------------------

### 8/ **Buse (trou de buse maté)**

Manque – bavure	Buse matée => manque (équivalent à PC-)	<b>Effet direct</b>
Striage		<i>Effet négligeable</i>
Brûlure	Buse matée : diminue la brûlure	Effet indirect
Retassure		<i>Pas d'effet</i>
Cassure		<i>Pas d'effet</i>
Serrage	Buse matée : diminue serrage	Effet indirect

### 1.3. *Résolution de problèmes sur simulateur et base de connaissances du domaine*

Dans une première recherche (Pastré, 2004), à la suite de l'analyse de la tâche, on a procédé à la construction d'un simulateur représentant le fonctionnement schématique d'une presse à injecter à commande numérique et on a fait passer sur ce simulateur 13 régleurs en situation de résolution de problèmes (correction de défauts sur les produits). Une centaine de protocoles ont été recueillis. Le simulateur n'étant plus disponible<sup>8</sup>, il reste les résultats des résolutions de problèmes effectués par les régleurs. Ces résultats permettent d'identifier avec précision la base de connaissances mobilisée par les régleurs.

Commençons par deux remarques :

1/ Ce premier simulateur a été conçu à partir d'une analyse du travail (tâche et activité) effectuée dans l'atelier servant de référence. Toutefois, on a procédé à un certain nombre de transformations portant sur la situation, dont certaines étaient nécessaires pour des raisons pratiques de faisabilité. Il convient d'en signaler trois :

- Le problème de la température matière a été traité de façon très schématique et probablement trop sommaire. Notamment aucun observable direct ne permet de lire la température matière. Le sujet est obligé de l'inférer. En un sens, la tâche sur simulateur a été rendue plus difficile que la tâche professionnelle de référence<sup>9</sup>.
- La présentation de la courbe des pressions a été l'objet d'un travail précis et fidèle. Toutefois, il n'a pas été possible de présenter la valeur de la contre-pression autrement que par un pavé numérique. Ceci a accentué le fait que beaucoup de régleurs avaient tendance à ne pas regarder la valeur de la contre-pression, dans la mesure où ils ne connaissaient pas son effet sur la densité apparente de la matière.
- Les situations mettant en scène des pièces usées ont été réduites, pour des raisons de faisabilité, à un seul exemple, celui de la buse matée.

<sup>8</sup> Il a été reconstitué par J. de Frileuze dans le cadre du projet Plastur et amélioré sur un grand nombre de points. Il est présenté plus bas.

<sup>9</sup> Ce qui peut avoir de l'intérêt du point de vue didactique.

2/ Tous les régleurs connaissent l'effet des paramètres d'action sur les défauts (Tableau 1). Mais cette connaissance n'est pas suffisante quand ils sont face à un défaut et qu'ils doivent en trouver la cause. Car la plupart du temps, plusieurs causes sont possibles pour un même défaut. Il faut ajouter que pour un défaut, à côté de la cause principale, il peut y avoir une ou plusieurs causes indirectes, qui accentuent, diminuent ou inhibent l'effet de la cause principale. Enfin il arrive qu'une même cause engendre plusieurs défauts. Si on ajoute les situations compensées, on voit que le tableau des relations reliant un ou plusieurs défauts à sa (leur) ou ses (leurs) cause(s) est nettement plus complexe que le Tableau 1.

D'autre part, les connaissances et compétences des régleurs ne sont pas équivalentes : certains ont des niveaux de conceptualisation beaucoup plus élevés que d'autres. C'est pourquoi, pour établir l'ensemble des connaissances permettant de relier les défauts à leurs causes, seuls 9 régleurs sur 13 ont été retenus : ceux considérés comme les plus compétents tant par la communauté professionnelle, qu'au vu des résultats obtenus dans les exercices de résolution de problèmes. Cela ne veut pas dire que ces 9 régleurs sont de compétence équivalente. Mais cela veut dire qu'on a pu éliminer ainsi des comportements aberrants ou difficilement compréhensibles, pour ne retenir que des connaissances qui sont partagées par une majorité de régleurs.

Pour simplifier la présentation des règles d'action à base de connaissances du domaine, nous allons procéder en deux temps : dans un premier temps, nous allons faire abstraction de toutes les causes indirectes d'un défaut, qui accentuent, diminuent ou inhibent le défaut. Nous ferons également abstraction de toutes les situations compensées. Dans un deuxième temps, nous réintroduirons causes indirectes et situations de compensation.

### **1.3.1. Les règles élémentaires**

#### **a) Association d'un défaut et d'une cause directe**

Les 4 couples de défauts ne sont pas susceptibles du même traitement. On rencontre 2 cas :

1. Un défaut – une cause directe unique. C'est le cas du couple striage – brûlure (cause directe unique : TID (le temps d'injection dynamique) : un TID trop rapide génère une brûlure. Un TID trop lent génère du striage. C'est également le cas du couple retassure – cassure (cause directe unique : P2 – T2 : le temps de maintien peut être traité comme une variable affectant P2). Quand P2-T2 est trop rapide, on a un risque de cassure. Quand il est trop lent, on a une retassure.
2. Un défaut – une cause directe parmi plusieurs possibles. Il s'agit des couples manque – bavure et serrage fort – serrage faible. De plus, les deux cas ne sont pas tout à fait équivalents :
  - a. Le couple serrage fort – serrage faible. Trois causes directes sont possibles, mais, au niveau des règles élémentaires, on admet qu'une seule est présente. La situation n'est pas tout à fait symétrique entre serrage fort et serrage faible. Voici le détail. Les causes sont présentées par ordre de probabilité d'apparition.
    - i. Serrage faible
      1. T3 trop court
      2. CP trop faible
      3. Buse matée
    - ii. Serrage fort
      1. T3 trop long
      2. T2 trop long
      3. CP trop forte
  - b. Le couple manques – bavures. Pour le manque comme pour la bavure, il y a 3 causes directes possibles, présentées dans l'ordre de probabilité de leur apparition. Mais en outre, pour la bavure, il faut distinguer entre B1 (bavure légère) et B2 (bavure moyenne).
    - i. Manque
      1. PC trop basse

2. Buse matée
3. Température trop faible
- ii. Bavure B1
  1. Température trop forte
  2. CP trop forte
- iii. Bavure B2 : PC trop haute (PC apparaît ainsi comme la cause directe principale des manques – bavures. Pour la bavure, elle engendre d’emblée une bavure moyenne).

**b) Cas particuliers : une cause unique engendrant deux défauts**

On a recensé 6 cas où deux défauts sont imputables à une cause directe unique. Voici le détail :

1. M1, St1 (manque léger et striage léger). Cause : Température trop faible.
2. B1, S+1 (bavure légère et serrage légèrement fort). Cause : Contre-pression trop forte<sup>10</sup>.
3. B1, S-1 (bavure légère et serrage légèrement faible). Dans ce cas, il y a une cause directe parmi deux possibles :
  - a. Température trop haute
  - b. PC trop haute
4. B1, Brul (bavure légère et brûlure). Cause : TID trop court.
5. Cas, S+1 (risque de cassure et serrage légèrement fort). Cause : P2 trop forte.

Le tableau 2 récapitule ces règles élémentaires.

**Tableau 2 : règles élémentaires**

	<b>Défaut</b>	<b>Cause directe</b>
<b>1/ Un défaut, une cause directe unique</b>	Striage Brûlure	TID – TID+
	Retassure Cassure	P2, T2- P2, T2+
<b>2/ Un défaut, une cause directe, Plusieurs possibles</b>	Serrage –	1/ T3- 2/ CP- 3/ Buse
	Serrage +	1/ T3+ 2/ T2+ 3/ CP+
	Manque	1/ PC- 2/ Buse 3/ T°-
	Bavure B1	1/ T°+ 2/ CP+
	Bavure B2	PC+
<b>3/ 2 défauts, Une cause directe unique</b>	M1, St1	T°-
	B1, S+1	CP+
	B1, Brul	TID+
	Cas, S+1	P2+
<b>4/ 2 défauts, Une cause directe,</b>	B1, S-1	1/ T°+

<sup>10</sup> Noter qu’on ne trouvera jamais un manque associé à un serrage trop faible. La raison est simple : quand il y a (déjà) un manque, on ne mesure pas le serrage.

### **1.3.2. Les combinatoires**

Les combinatoires entre causes et défauts sont très nombreuses et très diverses. Pour plus de simplicité on retiendra 3 cas :

- le cas le plus simple : 2 causes distinctes génèrent 2 défauts distincts
- 2 causes se combinent pour donner un ou plusieurs défauts, avec une ou plusieurs cause(s) directe(s) et une ou plusieurs cause(s) indirecte(s).
- Enfin on mettra à part les situations de compensation : deux causes d'effet opposé se neutralisent.

#### **a) Deux causes, deux effets distincts**

Parmi les très nombreux cas envisageables, on ne mentionne que ceux effectivement rencontrés :

1. Couple manque – bavure
  - a. CP+, P2- => B2, Ret2 (CP est cause de B2, P2 de la retassure)
  - b. PC+, T2+ => B2, S+1
  - c. TID+, T3- => B1, Brul, S-1 (TID est cause de B1 et Brul, T3 cause de S-1)
  - d. T°+, TID+ => B1, S-1, Brul (TID et T° concourent à B1, TID est cause de Brul, T° de S-1)
2. Couple serrage fort – faible
  - a. TID-, T°+ => Str1, S-1
  - b. TID-, Buse => Str1, S-1
3. Autres couples
  - a. P2-, TID- => Ret2, Str1
  - b. TID+, P2+ => Brul, Cas.

#### **b) Combinaison de causes et de défauts**

C'est la partie la plus compliquée des règles d'action. On peut identifier 7 configurations différentes :

1. L'addition de deux causes concourant à un même effet<sup>11</sup>.
2. Atténuation : une cause, indirecte, vient diminuer l'effet de la cause directe principale.
3. Addition avec atténuation : deux causes ajoutent leurs effets, alors qu'une 3<sup>e</sup> cause vient atténuer l'effet d'ensemble.
4. Addition avec augmentation : deux causes ajoutent leurs effets ; une 3<sup>e</sup> cause, indirecte, vient accentuer (légèrement) l'effet d'ensemble.
5. Présence de 2 causes ayant des effets distincts, avec atténuation d'un des effets.
6. Présence de 2 causes ayant des effets distincts, avec accentuation d'un des effets.
7. Présence de 2 causes, inhibition d'un des effets

Le tableau 3 présente les occurrences de ces 7 configurations. On a classé ces occurrences par rapport aux 4 couples de défauts. Quand il y a 2 effets (défauts) pour une configuration, on a choisi la colonne correspondant au défaut correspondant à la combinaison des deux causes.

---

<sup>11</sup> Dans certains cas, il y a production de deux effets conjoints. La particularité de cette combinaison, par rapport au cas où il y a deux causes et deux effets distincts, c'est que s'il n'y avait qu'une seule cause, il y aurait quand même production de deux effets conjoints.

Dans certains cas, trois causes sont présentes : ce n'est pas différent des configurations à deux causes.

**Tableau 3 : Combinaisons de causes et d'effets**

	<b>Striage-Brûlure</b>	<b>Retassure-Cassure</b>	<b>Serrage + et -</b>	<b>Manque-Bavure</b>
<b>1/ Addition</b>			P2+, T3+ => S+2 P2+, CP+ => S+2 CP+, T2+, T3+ => S+2 T3-, Buse => S-2 P2-, T3- => S-2, Ret2	PC-, Buse => M2 T°+, P2+ => B2
<b>2/ Atténuation</b>			CP+, moins T°- => S+1 T3-, moins T2- => S-1 T3-, moins T°- => S-1 T3-, moins P2+ => S-1 CP-, moins T°+ => S-1	PC-, moins T°+ => M1 PC-, moins T2+ => M1 PC-, moins CP+ => M1 Buse, moins T°+ => M1 T°-, moins TID+ => M1 CP+, moins T2- => B1 PC+, moins T°- => B1
<b>3/ Addition et atténuation</b>			CP+, T3+, moins T°- => S+2 CP-, T°+, Buse, moins P2+ => S-2	PC-, Buse, moins P2+ => M1 PC-, Buse, moins CP+ => M1 T°-, CP-, moins PC+ => M1
<b>4/ Addition et augmentation</b>	TID-, T°- => Str2, M1			
<b>5/ 2 causes, atténuation d'un des effets</b>			T3-, P2+ => S-1 (au lieu de S-2), Cas	PC+, Buse => B1 (au lieu de B2), S-1 PC+, TID- => B1 (au lieu de B2), Str1
<b>6/ 2 causes, accentuation d'un des effets</b>			CP+, P2+, TID+ => S+2, Brul CP+, T2+, TID- => S+2, B1, Str1	T°+, P2+ => B2, Cas
<b>7/ Inhibition d'un effet</b>			P2+, PC- => S+1 (PC inhibe Cas) TID+, Buse => S-1 (Buse inhibe Brul) P2-, T2+ => S-1, Ret2 (T2 neutralisé) P2-, T°-, T3+ => S-1, Ret 1 (T3 neutralisé)	



On constate que les combinaisons de variables portent pratiquement toutes sur les couples manque – bavure et serrage faible et fort.

### **c) Les situations de compensation**

Il s'agit de situations où deux ou plusieurs variables se neutralisent l'une l'autre. Voici les occurrences rencontrées. D'une manière générale, les situations de compensation sont très nombreuses. Elles peuvent se trouver seules ou combinées avec les situations vues plus haut.

#### 1/ Compensations avec 2 variables

- P2+, T2-
- CP+, T°-
- CP-, P2+
- CP-, T2+
- CP-, T°+
- TID+, Buse

#### 2/ Compensations avec plus de 2 variables

- CP+, P2+, T°-
- CP+, P2+, T°-, TID+
- PC+, P2+, T2-, T°-
- CP+, T°-, P2+, T2-

Les combinaisons de causes et de défauts sont donc très nombreuses et complexes. Il est irréaliste de penser qu'un régleur peut mémoriser toutes les combinaisons. De ce fait, la gestion de la tâche va revêtir une grande importance. Deux grands cas de figures apparaissent :

1. Le régleur se contente de prendre des informations sur les défauts des produits tout en utilisant les règles d'action élémentaires portant sur les 4 couples de défauts. Le but est d'obtenir un produit sans défaut quel que soit l'état des variables. En conséquence toutes les situations de combinaison complexe (compensation, atténuation, etc.) ne seront pas identifiées. L'état final sera très souvent un état sans défaut sur les produits mais avec une ou plusieurs compensations.
2. Le régleur va utiliser simultanément les observables tirés des défauts et les observables tirés de la courbe des pressions : il peut ainsi corriger toutes les situations où une absence de défaut s'accompagne du déséquilibre de certaines variables (situations de compensation). Il faut néanmoins ajouter deux remarques : dans les protocoles recueillis, aucun régleur n'arrive à éliminer totalement les solutions compensées, même si les performances sont très différentes<sup>12</sup> entre eux. Il existe quelques cas où la courbe des pressions ne fait apparaître aucune anomalie et où pourtant subsiste un défaut sur les produits. Ce sont les cas où sont impliquées la buse et la température. Dans ce cas, le régleur ne peut pas se contenter de combiner les informations fournies par les défauts et les informations fournies par la courbe des pressions. Il doit procéder par inférences.

## **1.4. La modélisation par contraintes**

Nous rappellerons rapidement ce qu'est le modèle des contraintes développé d'abord pour les situations de résolution de problèmes de changement d'état et ensuite nous expliquerons quelles modifications ont été apportées pour qu'il puisse s'appliquer à des situations de travail telles que le réglage des presses à injecter. Nous ferons ensuite une synthèse des premiers résultats

---

<sup>12</sup> Pour 9 problèmes traités par tous les régleurs, le plus performant laisse 1 solution compensée ; le moins performant en laisse 8 sur 9.

### **1.4.1. Le modèle des contraintes pour la résolution de problèmes de changement d'état**

Le modèle des contraintes a été développé pour les situations de résolution de problèmes classiques en psychologie expérimentale comme les tours de Hanoi et les diverses variantes isomorphes (Richard et al. 1993), les problèmes de franchissement de rivière (dont le problème des missionnaires et cannibales est le prototype) (Richard, 1994, 2005) et a été étendu à des situations de test comme le test de Passalong (Richard, 1999 ; Richard et Zamani, 2003). Ce modèle comporte deux composantes : un mécanisme de décision et un mécanisme de diagnostic des contraintes à partir d'un protocole qui est basé sur le mécanisme de décision.

#### **1.4.1.1 Le mécanisme de décision**

Le modèle formalise l'idée qu'en résolution de problème la prise de décision respecte un ensemble de contraintes qui proviennent non seulement du traitement des buts de la tâche, mais également de l'interprétation de la situation et aussi d'heuristiques générales d'action qui ne sont pas propres à une tâche particulière. Des conflits peuvent se produire entre les contraintes de sorte qu'aucune action ne satisfait l'ensemble des contraintes : en ce cas la décision est un compromis entre les contraintes, qui fait que l'une des contraintes est provisoirement suspendue.

##### **a) Définition d'une contrainte**

Chaque contrainte est une restriction sur les actions possibles. Formellement c'est un vecteur défini sur l'ensemble des actions possibles dont les valeurs peuvent être 0 (l'action est autorisée par la contrainte, 1 (elle est interdite) ou 0,5 (elle est indifférente par rapport à la contrainte). Une contrainte est donc une règle déterministe et de ce point de vue le modèle des contraintes fait partie de la classe des modèles de règles

L'originalité du modèle des contraintes tient à la façon dont se combinent les règles d'action. Chaque contrainte ajoute ses restrictions à celles des autres contraintes présentes dans la liste. Formellement, une contrainte étant un vecteur, une liste de contraintes est une somme de vecteurs, définie de la façon suivante : une action est autorisée par l'ensemble des contraintes si elle est autorisée par chacune des contraintes ; une action est interdite si elle est interdite par une ou plusieurs des contraintes de la liste. Une action est indifférente si elle est indifférente pour une ou plusieurs contraintes et autorisée pour les autres. Autrement dit dans la combinaison des valeurs, le 1 domine les autres valeurs et le 0,5 domine le 0.

Cette règle de composition fait qu'une liste de contraintes est une contrainte, ce qui est une propriété très importante, nous le verrons plus loin, pour identifier les contraintes à partir d'un protocole. Nous appelons donc contrainte globale la contrainte résultant d'une liste de contraintes.

##### **b) Le mécanisme de décision à partir d'une liste de contraintes**

Les actions sur lesquelles portent le vecteur contrainte sont, sauf exception, exclusives. Le choix se fait en comparant les valeurs du vecteur : s'il y a une ou plusieurs actions pour lesquelles la valeur est 0, cette action (ou l'une de ces actions indifféremment) est choisie. S'il n'y a pas d'action de valeur 0 mais s'il y a une action de valeur 0,5, celle-ci est choisie : une action indifférente est préférable à une action interdite. Reste le cas où toutes les actions sont interdites, ce qui dans le modèle définit les impasses. Pour sortir de l'impasse, on relâche provisoirement une contrainte, celle qui est la plus basse dans la hiérarchie. Cela suppose que les contraintes soient ordonnées, il faut qu'il y ait au moins un ordre partiel entre les contraintes : une contrainte globale est en fait une liste ordonnée. Nous verrons plus loin comment cet ordre est induit du protocole. Si une fois la dernière contrainte relâchée, une action devient autorisée ou indifférente, alors cette action est choisie. Sinon, on relâche une nouvelle contrainte, la moins prioritaire. Au terme de l'essai, les contraintes relâchées sont réintégrées : le relâchement n'est fait que pour trouver une action de compromis dans le contexte de l'essai.

Le mécanisme de décision est entièrement déterministe, mais le relâchement de contraintes en cas d'impasse fait que certaines contraintes souffrent d'exceptions. Toutefois, ces exceptions ne sont pas probabilistes, elles suivent des règles, celles définies dans le mécanisme de décision.

#### **1.4.1.2 Les types de contraintes**

L'idée de base du modèle est que se combinent dans la décision des contraintes qui ne sont pas de même nature et qui ne répondent donc pas à la même logique. Dans toutes les recherches sur la résolution de problèmes, trois types de contraintes se sont révélées nécessaires. Les premières sont celles qui concernent le traitement des buts et révèlent donc les connaissances sur la tâche, ce sont des contraintes de nature proprement stratégique. Un second type de contraintes concerne l'interprétation de la situation, notamment les actions permises (par exemple, on n'a pas le droit de sauter un emplacement dans les tours de Hanoi et ses isomorphes). Le troisième type, extrêmement important est constitué par des heuristiques générales d'action qu'on retrouve dans toutes les situations : ne pas répéter une action qui a échoué dans le même état, si on se retrouve dans le même état, ne pas refaire la même action que la dernière fois dans cet état, etc.

#### ***1.4.2. Le diagnostic des contraintes à partir d'un protocole***

Etant donné le caractère déterministe des contraintes et le mode additif de composition des contraintes, on peut construire un système d'analyse automatique d'un protocole qui recherche le jeu de contraintes (et ses éventuelles modifications) qui permet de reproduire au plus près le protocole. Cela suppose qu'on ait identifié au préalable à partir d'une analyse manuelle de protocoles l'ensemble des contraintes potentielles à partir desquelles on sélectionne le sous-ensemble pertinent pour le protocole à analyser.

Cette sélection se fait en plusieurs étapes : on considère d'abord les contraintes individuellement et on procède ensuite par regroupements successifs pour construire la liste définitive de contraintes. L'évaluation de la pertinence d'une contrainte ou d'un groupe de contraintes par rapport à un protocole est faite sur la base d'un indice de pertinence, qui est une sorte de corrélation entre la contrainte et le protocole. Cet indice est calculé à chaque essai en fonction de la compatibilité de la contrainte avec le protocole. Il est défini de la façon suivante : soit **a** le rapport entre le nombre de réponses autorisées par la contrainte et le nombre de réponses possibles : si la réponse du protocole est autorisée par la contrainte, la valeur de pertinence est **1-a** , si elle est interdite elle vaut **-a** , si elle est indifférente la valeur de pertinence est **0**. Ainsi une contrainte a une valeur de pertinence d'autant plus élevée qu'elle est plus restrictive et qu'elle est compatible avec le protocole, et une valeur d'autant plus faible qu'elle est moins restrictive et qu'elle est incompatible avec le protocole.

Cet indice s'applique aussi bien à une contrainte individuelle qu'à une liste de contraintes, puisqu'une liste de contraintes est une contrainte. C'est cette propriété qui permet de construire la liste des contraintes de façon progressive. On calcule d'abord la pertinence de chaque contrainte potentielle à chaque essai et à partir des valeurs de pertinence obtenues on détermine celles qui sont pertinentes sur l'ensemble des essais, celles qui le sont pour une partie et celles qui sont à éliminer d'emblée car leur valeur moyenne de pertinence est nulle.

On construit alors une première liste de contraintes avec celles qui sont pertinentes sur l'ensemble des essais et on ajoute une à une à cette liste chacune des contraintes partiellement pertinentes : on calcule la pertinence ajoutée par chaque contrainte par rapport à la liste de base et, en fonction du résultat, on retient la contrainte pour l'ensemble des essais ou seulement pour une partie (les essais retenus doivent nécessairement se suivre) ou on l'élimine. On définit alors des épisodes : un épisode est une suite d'essais dans lesquels la liste des contraintes est inchangée

L'étape suivante consiste à rechercher le jeu minimum de contraintes nécessaires pour rendre compte du protocole. Certaines contraintes sont en effet partiellement redondantes et leur corrélation avec le protocole peut être expliquée par d'autres. On élimine successivement chaque contrainte et on compare la pertinence avec celle obtenue pour la liste complète : on élimine les contraintes dont l'élimination n'entraîne pas de diminution de la pertinence.

La dernière étape consiste à établir l'ordre des contraintes à l'intérieur de chaque épisode. On prend comme critère le nombre de fois où la contrainte est incompatible avec le protocole : en effet la contrainte relâchée en cas d'impasse doit être une contrainte qui n'est pas en accord avec le protocole et la contrainte relâchée le plus souvent doit avoir nécessairement d'après le modèle plus d'incompatibilités qu'une contrainte relâchée moins souvent.

Le modèle des contraintes ressemble aux modèles de règles définis à partir de systèmes de production. Son intérêt tient à ce que du fait du mode de combinaison des règles un système de

diagnostic est associé au modèle, ce qui permet une analyse automatique des protocoles . Cela permet une analyse individuelle des protocoles et donc une interprétation des difficultés des participants et une évaluation immédiate de la qualité de la simulation.

### ***1.4.3. L'adaptation du modèle des contraintes à la tâche de réglage des presses à injecter***

Trois types de modifications ont été nécessaires. La première prend en compte la complexité de la tâche qui consiste non seulement à faire des actions de réglage, mais aussi à demander de l'information soit sur le défaut soit sur la courbe. La seconde modification tient au fait que les buts d'action ne sont pas définis directement à partir des états de la situation mais sont liés à des hypothèses concernant des paramètres défectueux susceptibles d'expliquer l'état de la situation . La troisième concerne le fait que l'interprétation de ces paramètres sur lesquels une information est présente sur la courbe conditionne à la fois la gestion de la situation et la nature des hypothèses à partir desquelles se fait l'intervention. Ces modifications concernent l'architecture du modèle qui est nettement plus complexe, mais ne touche pas aux objets et mécanismes de base, à savoir la notion de contrainte, le mécanisme de décision et les algorithmes de diagnostic des contraintes, qui ont été repris intégralement.

On a défini une architecture générale et un premier jeu de contraintes permettant de simuler un protocole choisi dans la moyenne des performances, qui a servi à tester l'implantation de l'architecture et des contraintes . Le protocole est scindé en deux parties : l'une groupe les transitions entre états correspondant aux décisions de réglage, l'autre groupe les actions de modification des réglages. Ces deux protocoles sont analysés à l'aide de deux jeux de contraintes.

#### ***1.4.3..1 La gestion de la tâche***

Dans les problèmes de transformation d'état, la seule décision qui intervient est l'action qui produit un changement d'état : le seul changement d'état qui puisse intervenir est celui qui est engendré par l'action. Dans la situation de réglage des presses en plasturgie, on a en fait trois types de décision et deux types d'état . On peut être soit dans l'état action de réglage soit dans l'état prise d'information et contrôle . Dans le premier état on peut décider soit de faire un nouveau réglage soit de passer à l'état de prise d'information; dans le second on peut décider soit du type d'information à demander (sur le défaut ou sur la courbe) soit de passer à l'action soit encore d'arrêter d'agir, ce qui définit la fin du problème.

Les décisions concernent donc les six transitions suivantes :

- prise d'information-demande de courbe-prise d'information (PI-C-PI)
- prise d'information-demande de défaut-prise d'information (PI-D-PI)
- prise d'information-action de réglage (PI-RE)
- prise d'information- arrêt ou état final (PI-EF)
- action de réglage – nouvelle action de réglage (RE-RE)
- action de réglage prise d'information (RE-PI)

Les décisions concernant ces transitions ont été définies comme des contraintes. On a en fait deux types de contraintes, celles qui agissent dans l'état prise d'information et celles qui interviennent dans l'état réglage.

Voici quelques exemples de contraintes agissant dans l'état PI (prise d'information) :

- si on est en cours de problème, on vient de passer de RE en PI et la dernière action porte sur un paramètre de la courbe reconnu (c'est-à-dire lu correctement sur la courbe) et s'il n'y a pas d'information sur la courbe depuis cette dernière action, alors demander la courbe.
- s'il y a eu une action valide portant sur un paramètre de la courbe reconnu, la courbe a été demandée, la courbe est normale, le défaut n'a pas été demandé, demander le défaut.
- s'il y a eu juste avant une action sur un paramètres hors courbe, il n'y a pas eu demande de défaut, alors demander le défaut.
- si tous les paramètres de la courbe reconnus sont normaux et s'il n'y a plus de défaut, alors ne plus rien faire, c'est-à-dire passer en Etat Final.

- s'il n'y a pas encore eu d'action, la courbe a été demandée, passer à l'action.
- s'il y a eu une action valide, la courbe a été demandée, la courbe n'est pas normale, alors passer à l'action.
- s'il y a eu juste avant une action sur paramètres hors courbe, il y a eu demande de défaut, il y a encore des défauts, alors faire une action.

Voici maintenant les contraintes agissant dans l'état RE( réglage) :

- après une première réponse valide passer en PI.
- si une réponse est non valide, faire une nouvelle action.
- si on a donné une première réponse qui est un retour en arrière par rapport à l'essai précédent, faire une nouvelle action.
- si on a fait une première action valide, on peut ou non faire une seconde action, pourvu que les deux actions portent sur des réglages qui concernent des paramètres de la courbe qui sont connus.

On considère le protocole des transitions entre états et on applique les différentes étapes décrites précédemment pour rechercher le jeu de contraintes le plus adapté pour rendre compte du protocole : calcul de la pertinence individuelle des contraintes, sélection des contraintes les plus stables pour obtenir un premier jeu de contraintes, ajout progressif des autres contraintes pour compléter la liste, puis détermination de la liste minimale par élimination successive de chaque contrainte.

### ***1.4.3..2 Les actions de réglage***

Un premier ensemble de contraintes portant sur les actions de réglage est constitué par des heuristiques d'action dont voici quelques exemples :

- si l'action est interdite, agir immédiatement sur le même paramètre en sens inverse.
- ne pas répéter immédiatement une même action sur un paramètre sauf si l'action est interdite ou si c'est pour revenir en arrière à la suite d'une aggravation ou si c'est après être revenu en arrière afin de mettre le paramètre à une valeur différente.
- si l'action sur un paramètre hors courbe ou sur un paramètre de la courbe non reconnu fait apparaître un nouveau défaut, annuler l'action en revenant à l'état précédent.
- si l'action sur un paramètre de la courbe fait apparaître une courbe plus anormale, annuler l'action en revenant à l'état précédent.

La seconde catégorie de contraintes concerne les actions sur les réglages correspondant à des buts provenant d'hypothèses sur l'origine des défauts. Les hypothèses sur l'origine des défauts sont représentées par une matrice à plusieurs lignes ou par un vecteur, selon qu'il y a ou non des hypothèses prioritaires dans le but. Les six premières colonnes du vecteur indiquent le défaut ou la conjonction de défauts sur le(s)quel(s) portent les hypothèses d'action exprimées dans les colonnes suivantes. Une hypothèse d'action est exprimée par la valeur 0 dans la colonne correspondant au type d'action à effectuer sur le paramètre (augmentation ou diminution) et la valeur 1 correspondant à l'action inverse. Si une hypothèse est de nature disjonctive (agir sur tel paramètre ou tel autre), le vecteur comporte plusieurs valeurs 0. La priorité des actions à effectuer est indiquée par l'ordre des lignes. La première ligne de la matrice indique l'action (ou les actions) prioritaire, la seconde ligne celle à faire une fois l'action de la première ligne effectuée et ainsi de suite.

Dans le cas des hypothèses avec plusieurs niveaux de priorité on définit un groupe de buts ne différant entre eux que par la priorité des actions à effectuer. Ainsi pour un but à deux niveaux de priorité, on aura un but exprimé avec une matrice à deux lignes indiquant l'action prioritaire et l'action non prioritaire et un but exprimé sous la forme d'un vecteur portant sur les mêmes actions mais sans ordre de priorité entre elles. Ceci permet de déterminer si un opérateur donné a ce but avec priorité ou sans priorité. Comme pour les buts dans les problèmes de changement d'état, une fois la pertinence des contraintes individuelles calculée, on commence par sélectionner la contrainte à l'intérieur du groupe qui a la plus forte pertinence par rapport au protocole.

On a défini un certain nombre d'hypothèses (une vingtaine) portant sur les causes de défaut à partir de l'étude réalisée par P. Pastré et une première analyse du protocole que nous avons choisi pour implanter la simulation. Pour exprimer les règles d'action issues de ces hypothèses

on opère en deux temps : d'abord on sélectionne les buts pertinents pour le défaut à traiter et ensuite on définit l'action ou les actions autorisées par le but.

Pour la sélection des buts, on choisit parmi les buts qui partagent une partie des défauts avec l'état réel mais qui ne comportent pas plus de défauts que l'état réel, ceux qui sont le plus proches du patron des défauts. Ensuite on sélectionne parmi ces buts ceux qui sont pertinents pour l'essai en cours : on regarde si le but contient des actions correspondant aux paramètres de la courbe reconnus qui indiquent des réglages défectueux ou s'il contient des actions correspondant à des paramètres hors courbe ou des paramètres de la courbe non reconnus. Si c'est le cas, on retient le but, sinon on l'élimine.

Pour déterminer les actions compatibles avec le but, on commence par la première ligne du but :

- s'il y a une action permise correspondant à un des paramètres de la courbe reconnus et corrigeant un paramètre défectueux, cette action est compatible avec le but.
- s'il n'y a pas d'action permise correspondant à un des paramètres de la courbe reconnus et corrigeant un paramètre défectueux mais s'il y a des actions autorisées correspondant à des paramètres hors courbe ou des actions correspondant à des paramètres de la courbe non reconnus, alors ces actions sont compatibles avec le but.
- s'il n'y a aucune de ces deux types d'action, on passe à la ligne suivante du but. Cette façon de traiter les buts permet de déterminer une double priorité : celle qui est indiquée par l'ordre des lignes et celle qui dépend du type de paramètre sur lequel porte sur le réglage ; un réglage correspondant à un paramètre de la courbe reconnus est prioritaire par rapport à un réglage portant sur un paramètre hors courbe ou sur un paramètre de la courbe non reconnus, ce qui est une hypothèse basée sur les observations de P. Pastré.

On a appliqué au protocole des actions le même programme de diagnostic des contraintes que pour les décisions de gestion de l'activité en vue de déterminer les épisodes à distinguer dans le protocole et la liste de contraintes qui reproduit au plus près les actions observées dans chaque épisode.

### ***1.4.3.3 La compréhension, de la courbe des pressions***

La courbe des pressions donne des informations sur les valeurs de plusieurs paramètres dont les valeurs sont cruciales pour le bon fonctionnement du système : temps d'injection, pression de commutation, contre-pression, pression de maintien, temps de maintien. D'après les études de P. Pastré, deux grandes stratégies se dégagent parmi les opérateurs, pilotage par la courbe et pilotage par les défauts. Dans la première stratégie, le feed-back de l'action est réalisé par une demande de courbe et la vérification de l'effet de l'action sur la courbe, tandis que dans la seconde le feed-back est recherché dans l'information sur les défauts.

Le pilotage par la courbe n'est possible que si l'opérateur sait lire sur la courbe quels paramètres ont une valeur normale, une valeur trop basse ou trop élevée. Nous traduisons cette idée dans le modèle en considérant qu'un paramètre non reconnu dans la courbe est équivalent à un paramètre non présent sur la courbe et pour lequel le contrôle de l'action de réglage ne peut se faire qu'à partir de l'information sur les défauts. On définit donc pour chacun des cinq paramètres lisibles sur la courbe une variable à 2 valeurs, indiquant que le paramètre est compris (1) ou qu'il n'est pas compris (0). On appellera vecteur compréhension le vecteur donnant le niveau de compréhension de ces paramètres, et qui caractérise un opérateur donné ;

Les valeurs de ce vecteur déterminent le fonctionnement à la fois des contraintes des gestion de l'activité et des contraintes des actions de réglage qui concernent le traitement des buts correspondant aux hypothèses sur l'origine des défauts. Dans ces règles en effet entre dans les conditions le fait que le paramètre est un paramètre de la courbe et qu'il est reconnu. La simulation doit donc être faite pour un patron de valeurs du vecteur compréhension : comme le fonctionnement des contraintes de gestion de l'activité et de réglage est conditionné par le patron des valeurs de ce vecteur, il faut répéter l'ensemble du processus (sélection des contraintes individuelles, construction de la liste, élimination des contraintes redondantes) doit être fait pour chaque patron de valeurs possible. Il y a théoriquement 32 patrons possibles, mais il y a des relations entre ces valeurs qui font que dans un premier temps on explore seulement 5 ou 6 patrons de valeurs.

### ***1.4.3.4 L'architecture du système***

Dans la première phase, on recherche le meilleur jeu de contraintes (ou les meilleurs s'il y a plusieurs épisodes) de gestion de la tâche en considérant le sous-protocole des prises de décision concernant la gestion de la tâche où l'on a à chaque essai l'une des six transitions entre les deux états de la tâche (prise de décision ou action) ou à l'intérieur de l'un d'eux, qui sont décrites plus haut : pour l'état prise d'information, PI-C-PI, PI-D-PI, PI-RE, PI-EF et pour l'état action, RE-RE, RE-PI. Cette recherche est faite pour chaque patron de valeurs de compréhension ; elle donne pour chaque essai à l'intérieur de chaque patron la pertinence de la simulation

Dans la deuxième phase, on recherche le meilleur jeu de contraintes (ou les meilleurs s'il y a plusieurs épisodes) de réglage en considérant le sous-protocole des actions de réglage. Cette recherche est faite également pour chaque patron de valeurs de compréhension et on obtient aussi pour chaque essai à l'intérieur de chaque patron la pertinence de la simulation à cet essai.

Dans la troisième phase, on reconstitue le protocole global des décisions de gestion de la tâche et des décisions d'action de réglage. Les actions de réglage se situent soit après une transition PI-RE (quand c'est la première action après une demande d'information) soit après une transition RE-RE (quand une action suit une autre action sans demande d'information entre les deux). Au terme de cette phase on a pour chaque patron de compréhension la suite des valeurs de pertinence de la simulation correspondant à la suite des essais. On compare alors les valeurs de pertinence sur l'ensemble des essais pour déterminer quel est le patron ou la combinaison de patrons (car la compréhension peut évoluer au cours des problèmes) qui maximise la pertinence sur l'ensemble des essais. Il est nécessaire de considérer l'ensemble des décisions pour déterminer le patron de compréhension à retenir, car les deux types de décisions sont conditionnées par le niveau de compréhension.

Lors de la quatrième phase, une fois déterminé le patron de compréhension (ou la combinaison de patrons) à retenir, on procède à la simulation définitive en simulant de façon indépendante les décisions de gestion de l'activité et les décisions d'actions de réglage. Pour cela on retient les contraintes sélectionnées dans les phases 1 et 2 pour ce niveau de compréhension.. Cette simulation peut se faire de façon indépendante car les contraintes de gestion de la tâche et de réglage ne dépendent les unes des autres que par le niveau de compréhension.

#### ***1.4.4. Discussion des résultats de la simulation***

##### ***1.4.4..1 Compatibilité du modèle avec les données***

On dispose de premiers éléments pour évaluer si le modèle peut décrire la complexité des données individuelles. La simulation que nous avons faite avec le premier jeu de contraintes qui ont été programmées montre que, pour le protocole analysé, la simulation est compatible avec plus de 95% des décisions prises pour la gestion de la tâche et de celles prises pour le réglage : la simulation est dite compatible quand l'action effectuée par l'opérateur est l'une de celles autorisées par la simulation. La prédictibilité de la simulation, c'est-à-dire le nombre de réponses autorisées par les contraintes figurant dans la simulation, est relativement bonne. Dans le cas des décisions concernant la gestion de la tâche on a 4 décisions possibles dans un état et 2 dans l'autre : la simulation prédit une seule réponse dans 90% des cas. Dans le cas des actions de réglage il y a 15 actions possibles : la simulation prédit une seule action dans 60% des cas et une ou deux actions dans 75% des cas. La prédictibilité devrait être améliorée, notamment pour les actions de réglage, quand on aura complété le jeu des contraintes à partir de l'analyse des autres protocoles.

##### ***1.4.4..2 La pertinence du modèle des contraintes pour la tâche de réglage des presses.***

Les premiers résultats sont encourageants quant à la possibilité d'adapter le modèle des contraintes à une situation de travail nettement plus complexes que les situations de résolution de problèmes classiquement étudiées. Tout d'abord, il semble possible de formaliser par des

contraintes les stratégies consistant soit à rechercher une nouvelle information après une première demande d'information, soit à passer à l'action, et permettant de décider si après une première action on fait une nouvelle action ou si l'on demande un feed-back. Comme on vient de le voir, la prédictibilité est bonne et le nombre d'incompatibilités faible en dépit de la longueur du protocole (il y a 253 prises de décision sur l'ensemble des 17 problèmes). Cela signifie donc qu'il y a une bonne cohérence dans ces prises de décision et que le modèle des contraintes peut être une analyse efficace dans cet aspect de l'analyse de l'activité.

En second lieu les contraintes ne sont pas seulement capables d'exprimer des buts élaborés à partir du seul état de la situation et de règles génériques de planification, elles peuvent aussi exprimer des buts qui reposent sur des hypothèses liées à des connaissances propres à la situation sur l'origine des défauts : elles peuvent exprimer l'aspect opératif de la connaissance. Pour ce qui est de la composante compréhension, qui intervient dans les inférences consistant à déterminer à partir de la courbe si les valeurs des paramètres sous-jacents sont normales ou non, elle n'est pas modélisée directement avec des contraintes : elle est prise en compte indirectement en modifiant le fonctionnement des contraintes de réglage et de gestion de la tâche. Il est nécessaire d'analyser d'autres protocoles pour déterminer si cette façon de formaliser la compréhension est satisfaisante dans cette situation.

### ***1.5. Approche par les modèles à base de connaissances***

Deux classes de modélisation de l'apprenant existe dans les systèmes informatiques : les modèles statiques qui ont pour objectif de stocker des informations pour prendre des décisions pédagogiques et les modèles dynamiques qui ont souvent pour objectif de reproduire et par la même d'expliquer le comportement des humains en général et des apprenants en particulier. Parmi les modèles dynamiques, les modèles à base de connaissances sont les plus nombreux. En particulier, les deux projets de grande envergure sur la modélisation cognitive de l'humain, SOAR (Rosenbloom et al, 1991) et ACT-R (Anderson et al., 2004) reposent sur l'hypothèse suivante (Nerwell et al., 1989) : Les capacités cognitives humaines conscientes sont bien représentées, sur le plan psychologique, par le formalisme des règles de production

Cette hypothèse n'a jamais été infirmée et de nombreux systèmes sont basés sur elle (voir par exemple, Rogé et Labat, 2004). Un avantage complémentaire des modèles à base de connaissances est l'aspect déclaratif de la modélisation qui permet de raisonner finement sur cette modélisation, notamment dans un contexte pluridisciplinaire car il est relativement aisé d'exprimer les connaissances au niveau connaissances. Grâce à l'utilisation du langage et des méthodes de résolution de l'expert, et la grande modularité des connaissances exprimées, cette représentation peut être partagée entre les différents membres du projet.

#### ***1.5.1. Définition de l'opérateur idéal***

Dans cette première année du projet, un de objectifs a été de réaliser une base de connaissances représentant, autant que faire se peut, un opérateur idéal (OI). Le processus de résolution implémenté est le suivant :

Dans un premier temps, l'OI commence sa résolution par la rectification de la courbe des pressions. En effet, les problèmes de courbe sont les plus simples à résoudre et les plus efficaces, car les pressions et temps de pression sont directement lisibles sur la courbe. Les meilleurs régleurs appliquent cette heuristique.

Dans un second temps, pour corriger les défauts visuels, l'OI adopte une « *stratégie analytique* » de résolution de problème (Pastré, 1994). L'OI est supposé avoir une connaissance parfaite du fonctionnement de la machine : pour chaque défaut, il est supposé connaître toutes les causes possibles. Il connaît également les règles d'actions et est capable d'identifier l'action la plus adaptée. Son diagnostic prend en compte :

- Le nombre de fois où une action lui a permis de résoudre les défauts présentés dans le problème. Dans la majorité des cas, pour un défaut ou un groupe de défauts, plusieurs solutions sont possibles. Grâce à l'expérience, l'OI doit être capable d'attribuer une préférence à telle action plutôt qu'à une autre.



- L'impact de l'action sur les autres types de défauts. Il lui faut, en effet, éviter d'appliquer une action qui résoudrait un défaut pour en faire apparaître un nouveau, sans faire avancer la situation. Il prend donc en considération l'ensemble des types de défauts lors de son diagnostic.

A ce premier diagnostic élaboré à partir des connaissances du métier de régleur, l'OI respecte également des règles plus générales d'adaptation à la tâche. Non liées au domaine particulier de la plasturgie, ces règles lui permettent d'affiner son diagnostic. Voici les heuristiques que nous avons modélisées :

Ne jamais exécuter 2 fois la même action dans un processus de résolution. En effet, si l'action n'a pas été convaincante une première fois, elle ne le sera pas plus une seconde fois.

Eviter les retours en arrière. L'OI ne doit pas fonctionner par essais erreurs. S'il se trouve dans une impasse, il doit s'assurer d'avoir exploré toutes les possibilités avant de faire machine arrière en exécutant une action inverse.

### ***1.5.2. Les règles d'action***

#### ***a) Règles d'action pour la courbe***

Les règles d'action pour la correction de la courbe des pressions sont très simples. En effet, lorsqu'un des paramètres représentés sur la courbe (TID, PC, P2, T2) n'est pas correct, une seule règle d'action peut s'appliquer : augmenter ou diminuer le paramètre en question de manière à obtenir l'allure souhaitée.

#### ***b) Règles d'action pour les défauts visuels***

Pour établir les règles d'action face aux défauts sur le produit, une **extraction des connaissances à partir de la base des états** de la machine a été effectuée.

*Réduction de la base des états :*

Compte tenu que la courbe est correcte après l'étape 1, l'espace problème est réduit. En effet, une fois que l'OI a résolu les problèmes liés à la courbe, les paramètres TID, PC, P2 et T2 sont corrects. Tous les états pour lesquels un de ces paramètres n'est pas correct peuvent donc être écarté pour la suite. Ce filtrage restreint considérablement la base, en passant des 4374 états à seulement 54 (3 paramètres et la buse :  $3^3 \times 2$ ). Les quatre paramètres à traiter sont CP, T3, T et la Buse.

Avec les paramètres de la courbe réglés, le nombre de défauts est également réduit. Tout d'abord, il ne peut plus y avoir de défauts de retassure, ni de cassure, car ces défauts dépendent exclusivement de la phase statique de maintien, donc de T2 et P2. Il ne peut pas non plus y avoir de striage Str2 et brûlure qui dépendent principalement de la vitesse d'injection. Enfin, les effets sur la quantité de matière injectée sont limités, ce qui interdit des bavures B3. Au final, les défauts restants sont donc : M1, M2, M3, B1, B2, Str1, S-1, S-2, S+1 et S+2.

*Définition des règles d'action et de leur priorité :*

Pour chaque défaut, 7 règles d'action ont été définies : 2 actions pour chacun des 3 paramètres – augmentation et diminution du paramètre de 1 unité – et une action pour le réalésage de la buse.

La priorité d'une règle d'action correspond au nombre d'occurrences, parmi les 54 états possibles de la machine, où :

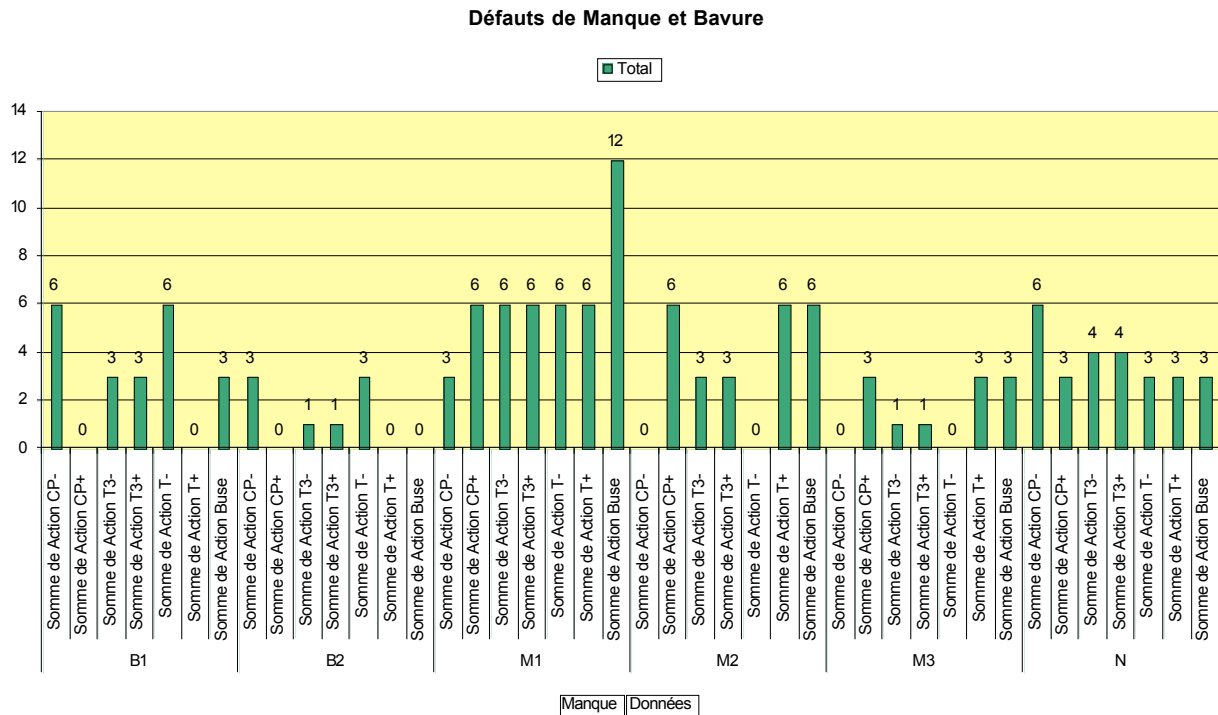
- le défaut apparaît,
- le paramètre est égal à (-1) pour une règle d'augmentation, ou à (+1) pour une règle de diminution.

La Figure 2 présente sous forme d'histogramme les nombres d'occurrences pour chaque défaut de manque et de bavure. Nous avons opéré de la même manière pour les défauts de Striage-Brûlure et de Serrage.

Pour chaque règle d'action  $a_i$  et pour chaque défaut  $d_j$ , on définit donc une priorité  $p_{d_j}^{a_i}$ .

$p_{d_j}^{a_i}$  = nombre d'états de la base présentant un défaut  $d_j$  et pour lesquels l'action  $a_i$  était nécessaire.

Par exemple, pour un manque M1, la règle d'action de diminuer le paramètre CP aura une priorité de  $p_{M1}^{CP-} = 6$ .



**Figure 2 : Nombres d'occurrences des règles d'action pour les défauts de Manque et de Bavure**

### 1.5.3. Le diagnostic

Après avoir défini la base de connaissances de remédiation, nous avons construit l'expertise de diagnostic.

#### a) Choix de l'action la plus pertinente

Les indices de courbe étant déjà réglés à ce niveau, un problème est défini par un triplet comprenant les valeurs des 3 familles de défauts possibles : Manque-Bavure, Striage-Brûlure et Serrage. On formalise ainsi un problème par :

$$Pb = \{D_{M-B}, D_{St-Br}, D_{Ser}\}$$

L'opérateur doit choisir entre les 7 actions sur les paramètres et la buse, nous noterons l'ensemble des actions possibles :

$$A = \{a1, a1-, a2, a2-, a3, a3-, a4\} = \{CP-, CP+, T3-, T3+, T^{\circ-}, T^{\circ+}, buse\}$$

Lorsqu'un nouveau problème se présente, l'OI additionne, pour chaque action  $a_i$  de  $A$ , les priorités  $p_{d_j}^{a_i}$  correspondant aux valeurs des défauts de  $Pb$  :  $\sum_{d_j \in Pb} p_{d_j}^{a_i}$ .

Pour les actions sur les 3 paramètres, l'OI soustrait au résultat précédent la somme des priorités pour l'action inverse  $a_i^-$  :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{a_i} - p_{d_j}^{a_i^-})$ . Les actions inverses obtiennent ainsi des résultats de

calcul inverses :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{a_i} - p_{d_j}^{a_i^-}) = - \sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{a_i^-} - p_{d_j}^{a_i})$ . L'action qui obtient un résultat strictement positif peut être appliquée et doit, normalement, avoir un effet bénéfique ou nul sur l'état du produit. En revanche, l'action inverse, qui obtient un résultat négatif est considérée comme contreproductive et ne peut être appliquée.

Pour le réalésage de la buse, il n'existe pas d'action inverse. La buse n'a effectivement que 2 états – matée ou non matée –, alors que les paramètres en ont 3. Pour cette raison, j'ai choisi de diviser par 3 la somme des priorités de la buse :  $\sum_{d_j \in Pb} p_{d_j}^{buse} / 3$ . Ce choix paraissait relativement logique et s'est relevé satisfaisant empiriquement.

Remarque :

le résultat est toujours positif. En effet, le réalésage de la buse ne peut pas être contreproductif dans la résolution d'un problème.)

L'OI applique ensuite l'action qui a obtenu le résultat positif le plus élevé. Pour résumer, l'action la plus pertinente vérifie l'équation suivante :

$$\boxed{\text{MAX} \left( \text{MAX}_{a_i \in A / \{buse\}} \left( \sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{a_i} - p_{d_j}^{a_i^-}) \right), \sum_{d_j \in Pb} p_{d_j}^{buse} / 3 \right)}$$

- Avec :
- $Pb = \{ D_{M-B}, D_{Str-Br}, D_{Ser} \}$
  - $A = \{ CP^-, CP^+, T3^-, T3^+, T^{\circ-}, T^{\circ+}, buse \}$
  - $a_i^-$  est l'action inverse de  $a_i$
  - $p_{d_j}^{a_i}$  priorité de l'action  $a_i$ , en présence du défaut  $d_j$

Exemple :

Pour illustrer la méthode utilisée, nous prendrons l'exemple d'un problème classique présentant les défauts **M1** et **Str1**. Dans cet exemple, le problème est caractérisé par M1 pour Manque-Bavure, Str1 pour Striage-Brûlure et  $N_{ser}$  pour Serrage. On a ainsi :  $Pb = \{ M1, Str1, N_{ser} \}$ . Les calculs de diagnostic donnent les résultats suivants :

- Action CP- :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{CP-} - p_{d_j}^{CP+}) = (p_{M1}^{CP-} + p_{Str1}^{CP-} + p_{N_{ser}}^{CP-}) - (p_{M1}^{CP+} + p_{Str1}^{CP+} + p_{N_{ser}}^{CP+})$   
 $= (3+0+5) - (6+6+15) = -19$
- Action CP+ :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{CP+} - p_{d_j}^{CP-}) = (6+6+15) - (3+0+5) = 19$
- Action T3- :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{T3-} - p_{d_j}^{T3+}) = (6+4+10) - (6+4+10) = 0$
- Action T3+ :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{T3+} - p_{d_j}^{T3-}) = (6+4+10) - (6+4+10) = 0$

- Action T- :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{T-} - p_{d_j}^{T+}) = (6+0+7) - (6+12+15) = -20$
- Action T+ :  $\sum_{d_j \in Pb} (p_{d_j}^{T+} - p_{d_j}^{T-}) = (6+12+15) - (6+0+7) = 20$
- Action buse :  $\sum_{d_j \in Pb} p_{d_j}^{buse} / 3 = (12+6+22) / 3 = 13.33$

*Résultat :*

En observant les résultats des calculs, on remarque que l'action d'augmenter la température T est préférée aux autres. C'est un résultat conforme à l'expertise humaine. Son action inverse, qui serait par conséquent contreproductive, obtient un résultat négatif.

Par ailleurs, on remarque également que l'action CP+ a également une valeur proche. Ceci est du au fait qu'un manque M1 est souvent du à une CP trop basse. Quant aux actions sur T3, elles obtiennent logiquement zéro, car le paramètre n'a aucune influence sur les problèmes de Manque-Bavure et Striage-Brûlure.

#### b) Utilisation des heuristiques

Avant d'appliquer une action, il faut savoir si cette action ou son action inverse n'ont pas déjà été appliquées. 3 cas différents d'applicabilité pour les actions ont été définis :

- Cas **n0** : le paramètre de l'action n'a pas encore été utilisé dans la résolution, l'action peut donc être utilisée sans restriction, si elle obtient la plus forte priorité.
- Cas **n1** : l'action inverse sur le paramètre a déjà été utilisée dans le processus de résolution. L'action ne pourra donc être utilisée qu'en cas d'impasse, où il sera alors évident qu'au moins une des actions appliquées n'était pas souhaitée. Une des actions inverses doit donc être appliquée.
- Cas **n2** : l'action a déjà été utilisée une fois. Si elle n'a pas permis de résoudre le problème, c'est qu'elle est inefficace, elle est donc mise définitivement de côté.

Exemple :

Dans l'exemple précédent, il s'agissait de la première opération de résolution, toutes les actions sont donc au niveau n0. L'action T+ est appliquée. A l'opération suivante, T+ sera un cas n2 et ne pourra plus être appliquée. T- devient un cas n1 et pourra être appliquée uniquement s'il n'y a plus d'actions n0 avec un résultat de calcul positif.

### **1.5.4. Programmation en CLIPS**

#### a) Situation

L'opérateur idéal virtuel a été développé en CLIPS. Il devrait être intégré au simulateur java grâce à l'outil JESS. Cependant, pour tester l'OI seul dans un premier temps, un mode spécifique a été prévu. Le fonctionnement de la presse est simulé en clips grâce à une base de faits des états de la machine. Le mode *simulateur* sera choisi lorsque l'OI recevra les informations, concernant la presse et le produit, par le simulateur.

Un processus de résolution est divisé en **cycles**. Comme un opérateur humain, l'OI observe la situation en regardant les défauts et la courbe, puis il pose un diagnostic en analysant les informations recueillies et effectue la remédiation la plus probable.

Voici la structure (template) permettant de définir la situation du processus à un instant donné :

```
(deftemplate Situation
  (slot mode (type SYMBOL))
```

```
(slot operateur (type SYMBOL))  
(slot cycle (default 0))  
(slot etape (type SYMBOL))  
)
```

Le slot *Operateur* indique le type d'opérateur simulé. Pour l'instant, seul l'*ideal* est développé.

### b) Règles d'action

Les règles d'action sont définies pour chaque type d'opérateur :

```
(deftemplate Regle-action  
  (slot operateur (type SYMBOL))  
  (slot typeDef (type SYMBOL) (default N))  
  (slot default (type SYMBOL))  
  (slot parametre (type SYMBOL))  
  (slot action (type INTEGER))  
  (slot priorite (type INTEGER) (default 0))  
)
```

Voici l'exemple des règles d'action de l'opérateur idéal pour le défaut Str1. Les règles sont modélisées sous forme de faits clips et constituent la base de connaissances de l'OI.

```
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre CP) (action -1) (priorite 0))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre CP) (action 1) (priorite 6))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre T3) (action -1) (priorite 4))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre T3) (action 1) (priorite 4))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre T) (action -1) (priorite 0))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre T) (action 1) (priorite 12))  
(Regle-action (operateur ideal) (default Str1)  
  (typeDef Striage-Brulure) (parametre Buse) (action 1) (priorite 6))
```

### c) Résultat de l'action choisie

A chaque nouveau cycle et en fonction des paramètres de la presse, sont définis les nouveaux indices de la courbe, les nouvelles valeurs des défauts ainsi que les nouvelles situations des actions.

```
(deftemplate DefautVisuel  
  (slot cycle (default 0))  
  (slot demande (default non))  
  (slot nom (allowed-values Manque-Bavure Striage-Brulure Retassure-  
  Cassure Serrage))  
  (slot valeur (allowed-values N M1 M2 M3 B1 B2 B3 ST1 ST2 Ret1 Ret2  
  S-2 S-1 S+1 S+2) (default N))  
)
```

N : Normal

M1: manque léger M2: manque moyen M3: gros manque

B1: bavure légère B2: bavure moyenne B3 grosse bavure

Ret1: retassure acceptable Ret2: retassure non acceptable

S-2 : serrage trop faible, non acceptable S-1 serrage trop faible, acceptable N: serrage normal

S+1: serrage trop fort, acceptable S+2: serrage trop fort, non acceptable

```
(deftemplate IndiceCourbe  
  (slot demande (default non))
```

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**Programme interdisciplinaire TCAN**

```
(slot cycle (default 0))
(slot nom (allowed-values VI P2 T2))
(slot valeur (allowed-values N Vi- Vi+ Pc-Ti- Pc+Ti+ P2- P2+ T2-
T2+)) (default N)
)
```

N : Normal

Vi- : vitesse d'injection trop faible ; Vi+ : temps d'injection trop fort ; PC-Ti- : Pression de commutation trop faible et temps d'injection trop fort ; PC+Ti+ : pression de commutation trop forte et temps d'injection trop fort ;

P2- : Pression de maintien trop faible ; P2+ : pression de maintien trop fort ;

T2- : temps de maintien trop faible ; T2+ : temps de maintien trop fort

```
(deftemplate Action
(slot cycle (default 0))
(slot parametre (allowed-values TID PC CP P2 T2 T3 T Buse))
(slot valeur (allowed-values -1 0 1) (default 0))
(slot priorite (type FLOAT) (default 0.0))
(slot utilise (default non))
(slot applicable (default n0))
)
```

Le slot *utilise* est à oui si l'action est utilisée pendant le cycle. Le slot *applicable* définit le degré d'applicabilité de l'action. Le nombre et la signification des degrés d'applicabilité dépendent de l'opérateur.

### **1.5.5. Exemples de résolution**

Une phase de tests nous a permis de constater que l'OI résout tous les problèmes proposés et arrive à un régime normal pour la machine. Pour une grande majorité des problèmes, l'OI trouve la solution sans détour. Il résout donc les problèmes en autant de cycles qu'il y a de paramètres déréglés. Dans l'exemple de la Figure 3, six paramètres sont incorrects ; au 7<sup>ème</sup> cycle, l'OI les a tous corrigés. Pour d'autres problèmes, relativement courants, un détour minime – comme un problème de serrage et T3 – peut être fait dans la correction des défauts. En revanche, l'étape de correction de la courbe est résolue sans aléa. Dans tous les cas, aucune résolution de l'OI n'excède les 10 cycles.

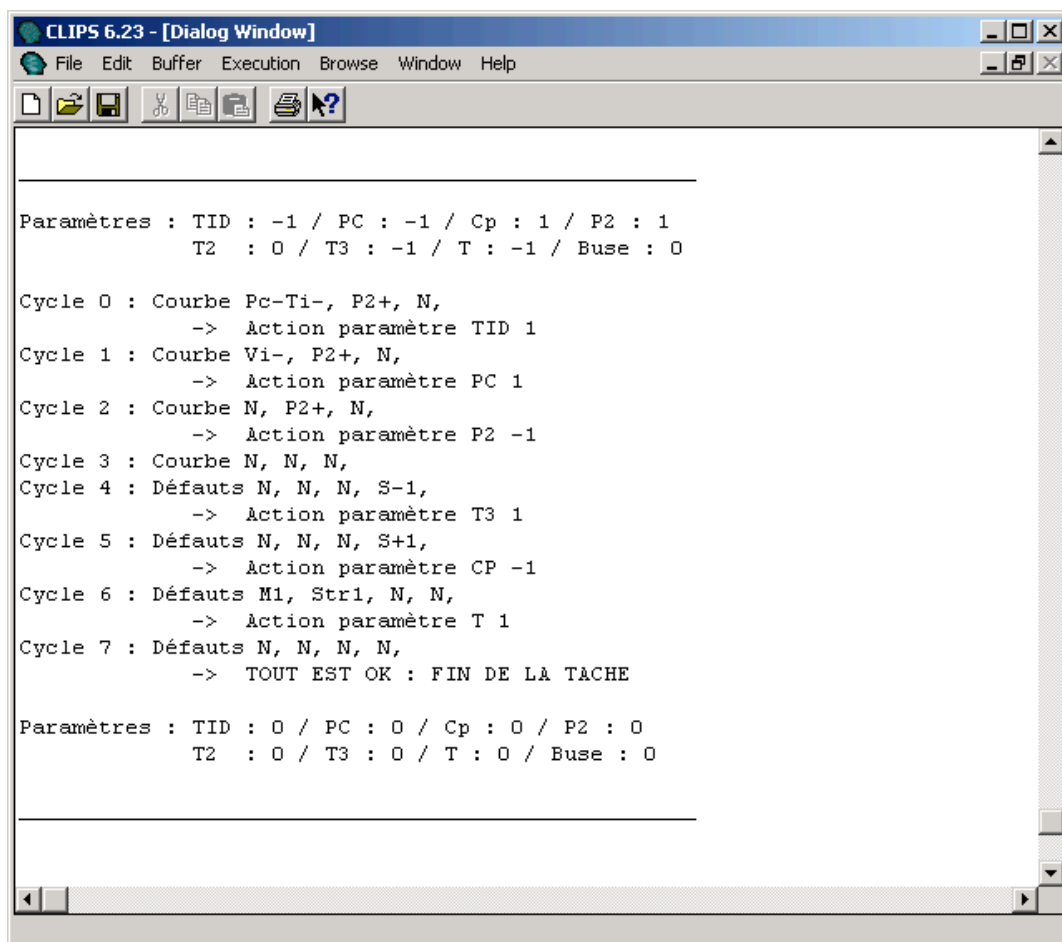


Figure 3 : Exemple de résolution de l'OI

#### Processus de résolution de l'exemple 1 :

- Cycle 0 et 1 : l'OI commence son processus de résolution par la consultation et la correction de la courbe. L'OI lit sur celle-ci les problèmes de TID et P2 et les corrige automatiquement.
- Cycle 2 : l'OI constate que la courbe a l'allure souhaitée, il passe donc à la consultation et la correction des défauts.
- Cycle 3 : l'OI interprète, après calcul, les défauts de bavure et serrage trop fort comme un problème de T° trop forte. Cette interprétation est correcte pour le problème de bavure. En revanche une T° trop forte, provoque généralement un serrage trop faible.
- Cycle 4 : l'OI constate, en consultant les défauts, que l'action précédente a effectivement corrigé le problème de bavure. Il reste cependant un serrage trop fort. Le paramètre pouvant être seul la cause d'un serrage S+1 est T3. L'OI abaisse donc T3. La stratégie de résolution est cohérente.
- Cycle 5 : la diminution de T3 a bien fait diminué le serrage mais un problème de S-1 est apparu. L'action la plus pertinente serait d'augmenter T3 (priorité de 19, d'après les calculs de diagnostic). Mais cette action, passée au niveau n1 (cf. §5.2.4), équivaudrait à un retour en arrière, ce que l'OI doit éviter dans la mesure du possible. Mêmes constatations ensuite pour l'action T+ (priorité de 18 au diagnostic). Il reste alors l'action CP+ (priorité 13), encore au niveau n0, qui est appliquée.

- Cycle 6 : le serrage est corrigé mais un problème de manque M1 et de striage Str1 est apparu. CP et T, ayant déjà été utilisé, l'OI tente de corriger la buse. (Une buse matée fait apparaître des problèmes de manque.) Mais la buse n'est pas matée.
- Cycle 7 : l'OI est dans une impasse. Il a modifié tous les paramètres et il reste toujours des problèmes de manque et striage. Il n'y a donc plus d'action de niveau n0. Il doit donc exécuter une action inverse, de niveau n1. La diminution de la température est préférée après le calcul de diagnostic, il applique donc l'action T-.
- Cycle 8 : le striage et le manque ont disparus, mais il est apparu un problème de serrage S-1. Toujours parmi les actions de niveau n1, l'augmentation de T3 s'avère la plus pertinente. L'OI redescend donc T3.
- Cycle 9 : L'OI constate que tous les défauts visuels sont résorbés. Le processus de résolution est donc terminé.

Dans quelques cas rares, l'OI peut faire face à une impasse. Nous allons observer la démarche adoptée par l'OI dans un tel cas de figure. L'exemple de la figure 2 pose le problème d'une contre-pression CP trop forte, produisant une bavure et serrage trop forts, que l'OI ne détecte pas. Il s'engage alors dans une stratégie cohérente mais qui le mène dans un premier temps à une impasse. Le choix était réaliste et aurait pu s'avérer être le bon. Lorsque il se trouve dans l'impasse, l'OI fait un retour en arrière. Il réajuste alors le(s) paramètre(s) qui a (ont) produit le blocage (i.e. le(s) paramètre(s) choisi(s) en fonction de la première hypothèse) et résout ainsi le problème.

Cette stratégie s'apparente à une stratégie analytique. L'OI va jusqu'au bout de son raisonnement avant de revenir sur ses précédentes actions.

## ***1.6. Logiciel du au projet : le simulateur***

Le simulateur reprend la modélisation faite par P. Pastré précédemment. L'espace problème est modélisé sous forme d'un graphe dont les nœuds représentent les états du problème et les arcs les opérateurs, selon la modélisation classique proposée par Simon et Newell (Newell et al., 1972). Le simulateur est donc un système à états discrets.

### ***1.6.1. Détermination de l'espace problème***

Dans le cas des problèmes de réglage de presse à injecter, un état correspond à un paramétrage de la presse et à la combinaison des défauts visuels et/ou des indices de courbe résultants. Les régleurs n'ayant pas accès aux valeurs des paramètres, un état est défini, à leurs yeux, uniquement par la combinaison de défauts et d'indices. Sept des paramètres peuvent prendre trois valeurs : **-1** pour **faible**, **0** pour **normale** et **+1** pour **forte**. La buse peut prendre deux valeurs : **-1** pour **buse matée** et **0** pour **buse normal**. Il y a donc  $3^7 \times 2$ , soit 4374 états possibles de la machine.

#### a) L'état initial :

L'état initial peut être n'importe quel état, présentant des défauts visuels et/ou un dysfonctionnement machine. Cet état doit être différent de, ou des, états finaux.

#### b) L'état but :

Pour les problèmes de réglage de presse, l'état but dépend du niveau de compétence et de connaissance du régleur. Pour l'opérateur idéal et les régleurs les plus qualifiés, les produits ne doivent présenter aucun défaut et la courbe de pression doit avoir l'allure correspondant au régime normal de la presse. L'état final est donc de **0 défaut** visuel et des **indices** de courbe **normaux**.



En revanche des régleurs moins compétents peuvent se contenter d'états finaux approchés. Ainsi, certains aboutiront à des états compensés, pour lesquels aucun défaut n'est visible sur le produit, alors que le fonctionnement de la machine est déséquilibré. Ces situations, relativement fréquentes, apparaissent lorsque plusieurs paramètres déréglés se compensent de sorte que l'on obtienne un produit sans défaut.

Des régleurs avec des connaissances plus incertaines se contenteront également d'états finaux avec des défauts visuels de niveaux acceptables, comme un manque M1 ou un serrage S+1.

c) Les opérateurs :

Les opérateurs permettant de passer d'un état à l'autre sont l'augmentation ou la diminution d'un des paramètres de réglage. Pour notre modélisation, nous ne pourrions modifier qu'un paramètre à la fois et d'une seule unité.

Les paramètres sur lesquels peuvent agir les opérateurs sont les suivants :

- La pression de commutation **PC** permet d'agir sur la quantité de matière injectée. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions. (Figure 4)
- Le temps d'injection **TID** permet d'agir sur la quantité de matière injectée et sur l'aspect final des produits. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions. (Figure 4)
- La contre-pression **CP** exercée pendant la phase dynamique d'injection permet de densifier la matière, notamment pour lutter contre les effets du changement d'état de la matière qui succède. Sa valeur n'est pas observable et doit donc être inférée par l'opérateur. Elle est réglée en pourcentage de la pression d'injection.
- La température du moule et des busettes **T°** détermine la température de la matière au moment de l'injection. Sa valeur n'est pas observable et doit donc être inférée par l'opérateur.
- La pression de maintien **P2** permet de compenser le retrait de la matière pendant la phase de maintien. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions. (Figure 4) Elle est réglée en pourcentage de la pression d'injection.
- Le temps de maintien **T2** accentue les effets de la pression de maintien. Sa valeur est observable sur la courbe des pressions. (Figure 4)
- Le temps de refroidissement **T3** correspond à l'intervalle entre la fin de la phase de maintien et l'ouverture du moule pendant lequel le produit se refroidit.

Les opérateurs peuvent également être amenés à détecter des problèmes provenant de l'état de la presse à injecter. Par exemple, le clapet, chargé d'empêcher le retour de la matière à l'extrémité de la vis lors de l'injection, peut s'user et provoquer un manque de matière. Les événements – micro orifices sur les empreintes – peuvent être encrassés. Cependant dans le cadre de l'étude nous ne traiterons qu'un seul composant relatif à la machine, la **buse**. Avec le temps l'orifice de celle-ci peut s'obstruer et entraîner une diminution du flux de matière, provoquant un manque. On dit alors que la buse est **matée**. L'opérateur peut alors la remplacer. Une buse matée n'est cependant pas évidente à diagnostiquer, car, non observable, elle doit être inférée.

Le simulateur a été conçu pour permettre, via son tableau de bord, de modifier les paramètres de réglage. Il renvoie instantanément la nouvelle courbe des pressions ainsi que les défauts sur le produit exprimés suivant des valeurs symboliques. Par exemple : Sur la figure 4, dans le cadre en bas à gauche, les 2 valeurs en rouge indiquent des défauts : M1 : manque peu important de produit, Str2 un striage important.

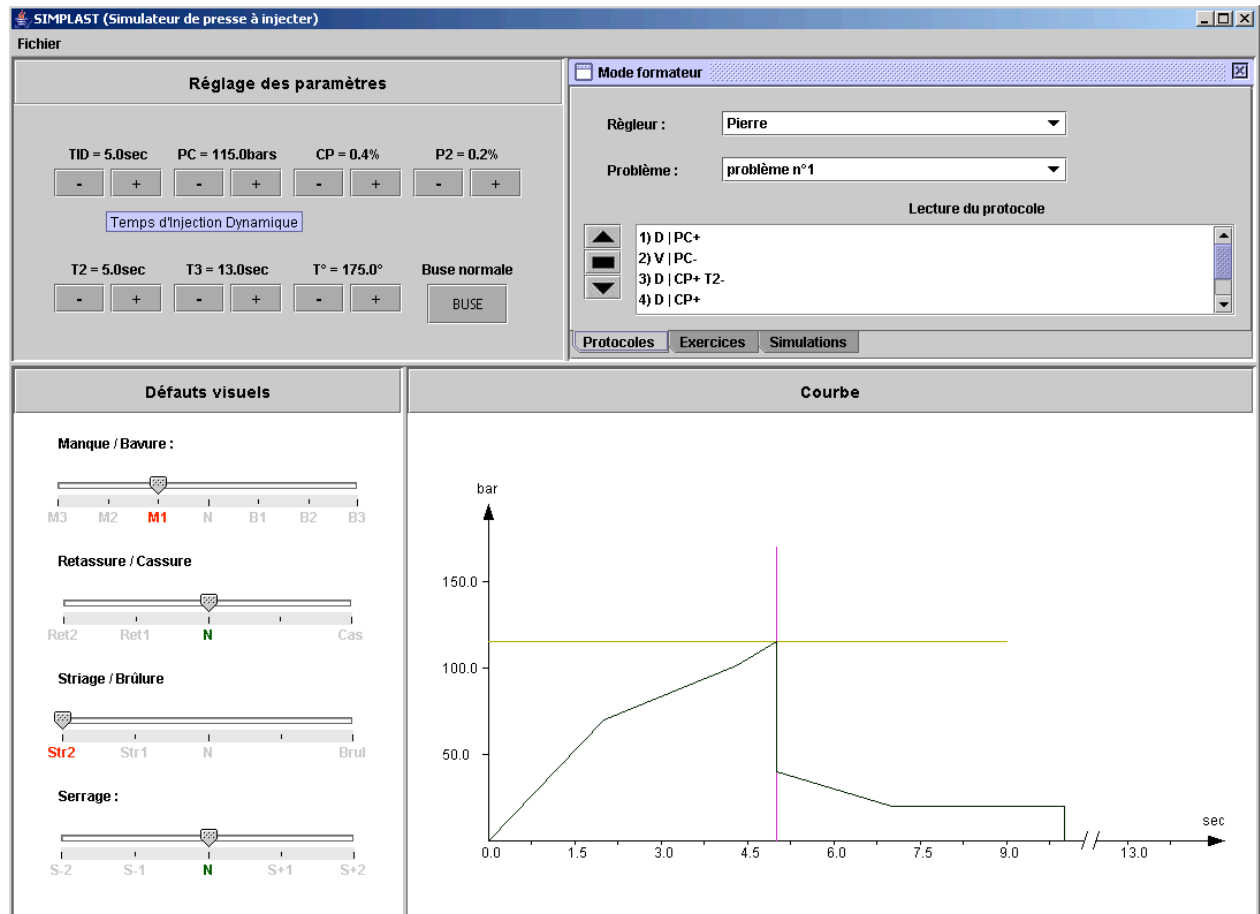


Figure 4 : Simulateur SIMPLAST, mode formateur

Le simulateur a été pensé en vue de son utilisation future pour la formation des régisseurs de presse. C'est pourquoi, 2 modes d'utilisation ont été prévus :

- Le **mode formateur** . Il permet de lire les protocoles de résolution de problèmes sauvegardés, d'ajouter de nouveaux exercices ou en supprimer pour les opérateurs. Il est également possible d'effectuer des simulations de résolutions avec les prototypes de modélisations d'opérateurs qui verront le jour dans la suite du projet. Dans un premier temps, seule la stratégie de résolution de l'opérateur idéal a été réalisée et peut être testée.
- Le **mode opérateur** n'est pas encore implémenté. Il devrait permettre, à terme, de choisir un exercice parmi une liste préalablement enregistrée par le formateur. L'opérateur pourrait s'entraîner librement mais il serait également possible de sauvegarder ses protocoles de résolution de problèmes pour le formateur. Pour cela, chaque action sur les boutons de paramètres ou consultation d'informations par l'opérateur serait enregistrée jusqu'à la fin de la résolution.

### ***1.6.2. Présentation de l'interface***

Il a été choisi de présenter toutes les fonctionnalités et toutes les informations sur un seul écran (Figure 4). Le but est de faciliter la perception de l'ensemble de la situation par l'utilisateur lors de ses prises d'information nécessaires pour la résolution des exercices. Ainsi, l'écran se divise en quatre zones :

- La zone située en haut à droite constitue une sorte de boîte à outils personnalisée pour l'utilisateur. A chaque nouvel usage de Simplast, l'utilisateur devra s'identifier en tant que *formateur* ou *opérateur*. Dans le mode formateur, l'utilisateur peut choisir le protocole qu'il veut voir dérouler, définir un exercice nouveau ou lancer la simulation d'un opérateur virtuel.
- La zone située en haut à gauche de l'écran concerne le réglage des paramètres et le réalésage de la buse. Pour chaque paramètre, deux boutons permettent de faire varier sa valeur positivement ou négativement. N'ayant que 3 valeurs possibles, lorsqu'une action est demandée mais que la valeur limite a été atteinte, le fond clignote 2 – 3 fois autour du paramètre pour prévenir l'utilisateur qu'il ne peut pas aller plus loin. Par ailleurs, les valeurs numériques des paramètres ne seront affichées que pour le mode formateur, les opérateurs n'ayant pas accès à cette information en situation réelle.
- La zone située en bas à gauche présente les défauts visuels apparaissant sur le produit. Ceux-ci sont présentés sur des axes horizontaux avec pointeur. Sauf pour le serrage, les défauts inverses (ex : Manque et bavure), sont disposés sur un même axe. Au centre de chaque axe se trouve la valeur N (Normal). Les valeurs courantes des défauts, à un état donné, apparaissent en rouge. A chaque modification d'un paramètre les défauts se mettent à jour à l'aide de la base des états.
- La zone située en bas, à droite donne le tracé schématisé de la courbe des pressions. Réalisé à l'aide de la bibliothèque `java.awt.Graphics`, il s'agit, en réalité, de points – déterminés à partir des fonctions par morceaux définies pour le premier simulateur – reliés entre eux par des segments. La courbe est rafraîchie automatiquement à chaque modification de paramètre.

Ces deux panneaux du bas sont visibles en permanence pour le mode formateur. En revanche pour le mode opérateur, un panneau n'est visible que si l'opérateur le demande. Pour cela, il lui suffit de rester cliqué, avec la souris, sur le bouton supérieur « Défauts visuels » ou « courbe » (Figure 4). Le but est de pouvoir contrôler les consultations d'informations de l'opérateur.

### **1.6.3. Réalisation technique**

Le simulateur a été développé en Java, avec les bibliothèques Swing et Awt pour l'interface graphique.

L'application est reliée à une base de données sous forme de fichiers Excel avec liaison ODBC. Ce format a été choisi car il permet à toute l'équipe de pouvoir travailler et s'échanger des fichiers. La base de données contient la table des états de la machine et des produits en fonction des valeurs des paramètres (cette table est utilisée pour simuler le comportement de la presse) et les tables des protocoles des opérateurs.

## **1.7. Références**

- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review* 111, (4). 1036-1060.
- Newell, A., Rosenbloom P. S. & Laird J.E. (1989). Symbolic Architectures for cognition In M.I. Posner (Ed.) *Foundations of Cognitive Science* (pp. 93-131). MIT Press
- Pastré P. (1994a). Le rôle des schèmes et des concepts dans la formation des compétences, *Performances humaines et techniques*, 71, 21-28.
- Pastré P. (1994b). Didactique professionnelle et développement, *Psychologie française*, 42-1,89-100.
- Pastré P. (2004). Le rôle des concepts pragmatiques dans la gestion de situations problèmes : le cas des régleurs en plasturgie. Dans Pastré P., Samurçay R. (dir) *Recherches en didactique professionnelle*, Toulouse, Octares.
- Richard, J. F., Poitrenaud, S., & Tijus, C. (1993). Problem solving restructuring : Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.

- Richard, J-F. (1994). La résolution de problèmes. In M. Richelle, M. Robert, & J. Reguin (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 523-574). Paris: PUF
- Richard, J.F. (1999a). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Richard, J.F. & Zamani, M. (2003). A Problem-Solving Model as a Tool for Analyzing Adaptive. In R.J. Sternberg, J. Lautrey & T. Lubart (Eds) *Models of intelligence : International Perspective*. . Washington, DC: American Psychological Association. pp.213-226.
- Rogé et Labat, (2004) : “Integration of virtual players into a pedagogical simulator”, International Conference on Computer Aided Learning in Engineering Education, CALIE, short paper, Grenoble, 2004
- Rosenbloom, P.S., Laird, J. E., Newell, A.,& McCarl, R. (1991). A preliminary analysis of the Soar architecture as a basis for general intelligence, *Artificial Intelligence*, 47, 289-325

*Site Web*

*CLIPS* <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html> (consulté en Octobre 2005)

