

**Systeme expert et génération automatique
de gammes :
Regard sur l'expérience d'un atelier de métallurgie
des métaux précieux.**

*Armand Hatchuel - Enseignant chercheur à l'Ecole des Mines
Benoît Well - Enseignant chercheur à l'Ecole des Mines*

***Cet article a été écrit avec l'aimable autorisation et la liberté
d'investigation accordée par les responsables de Gestion du
Comptoir Lyon Alemand Louyot aux auteurs.
Notre reconnaissance s'adresse tout spécialement à M. DRUIHLE qui
a conçu et conduit ce projet de sa naissance à son aboutissement.***

SYSTEME EXPERT ET GENERATION AUTOMATIQUE DE GAMMES REGARD SUR L'EXPERIENCE D'UN ATELIER DE METALLURGIE DES METAUX PRECIEUX

Faut-il encore s'intéresser aux systèmes-experts ? Cette question aurait pu paraître incongrue il y a quelques années tant les systèmes-experts semblaient alors voués à une diffusion importante et rapide. Pourtant, la phase initiale d'engouement pour cette nouvelle technologie, abondamment relayée par les médias, est maintenant largement oubliée. Paradoxalement, c'est au moment où l'on constate un certain attentisme (voire septiscime) des industriels vis-à-vis de cette technologie qu'il devient possible de mieux apprécier les apports réels de ces outils et de dégager les conditions de leur efficacité. L'heure est peut-être venue d'une réévaluation de leurs possibilités.

En effet, on commence à voir apparaître ici ou là dans l'industrie des systèmes-experts qui ne sont plus de simples maquettes de démonstration mais de véritables outils opératoires qui ont su trouver leur place dans le fonctionnement concret de l'entreprise. (2)

Cet article se propose de relancer ce débat en présentant une de ces réalisations dans un domaine moins connu que le diagnostic dépourvu, il s'agit en effet de génération automatique de gamme de transformation.

Les auteurs ont suivi ce projet pendant tout son déroulement, en rencontrant les principaux acteurs à divers moments clés. Ils ont ainsi pu connaître les choix techniques, les débats sur les orientations, la découverte progressive des véritables enjeux du projet. Bref, tenter de reconstruire dans sa richesse et sa complexité, l'itinéraire souvent inattendu que connaissent les projets innovants.

I. LES ENJEUX DU PROJET DE GENERATION AUTOMATIQUE DE GAMMES A L'AIDE D'UN SYSTEME-EXPERT

Le Comptoir Lyon Alemand Louyot (CLAL) s'est lancé en 1987 dans un important projet d'élaboration automatique de ses gammes de fabrication à l'aide d'un système-expert. Pour permettre de comprendre les raisons qui ont conduit le CLAL à se lancer dans ce projet ambitieux, nous présenterons d'abord l'activité de l'entreprise et ses principales caractéristiques, ce qui nous conduira à introduire la notion de gammes, et les différents types possibles d'élaboration et de gestion de ces gammes par les préparateurs. Enfin nous résituerons ce projet dans la perspective, plus vaste, d'une profonde

transformation, souhaitée par l'entreprise, de son système de production et des modes de gestion associés, pour s'adapter, mieux et plus vite, à un environnement en cours d'évolution rapide.

1.1 La transformation des métaux précieux : les conséquences de la diversité des commandes

L'entreprise réalise toutes les opérations de métallurgie (laminage, tréfilage...) pour transformer des lingots ou des billettes d'alliages de métaux précieux en bandes, plaques et fils... Par rapport aux entreprises métallurgiques classiques, elle diffère essentiellement par la valeur de la matière travaillée, les faibles quantités mises en oeuvre, la taille réduite de ses installations ; ainsi par exemple, le plus gros laminoir utilisé a tout juste les dimensions d'un laminoir de recherche dans une grosse entreprise de transformation de l'aluminium.

L'entreprise travaille à la commande, pour des clients aux exigences très différentes. Quoi de commun, en effet, entre la commande épisodique d'une faible quantité d'or émanant d'un bijoutier, et les commandes importantes et régulières de microprofilés, passées par telle grosse entreprise de l'industrie électrotechnique pour réaliser en série des contacts électriques ; ou bien encore, entre la production de baguettes et d'anneaux de brasure, utilisés en grosses quantités et celle de filières en platine, extrêmement complexes et coûteuses, produites à l'unité pour l'industrie du verre. Au total, les commandes sont non seulement hétérogènes - les formes et les usages sont variés, plus d'une centaine d'alliages sont possibles, les quantités en cause passent de quelques centaines de grammes à la tonne - mais de plus, la plupart des commandes présentent des caractéristiques spécifiques qui en font à chaque fois un problème nouveau. Ainsi sur environ 20 000 commandes traitées l'an passé, plus de la moitié différaient les unes des autres.

Pour répondre à cette diversité des commandes, l'usine est organisée en départements, spécialisés chacun dans le traitement d'alliages à base d'un type de métal précieux : or, argent ou platine. Dans ces départements on retrouve des ateliers par technologie. Ainsi, à l'intérieur du département argent, il y a un atelier de laminage, où sont regroupés les différents laminoirs, l'essentiel des fours de recuit et des cisailles, un atelier de tréfilerie, avec l'ensemble du parc des tréfileuses, et un atelier de microprofilé.

Il est rare qu'une même commande transite par les différents ateliers. Parcontre, à l'intérieur d'un même atelier, les opérations sur une commande

LAMINAGE ARGENT		ALLIAGE 1 ARGELEC. 2021	ALLIAGE 2	ALLIAGE 3	Service Cial AIE	No de Commande 40000
Client destinataire : MARSEILLE					Quantité Cde : 10 Kg	
Client Final : IEC					Délai accepté : 8838	
Désignation du produit : BANDE					Plan : 11232 Spécification :	VISA GAMME
Dimensions :	Longueur	Largeur	Epaisseur	ETAT : NP		
		11	0,41	DURETE : 75		
Tolérances :		+0,10/-0,10	+0,01/-0,01	Quantité à lancer :		
OPERATION		MACHINE	Sect	DIMENSIONS VALEURS CONSIGNES	Tps Passé	Qte Estimée
No	DESIGNATION					
1	PRELEV.EBAUCHE	PRELEVEMENT		EPAISSEUR : 2,5 LARGEUR : 75 LONGUEUR : 1000.		
2	LAMINAGE	L.6.CYL		EPAISSEUR : 0,41 LAMINOIR.AUTORISE.1:LAMINOIR.DUO. LAMINOIR.AUTORISE.3:LAMINOIR.DUO.AD8 TOL.EPAISSEUR.MAX= +0,01 TOL.EPAISSEUR.MIN= -0,01		
3	DEGRAISSAGE	BLANC.2262				
4	MISE.A.LARGEUR	CISAILLE.85		EPAISSEUR : 0,41 LARGEUR : 11 NOMBRE.ELEVE : 5 TOLERANCE.LARGEUR.MAXIMUM : 0,10 TOLERANCE.LARGEUR.MINIMUM : 0,10		
5	RECUIT.FINAL	F.CLOCHE.1500		EPAISSEUR : 0,41		
6	CONTROLE			DIMENSIONNEL CARACTERISTIQUE.MECANIQUE		
7	EMBALLAGE			PESEE		

peuvent être nombreuses et s'enchaîner suivant une succession relativement complexe, ce qui conduit à une circulation des flux souvent assez enchevêtrée. Malgré une certaine spécialisation par produit, chaque atelier reste confronté à une grande diversité des commandes qui lui arrivent.

1.2 La place des gammes et le rôle des préparateurs

Dimensions, nature de l'alliage, état métallurgique, et propriétés mécaniques, sont autant de caractéristiques qui vont faire de chaque commande un problème particulier, pour lequel il faudra préciser la forme et la quantité de matière première nécessaire, puis décrire la succession des opérations et les machines adaptées pour aboutir au résultat attendu. Toutes ces informations sont regroupées dans un document, la gamme de fabrication, qui joue un rôle central dans toutes les industries de transformation. En particulier dans les situations où, comme ici, la nature des opérations et l'ordre de leur succession peuvent différer d'une commande à l'autre, si bien que dans l'atelier deux commandes vont suivre un itinéraire différent, qui pourra passer par des machines communes, mais à des étapes du cycle de production différentes, ou éventuellement impliquer des machines différentes.

Traditionnellement, l'élaboration et la gestion des gammes sont confiées à des préparateurs. Il s'agit de techniciens spécialisés dans cette tâche, qui mobilise des savoirs multiples : techniques métallurgiques, connaissance du parc des machines, des pratiques de l'atelier et de ses problèmes. De plus, leur activité les conduit à entretenir des relations avec de nombreux acteurs de l'entreprise : les commerciaux qui leur transmettent les commandes, le planning qui leur donne les délais de fabrication, les responsables de l'atelier, qui les informent sur les niveaux de stock des produits intermédiaires, pour leur permettre de choisir le "métal départ".

Selon les entreprises, ces préparateurs peuvent adopter des méthodes de travail différentes. On rencontre trois types de situation :

1) La gestion de bibliothèque de gammes

Les gammes de toutes les commandes passées sont systématiquement archivées dans une bibliothèque de gammes. Quand une nouvelle commande arrive, il faut d'abord déterminer si cette commande a déjà été traitée dans le passé. Si tel est le cas, il suffit de ressortir la gamme correspondante. Sinon, le préparateur recherche la gamme la plus proche possible, et l'adapte.

Si le nombre de commandes différentes augmente de façon importante, cette méthode peut conduire à des bibliothèques de gammes extrêmement volumineuses dont la gestion et la tenue à jour deviennent problématiques.

2) L'habillage de gammes types

Pour chaque famille de produits, une gamme type décrit les étapes essentielles. Dès qu'une commande parvient aux préparateurs, ils la rattachent à une famille et ils complètent (ou habillent) la gamme type correspondante. Cependant, il n'est pas toujours possible de dégager des gammes types capables de rendre compte de façon assez précise de la diversité des commandes. Cette diversité risque alors d'imposer de choisir entre la multiplication des gammes types et l'augmentation du travail d'habillage, qui peut tendre vers l'élaboration complète d'une nouvelle gamme à chaque fois.

3) La génération automatique des gammes

Un autre parti consiste à reconstruire complètement la gamme, pour chaque produit à traiter, à partir du savoir-faire des préparateurs. La formalisation de ce savoir-faire et son introduction dans un programme informatique ouvrent la voie à l'automatisation de ces tâches d'élaboration. Cependant, malgré de nombreuses tentatives, les projets d'informatisation se sont heurtés à de grosses difficultés et n'ont donné lieu qu'à des applications assez limitées. Les systèmes-experts, par leur faculté de représenter le savoir-faire des préparateurs sous forme de règles, sont rapidement apparus comme prometteurs pour ce type de problèmes.

1.3 L'émergence du projet : les objectifs visés

C'est ce type d'approche qu'a choisi de retenir le CLAL. Plusieurs objectifs ont été assignés au projet et justifient ce choix :

- faire face à une diversité croissante et à des produits de plus en plus évolutifs, en évitant de gérer des bibliothèques de gammes trop volumineuses.
- formaliser des savoir-faire sous forme de règles, pour permettre de construire les gammes, et en particulier celles de produits nouveaux qui n'appartiennent pas à l'expérience de l'atelier.
- permettre de mettre à jour ces savoir-faire, les rendre homogènes et

facilement transmissibles.

Cependant les raisons fondamentales du projet sont à rechercher plutôt dans un niveau plus général de préoccupation dans l'entreprise :

- le resserrement des contraintes économiques : internationalisation des marchés, vivacité de la concurrence, augmentation des exigences de qualité, explosion de la variété des produits.
- la nouvelle importance de la fabrication et la nécessité d'accroître la maîtrise technique : devant l'augmentation du prix des métaux précieux, les clients du CLAL cherchent à limiter au maximum les quantités de métaux mises en oeuvre, ce qui se traduit par des contraintes de fabrication supplémentaires. Ainsi, l'épaisseur de la bande de métal précieux dans les multimétalliques utilisés dans l'électronique s'est réduite d'une façon très importante.

Par ailleurs, les clients industriels représentent une part croissante de l'activité, devant les clients traditionnels que sont les métiers d'art. L'adaptation aux modifications de cet environnement pose avec acuité aux responsables de l'entreprise la question de la transformation accélérée d'une industrie ancienne, faisant appel à des techniques, des machines, des méthodes de gestion relativement stabilisées.

Plusieurs projets sont d'ailleurs déjà engagés dans cette direction . Ainsi, l'atelier de microprofilé a été conçu récemment ; il s'agit d'une salle blanche, où les machines ont été mises en ligne. Un autre projet d'envergure consiste en la refonte du système de gestion de production et à son informatisation. Cependant, les progiciels de gestion de production ne s'appliquant pas à ce type d'industrie, un système spécifique devra être progressivement bâti. La première étape choisie est précisément l'élaboration et la gestion des gammes. Ce module servira de coeur à la gestion de production ; sur lui viendront s'appuyer les autres fonctions.

II. LA NOTION DE GAMME ET SA PLACE DANS LES INDUSTRIES DE TRANSFORMATION

Avant d'aborder la description du système-expert réalisé et les étapes du déroulement du projet, nous allons revenir sur la notion de gamme, en la précisant à l'aide d'un exemple simplifié. Cet exemple nous permettra d'explicitier le type d'informations mis en jeu par une gamme, et de montrer la nature des raisonnements mis en oeuvre pour la bâtir. Ensuite, nous évoquerons quelques difficultés associées à la notion même de gamme.

II.1 Un exemple de gamme

Partons d'un exemple simplifié : supposons que l'on souhaite fabriquer 10 kg d'une bande de 11 mm de large sur 0,41 mm d'épaisseur dans un alliage à forte teneur en argent. La figure 1 donne la gamme de fabrication qui pourrait être transmise à l'atelier. Sur ce document on trouve d'abord une description assez complète du produit et de la commande : famille de produit concernée (ici bande), dimensions (largeur et épaisseur), ainsi que les tolérances sur ces dimensions, la nature de l'alliage, les caractéristiques métallurgiques, les quantités commandées, les quantités à lancer, le nom du client, le n° de commande et le délai accepté.

La deuxième partie du document donne la succession des opérations. Tout d'abord, elle précise le métal de départ, ici on va prélever une ébauche de 2,5 mm d'épaisseur. En effet, pour éviter d'avoir à partir d'un lingot complet, des stocks intermédiaires d'ébauches à certaines épaisseurs clés sont constitués pour les alliages les plus courants.

La première opération métallurgique consiste en un laminage, ici, jusqu'à l'épaisseur définitive. La gamme précise la machine qui doit être utilisée mais elle indique des alternatives techniquement possibles. En sortie du laminage on dégrossit le métal avant de le découper à la longueur à l'aide de la cisaille ; ici, 5 bandes sont prélevées dans la tôle qui a été laminée.

Une opération de recuit permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques désirées. Enfin, avant d'être emballée, la commande subit un contrôle.

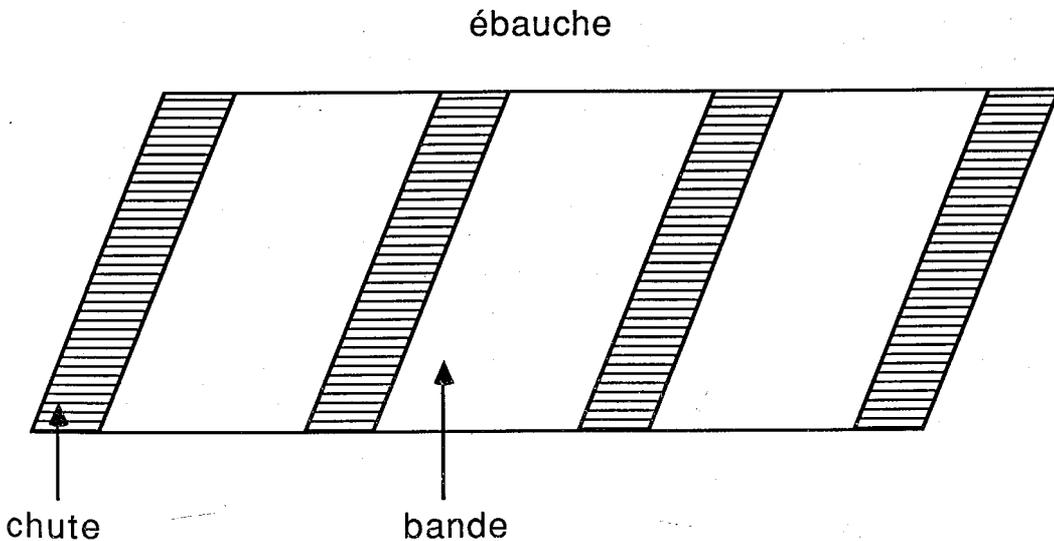
II.2.1 Choix du métal "départ"

Au départ, on connaît la séquence type des opérations pour fabriquer une bande : laminage, cisailage, recuit ; on sait également qu'on risque d'avoir à réaliser plusieurs opérations de laminage, sur des laminoirs différents, si l'écart entre l'épaisseur du métal départ et celle du produit final est trop importante. C'est pourquoi on va partir d'une ébauche à 2,5 mm à 0,41 mm d'épaisseur sur le même laminoir en réalisant plusieurs passes.

Quelles vont être les dimensions de l'ébauche :

Les ébauches sont disponibles en plusieurs largeurs standard (correspondant aux fractionnements possibles d'un lingot ramené à cette épaisseur). Dans chaque largeur possible, on cherche à inscrire le maximum de bandes à la largeur finale, en tenant compte du métal perdu sur les bords, du fait du laminage, et entre les bords, du fait du cisailage.

On choisit la largeur qui permet de minimiser les chutes et le métal perdu.



Ici la largeur retenue est de 75 mm, ce qui permet de tirer 5 levées. Il ne reste plus qu'à déterminer la longueur de l'ébauche pour obtenir 10 kg de bande en tenant compte des pertes de matière à chaque étape. On applique pour faire le calcul un coefficient de "mise au mille".

Nous avons donc entièrement déterminé le métal "départ".

II.2.2 Le choix des machines : laminoir, cisaille et four

Nous avons dit qu'il est possible de réduire l'épaisseur de 2,5 mm à 0,41 mm sur le même laminoir en effectuant plusieurs passes. Pour éviter d'avoir à réengager le métal à chaque passe, ce qui nécessite une opération supplémentaire et se traduit par une perte de métal, on peut penser à utiliser un laminoir réversible ; c'est pourquoi la gamme propose d'abord le laminoir 6 cylindres, mais elle indique également deux autres laminoirs qui pourraient être utilisés, bien qu'ils ne possèdent pas cet avantage technique.

Pour la cisaille, le choix se porte naturellement sur une cisaille équipée de 5 couteaux, qui va pouvoir découper les bandes en une seule opération.

Le choix du four est guidé quant à lui par les dimensions de la bande ; l'état métallurgique n'étant pas précisé, il n'est pas nécessaire de prévoir un traitement dans des conditions particulières (atmosphère contrôlée, ect.).

Finalement, il s'agit toujours d'exprimer des contraintes liées à la réalisation du produit, et de les comparer aux possibilités des machines appartenant au parc susceptible de mener l'opération.

Cet exemple nous a permis de nous familiariser avec la notion de gamme et de mieux comprendre la nature des raisonnements mis en oeuvre pour l'élaborer ; examinons maintenant quelques difficultés associées au concept même de gamme.

II.3 Les difficultés liées à la notion même de gamme et les choix initiaux d'orientation pour le système-expert

Plusieurs éléments concourent à rendre complexes la gestion et l'élaboration des gammes. Nous en avons déjà évoqué certains qui tiennent à l'activité : diversité des commandes et abondance des gammes à gérer, mais il y en a d'autres, intrinsèques, quant à eux, à la notion de gamme. Nous allons les examiner maintenant, et dégager pour chacun les orientations retenues au départ du projet.

II.3.1 Les gammes dépendent de plusieurs variables

Nous avons vu à quel point la gamme résultait de la combinaison de variables nombreuses. Son élaboration mobilise des savoirs multiples. Ceux-ci, dans une entreprise ancienne comme le CLAL, sont souvent peu formalisés. Ils sont détenus par les préparateurs et la maîtrise d'atelier, qui les a progressivement acquis à force d'expérience.

Une conséquence de cette combinatoire complexe est qu'il n'existe pas à proprement parler de gammes "optimisées". Dans chaque cas plusieurs gammes pourraient théoriquement être écrites, offrant alors la possibilité de choisir la meilleure (quel que soit, d'ailleurs, le sens que l'on donne à "meilleur", selon le point de vue économique ou celui de la qualité, par exemple). Cependant, en pratique, une seule gamme est généralement élaborée. Nous verrons que ce choix a été retenu au niveau du système-expert : il ne cherchera pas à trouver la gamme optimale, mais il s'arrêtera dès qu'il aura trouvé une gamme compatible avec la plupart des contraintes. Signalons, toutefois, certaines tentatives, prometteuses, d'élaboration à l'aide de système-expert de gammes optimisées, dans le domaine de l'usinage (*).

II.3.2 Le choix de la finesse de description

Une seconde difficulté réside dans le partage des rôles, introduit par la gamme et son contenu, entre la préparation et l'exploitation. Cette question recouvre en fait deux aspects :

- le partage entre savoirs techniques et savoir-faire de fabrication

Quel degré de détail doit fournir la gamme ? Doit-elle décrire les modes opératoires ou préciser les tours de main ? La solution qui existait au CLAL consistait à laisser une marge de manoeuvre importante à l'atelier.

(*) voir en particulier JP. TSANG

Planification par combinaison de plans. Application à la génération de gammes d'usinage.

Thèse INPG - 1987.

Par exemple, la détermination du nombre de passes (ici, les réductions successives d'épaisseur) au cours d'une opération de laminage, ainsi que les réglages de la machine, sont laissés à l'appréciation de l'opérateur. De même, les consignes ne sont mentionnées que par exception, quand elles diffèrent des pratiques habituelles, pour attirer l'attention de l'opérateur sur un traitement spécifique.

- le partage des décisions et des choix

La question du choix de la machine illustre bien le problème. Le préparateur, au vu des caractéristiques de la commande, identifiera la machine la plus adaptée et la plus performante pour réaliser l'opération.

Le choix du contremaître d'atelier risque d'être différent, car il a en fait à optimiser la réalisation d'un programme de travail qui lui est fourni, avec des moyens donnés en hommes et en machines, en tenant compte des événements de toutes sortes qui peuvent survenir. Il peut donc être amené à préférer réaliser l'opération sur un autre laminoir, même s'il semble moins performant par rapport à la commande, particulièrement si ce choix lui permet, globalement, une meilleure utilisation de ses ressources.

Au départ, le système-expert devait, en principe, respecter les pratiques en vigueur, et ne pas modifier fondamentalement l'équilibre entre les préparateurs et les contremaîtres d'atelier.

II.3.3 Les choix économiques implicites

Si nous avons vu qu'il était difficile de donner un sens à la notion de gamme "économique", plusieurs choix économiques importants sont néanmoins faits implicitement au cours de l'élaboration d'une gamme.

On pense tout de suite, bien sûr, au choix de la machine la plus performante ou à la détermination de la mise au mille minimale. Nous ne reviendrons pas, à ce niveau, sur ces deux aspects, qui ont déjà été évoqués, mais nous en présenterons un troisième ; il s'agit du choix du métal-départ.

Il arrive très souvent qu'une fraction de billette ou de lingot suffise pour réaliser une commande. Un même lingot sert alors à élaborer plusieurs commandes différentes (les nomenclatures de ce type d'industries sont dites divergentes). Or il n'est pas possible de débiter dès le départ un lingot en tronçons correspondant à chaque commande ; il faut au minimum faire une

opération de dégrossi. Mais, même à ce niveau, les quantités qui correspondraient à chaque commande pourraient avoir des dimensions trop petites pour être travaillées séparément ; de plus, cette séparation conduirait à augmenter la mise au mille (à chaque engagement dans un laminoir, la bande initiale est perdue). Pour éviter ce phénomène, on cherche à faire subir au métal le maximum d'opérations communes sans distinguer les commandes. Des stratégies de groupage des commandes sont mises en oeuvre pour constituer des lots.

Par ailleurs, les gammes longues et comportant beaucoup d'opérations se traduisent par des temps de fabrication importants. Pour tenter de réduire ces délais, une idée consiste à chercher à démarrer la transformation à une étape intermédiaire plutôt qu'à partir d'un lingot. Certaines épaisseurs clés ont été déterminées, des demi-produits à ces niveaux d'épaisseurs ont été stockés. Pour chaque commande, il faut s'efforcer, autant que faire se peut, de partir d'une ébauche provenant d'un de ces stocks intermédiaires, plutôt que d'un lingot.

Le système-expert devait permettre d'améliorer la prise en compte de ces choix économiques, en les optimisant localement par l'intermédiaire du savoir-faire modelisé dans le système.

III. TOTEM. L'OUTIL SYSTEME-EXPERT DE GENERATION DES GAMMES

Pour construire automatiquement ses gammes, le CLAL s'est tourné vers le logiciel TOTEM (Traitement Optimisé des Temps et des Matières), développé par la société MWM. Il s'agit d'un système-expert dont les principes sont relativement classiques : le problème à étudier est soumis au système sous forme de données ou faits (on transmet au système une description des caractéristiques de la commande). En fonction de ces faits, un mécanisme d'exploitation (le moteur d'inférence) choisit et mobilise dans la base de connaissances celles qui peuvent être utiles à la résolution.

La base de connaissances regroupe l'ensemble des savoir-faire requis pour construire la gamme de toutes les commandes qui peuvent se présenter. Ces savoir-faire sont modelisés sous forme de règles qui indiquent qui si certaines conditions sont remplies (c'est-à-dire si certains faits sont connus du système), alors on peut en déduire de nouveaux faits.

A partir d'un fait connu au départ, le moteur d'inférence détecte une règle activable (le fait correspond à la condition à remplir) et déduit un fait nouveau par l'application de la règle. Ce nouveau fait, à son tour, va permettre d'activer

de nouvelles règles, et de déduire de nouveaux faits. Le raisonnement se propage ainsi par des déductions en chaîne jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'enrichir l'ensemble des faits déjà connus en appliquant de nouvelles règles. Le système s'arrête alors et les résultats produits viennent alimenter les documents de fabrication, en l'occurrence les gammes.

Nous allons maintenant préciser quelque peu cette description de TOTEM en dégageant plusieurs caractéristiques du système et de son fonctionnement qui auront, comme nous le verrons, un effet important sur le déroulement et le contenu du projet.

III.1 Au départ une coquille vide, dotée d'un formalisme de représentation des connaissances

Comme tous les "shells" de système-experts, TOTEM n'est au départ qu'une structure vide. Avant de pouvoir utiliser le système, il faut formaliser le savoir-faire et écrire les règles qui viendront alimenter la base de connaissances.

Pendant, cette formalisation du savoir-faire doit être cohérente avec la structure prévue dans le système-expert. Il s'agit d'abord, bien sûr, des types de description des objets autorisés par le système, et les modes de représentation des connaissances offerts par celui-ci, mais également des principes d'organisation et de structuration des connaissances, ainsi que des mécanismes de raisonnement.

Ainsi, les règles vont traduire les relations qui existent entre les éléments manipulés pour construire une gamme. Certaines vont exprimer la transformation de l'une des caractéristiques du produit au cours d'une étape de la gamme ; par exemple, la relation entre la variation d'épaisseur et la variation des autres dimensions au cours d'une opération de laminage, ou bien le calcul de la mise au mille. D'autres guideront le choix des opérations à réaliser, ou bien celui des machines les mieux adaptées, et préciseront le réglage de la machine qui permettra d'obtenir telle caractéristique souhaitée. On voit que ces règles modélisent des connaissances de natures diverses : formules de calcul d'un paramètre, choix d'opération ou de machine ..., et pourtant elles utiliseront toutes la même syntaxe : "si...alors...". La partie "si..." indique les conditions qui, si elles sont remplies, permettront d'appliquer la deuxième partie de la règle. S'il s'agit de choisir une machine, on aura pour chaque machine du parc une règle dont les conditions définiront le domaine d'usage possible de la machine (plage d'épaisseur, largeur admissible, ect...). Pour l'évaluation d'un paramètre, la partie condition exprimera simplement qu'on ne connaît pas la

valeur du paramètre, et la partie action donnera la formule qui permettra de le calculer.

Exemple de règle:

SI le métal ne doit pas être écroui après laminage
ALORS faire un recuit métallurgique dans un four

SI au cours du laminage l'épaisseur passe de E1 à E2
ALORS la longueur de la planche passe de L1 à L2

$$L2 = L1 * E2 / E1$$

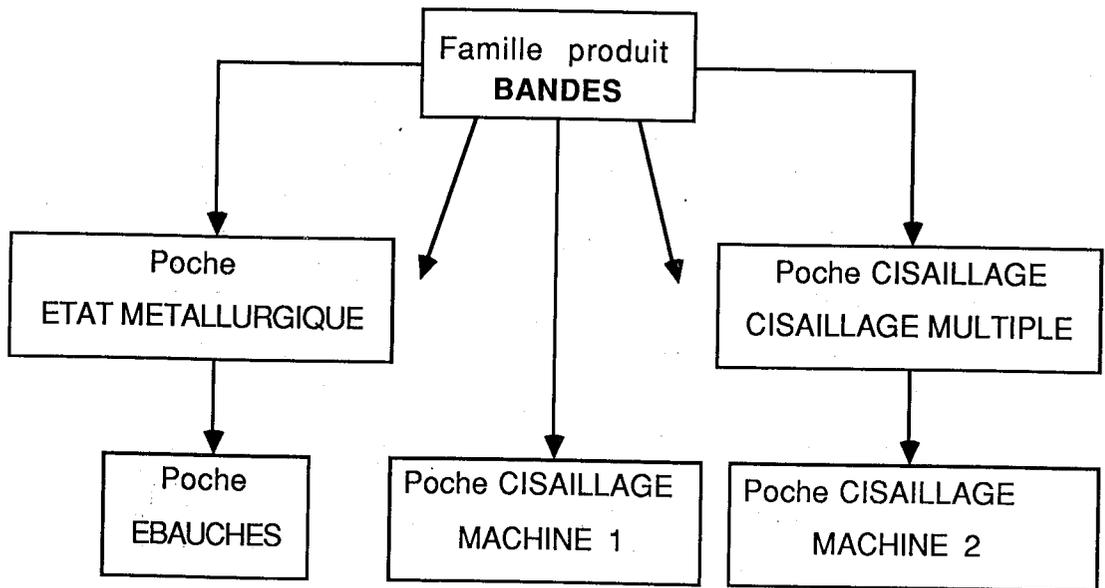
Cette représentation conduit à une formalisation extrêmement atomisée de la connaissance. Ce qui correspond d'ailleurs assez bien à la manière dont les préparateurs expriment leurs connaissances lorsqu'on les interroge. De plus, pour favoriser la lisibilité des règles et leur aptitude à s'appliquer dans de nombreuses situations, (donc pour éviter les réécritures partielles), les promoteurs du système ont limité le nombre de conditions dans chaque règle, et ils n'ont pas hésité à introduire des intermédiaires de calcul dans les formules, pour qu'elles soient moins longues et plus compréhensibles.

Ces choix, combinés à l'abondance intrinsèque des connaissances et des situations à envisager, obligeront à formaliser un nombre impressionnant de règles. On en dénombre plusieurs milliers dans l'application du CLAL.

III. 2 Un système capable de prendre en compte des savoir-faire volumineux

La multiplication du nombre de règles pouvait faire courir un risque aux performances du système. Le système devait-il à chaque étape balayer l'ensemble des règles pour choisir celle qu'il allait appliquer ? Pour éviter cet handicap la base de connaissances a été profondément structurée ; à un premier niveau en distinguant des bases de connaissances selon les familles de produits, en effet, les savoirs mobilisés sont très différents d'une famille à l'autre ; puis en éclatant les connaissances, pour une famille de produits donnée, en poches de savoir-faire, qui permettent chacune de traiter un aspect du problème. Par exemple poche des connaissances relative au choix d'une machine de laminage, poche pour le choix d'une ébauche, ou encore des traitements nécessaires pour obtenir un état métallurgique. Mais ces différentes poches ne sont évidemment pas totalement indépendantes les unes des autres, elles sont organisées en

hiérarchies qui permettent de passer de l'une à l'autre. La figure ci-contre donne l'organisation d'une partie des poches de savoir-faire pour la famille des bandes.



Exemple de structuration de la base de connaissance pour une famille de produits, les bandes

Remarquons que l'introduction d'un ordre dans la base de connaissances induit une limitation ou plus exactement un gauchissement par rapport aux principes initiaux des systèmes-experts, où les connaissances étaient sensées pouvoir être écrites en vrac, dans n'importe quel ordre, à charge au système lui-même de détecter à chaque étape du raisonnement les règles qu'il était possible d'appliquer. Cependant ce principe est rarement respecté, et l'on retrouve souvent une partition de la base de connaissances qui permet au système de ne travailler à chaque moment que sur un nombre relativement réduit de règles, parmi lesquelles il est sûr de trouver la règle utile si elle existe, ce qui rend inutile une recherche plus large.

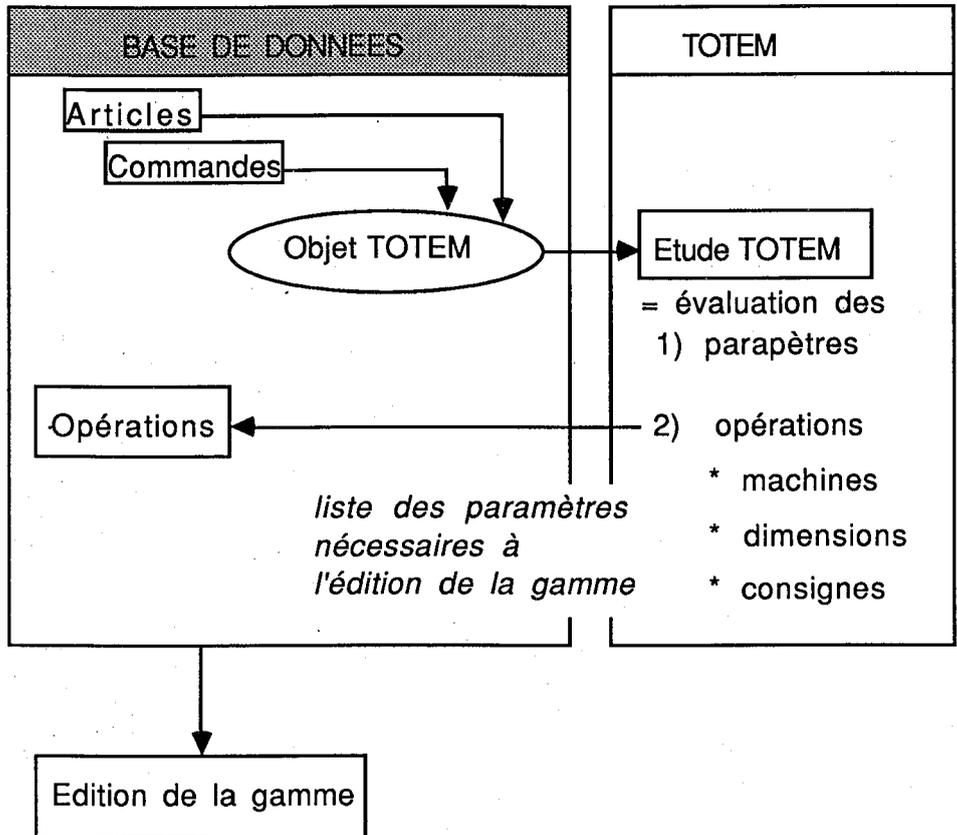
Un deuxième objectif de cette structuration consiste à rendre plus aisées l'élaboration et la maintenance des savoir-faire. Elle facilite le repérage d'une règle dont on sait qu'elle se trouve à l'intérieur de telle poche de savoir-faire. Elle regroupe dans une même poche un ensemble de savoir-faire homogènes et il est plus simple de s'assurer que toutes les situations possibles ont été envisagées. De plus, l'organisation de ces différentes poches esquisse un macro raisonnement relativement lisible, correspondant aux étapes d'élaboration d'une gamme, même si, nous le verrons, le système ne raisonne pas tout à fait de cette façon.

III. 3 Cependant, TOTEM ne manipule pas de gammes...

A ce niveau il est important de remarquer que le système-expert TOTEM ne manipule pas de gammes ; il n'en construit même pas, à proprement parler. En fait, il se contente d'évaluer des paramètres, au moyen de règles introduites dans les différentes poches de savoir-faire. Ces paramètres viennent ensuite habiller une gamme type par famille de produit.

Le schéma suivant précise l'architecture du système. A côté du système-expert on trouve un gestionnaire de base de données. Les caractéristiques de chaque nouvelle commande sont saisies et viennent alimenter des fichiers "articles" et "commandes" de ce premier module. Ces informations servent à construire un identifiant TOTEM, c'est-à-dire la description du problème qui va être transmis à TOTEM sous forme de la liste des principales caractéristiques. Pour une bande, par exemple, on aura la quantité à fabriquer, la spécification, le n° de plan, l'épaisseur, l'état, la dureté, le conditionnement, les tolérances sur la largeur et l'épaisseur, la longueur mini et maxi si le produit est livré à plat... D'autre part, elles permettent d'identifier la famille de produits concernée et d'orienter vers la poche de savoir-faire correspondante dans TOTEM.

ARCHITECTURE DU GENERATEUR DE GAMMES



Toutes les commandes reçues pendant une période donnée sont envoyées sous cette forme à TOTEM. Le traitement réalisé par TOTEM consiste à évaluer tous les paramètres possibles, grâce aux règles, et en particulier ceux qui décrivent les opérations, les machines, les dimensions et les consignes associées. TOTEM arrête son travail quand il ne lui est plus possible d'évaluer de nouveaux paramètres (*). Les paramètres utiles pour éditer la gamme sont envoyés vers le gestionnaire de données et viennent alimenter les fichiers commandes et opérations. Enfin la gamme est éditée à partir des informations contenues dans ces fichiers.

III. 4 ... mais il évalue des paramètres

Comment et dans quel ordre TOTEM va-t-il évaluer les paramètres ? L'évaluation des paramètres poursuit deux objectifs : d'une part enrichir la description du produit (par exemple la quantité à lancer est déduite de la quantité à fabriquer et de la mise au mille), et d'autre part la sélection et la description des opérations avec les machines associées, les dimensions et les consignes.

Pour déduire un nouveau paramètre, TOTEM utilise à la fois une règle et des paramètres déjà évalués ; on distingue les paramètres explicites (c'est-à-dire les données du problème) des paramètres implicites (ceux déduits par TOTEM).

Son objectif principal est de choisir et de décrire les opérations, cependant, pour gagner du temps, il va balayer tous les paramètres implicites et évaluer ceux pour lesquels il a les informations, avant d'essayer de choisir les opérations. En effet, il n'aurait pas au départ tous les éléments pour déterminer, par exemple, les dimensions et les consignes ; il est donc plus rapide pour le système de chercher à enrichir d'abord les faits qu'il connaît. Une fois qu'il a évalué tous les paramètres possibles concernant les opérations, il engage une deuxième itération et cherche à évaluer de nouveaux caractères implicites (si par exemple une opération de laminage a été retenue, il va pouvoir évaluer le coefficient partiel de mise au mille relatif à cette opération).

(*) TOTEM évalue pour chaque gamme entre 500 et 1 000 paramètres.

IV. LA DEMARCHE D'ELABORATION ET DE MISE EN OEUVRE DE TOTEM

Nous allons maintenant présenter les traits marquants du déroulement du projet avant de nous arrêter à l'étape essentielle de formalisation, pour analyser la nature des difficultés qui ont pu être rencontrées, puis nous décrirons la mise en oeuvre du système et les conditions d'intégration, enfin nous tenterons une première évaluation du projet dans son état actuel.

IV.1.1 La nomination d'un chef de projet investi d'une mission étendue

En 1987, quand les responsables décident d'engager une profonde refonte de la gestion de production, ils choisissent de créer un poste pour un responsable en dehors de la hiérarchie de l'usine, mais directement rattaché au directeur technique de l'usine, en lui confiant la mission de réfléchir à un schéma cohérent de réorganisation de la gestion de production, et de mettre en oeuvre les premières étapes, en particulier la génération automatique des gammes. L'ingénieur embauché sur ce poste a un profil particulièrement adapté. En effet, pendant plusieurs années, il a dirigé un important atelier de transformation métallurgique; il connaît donc bien le métier, même s'il lui reste à acquérir les connaissances spécifiques relatives aux métaux précieux. Mais surtout, il a déjà eu l'occasion de mettre en oeuvre TOTEM, pour élaborer les gammes de l'atelier dont il était responsable. Cette expérience jugée particulièrement précieuse a été déterminante pour le choix du système.

IV.1.2 Une stratégie d'élaboration et de diffusion prudente et progressive

La notion de poche de savoir-faire et la structuration de la connaissance ont été utilisées pour promouvoir un développement pas à pas. En effet, il a été possible de commencer à travailler sur une seule famille de produit en bâtissant progressivement les poches de savoir-faire correspondantes. Cette démarche offrait l'avantage d'obtenir rapidement les premières gammes avec le système-expert. Ces gammes, certes rudimentaires, permettaient néanmoins de donner une certaine consistance à l'outil, afin de favoriser les débats autour de son élaboration et de son usage, pour le faire mieux comprendre et accepter dans l'usine, et de concrétiser les résultats que l'on pouvait en attendre.

Enfin cette démarche a permis de familiariser plus rapidement les utilisateurs avec leur futur instrument, en leur faisant mieux sentir le raisonnement ou au

avec leur futur instrument, en leur faisant mieux sentir le raisonnement ou au moins le fonctionnement du système.

Une deuxième phase d'approfondissement et de raffinement des bases de connaissances pouvait alors s'engager sur cette première famille de produit, alors qu'en parallèle l'extension à une deuxième famille de produit était mise en oeuvre.

IV.1.3 L'implication précoce des futurs utilisateurs

Un autre trait caractéristique du projet réside dans l'implication des préparateurs. Dans l'esprit des promoteurs du système, il s'agissait de bâtir un outil visant à aider les préparateurs dans leur travail, et les utilisateurs eux-mêmes devaient prendre une part active à son élaboration. Un des attraits des systèmes-experts souvent mis en avant est qu'ils offrent la possibilité à l'expert de réaliser lui-même la formalisation de sa connaissance et d'aboutir à un outil "à sa main", bien adapté aux questions qu'il se pose et aux usages qu'il souhaite en faire. Cette vision était renforcée, au départ, par l'expérience antérieure acquise par le chef de projet, où les préparateurs avaient largement contribué à formaliser les connaissances, leur maîtrise du système ayant augmenté au cours du projet jusqu'à leur permettre d'assurer seuls la maintenance et l'évolution du savoir inclu dans le système.

Deux raisons principales militaient donc pour associer rapidement les préparateurs concernés au projet : d'une part, il n'était pas imaginable que le recueil, la formalisation et l'écriture des connaissances puissent se faire en l'absence des experts de l'entreprise en matière de gammes, d'autre part, la contribution active de ceux-ci à l'élaboration du système était gage d'une meilleure appropriation de l'outil.

IV.1.4 Les premières gammes obtenues au prix d'un travail considérable

Le travail de modélisation a commencé par une famille de produits de l'atelier de laminage : les bandes. Ce choix a été guidé par la relative simplicité technique de ces produits (séquences opératoires bien définies et répétitives, choix des machines relativement clair...).

Les préparateurs du secteur concerné, tout en continuant d'assurer leurs tâches opérationnelles, ont participé à de nombreuses réunions de travail avec le chef de projet, pour mettre au jour et expliciter le savoir nécessaire pour construire les gammes des "bandes", pour le formaliser en se conformant à la

logique du système, pour écrire et organiser cette masse importante de connaissances. Ce travail a également été l'occasion de discussions avec les contremaîtres d'atelier pour confronter le savoir-faire des préparateurs avec les pratiques et l'expérience de l'atelier.

Neuf mois de travail ont permis de doter le système d'une connaissance suffisante pour qu'il puisse construire les premières gammes. Ce délai a pu être jugé trop important par certains responsables de l'entreprise ; il peut s'expliquer, comme nous le verrons, par un certain nombre de difficultés, pour certaines inattendues, rencontrées au cours de l'étape de formalisation des connaissances.

IV.2 La formalisation du savoir-faire : une étape riche d'enseignements

La phase de formalisation des connaissances mérite une attention particulière : d'une part, c'est l'étape essentielle du processus d'élaboration du système-expert, d'autre part, c'est celle qui a pris le plus de temps et d'énergie pour surmonter les obstacles qui ont pu se présenter.

IV.2.1 Les difficultés de la formalisation : comment transformer l'expérience en lois

IV.2.1.1 L'absence de formalisation préalable : transfert ou explicitation

Comment expliquer que l'étape de formalisation se soit déroulée sur une période plus longue que prévue ? D'autant plus que cette prévision initiale s'appuyait sur l'expérience similaire menée par le chef de projet dans un autre atelier. On pouvait espérer disposer avec cette expérience d'une solide référence. Or, plusieurs différences importantes apparues progressivement entre ces deux situations industrielles, permettent d'expliquer ce décalage.

Le premier élément concerne le degré de formalisation préalable des connaissances, au moment du démarrage du projet. Au CLAL, il existait peu de documents écrits précisant les règles de l'art en matière de technique ou décrivant les procédures d'élaboration des gammes. L'essentiel des connaissances était détenu de façon informelle par les préparateurs, les techniciens et les agents de maîtrise de l'atelier. Cette absence de supports sur lesquels les connaissances auraient été consignées imposa une étape d'explicitation de celles-ci.

Au contraire, dans l'autre entreprise, la formalisation des connaissances a pu

s'appuyer sur de nombreux documents décrivant avec précision le choix des opérations de gamme, celui des machines, les modes opératoires... ce qui a permis un gain de temps précieux. Ces documents existaient du fait des relations contractuelles d'assurance-qualité qui liaient l'entreprise à ses principaux clients dans le domaine de l'aéronautique. En effet l'assurance qualité prévoit de contrôler la maîtrise du processus de production par le biais de sa description formalisée et de celle des relations entre les résultats recherchés (caractéristiques mécaniques ou métallurgiques) et le réglage ou le choix des machines.

Signalons à ce propos que ce travail très important de formalisation portait la marque des nombreux ingénieurs "méthodes" qui ont pour mission d'améliorer les techniques de fabrication, et de mettre au point les procédés de transformation des nouveaux alliages à hautes caractéristiques. Le CLAL ne disposait pas de tels moyens ; il y avait bien un bureau d'études, mais il n'était chargé que d'étudier les commandes nouvelles.

On conçoit donc que dans les deux cas évoqués la question de l'écriture des bases de connaissances se pose en des termes différents. Dans un cas, il s'agit d'un transfert d'une connaissance déjà largement modélisée et disponible sur un support facilement formalisable. Dans l'autre cas, tout l'effort d'explication et de modélisation des connaissances doit être entrepris avant d'alimenter le système.

Le second élément tient à un effet de taille. Au CLAL on ne trouve qu'un à deux préparateurs par secteur d'atelier, alors que dans l'autre entreprise il s'agissait d'équipes relativement étoffées et structurée (environ 20 personnes). Ces effectifs réduits ont limité la disponibilité des techniciens à l'égard du projet.

IV.2.1.2 Des difficultés d'abstraction

* Les raccourcis de l'expérience et le raisonnement pas à pas.

Les réunions de travail entre le chef de projet et les préparateurs ont rapidement mis en évidence la différence de démarche entre ces derniers et le système informatique. Les préparateurs cherchent à reconnaître dans tout nouveau problème des situations déjà connues auxquelles sont associées des réponses claires et immédiates. Le système suppose au contraire une décomposition du raisonnement en étapes élémentaires, (assez proche de celui que nous avons présenté pour introduire la notion de gamme), chaque étape pouvant être formulée indépendamment au moyen d'une règle.

Les préparateurs donnent l'impression d'opérer des courts-circuits dans leurs raisonnements : l'expérience accumulée les guide directement vers la solution, sans qu'ils aient à examiner la succession des étapes intermédiaires. La décomposition du raisonnement en étapes élémentaires n'avait donc pour eux rien de naturel. Le niveau adéquat de décomposition (c'est-à-dire en combien de règles élémentaires fallait-il décomposer un raisonnement) n'a pas été facile à déterminer, il a été l'occasion de nombreuses explications et discussions avec le chef de projet.

* Tirer des lois de l'expérience : un problème d'abstraction

Ce problème a été renforcé par la difficulté éprouvée par les préparateurs pour traduire leur expérience en lois générales (les règles du système-expert). Il ne s'agit plus d'utiliser leur savoir-faire pour répondre à un problème donné, mais d'exprimer à priori une connaissance capable de s'appliquer à toutes les situations d'un certain type qui peuvent se présenter. Là encore cet exercice d'abstraction n'a pu être mené à bien que grâce à une implication très soutenue du chef de projet.

* Articulation des connaissances : l'organisation en poches de savoir-faire

Enfin, cette décomposition du raisonnement en étapes élémentaires, ou des savoir-faire en règles autonomes, ne prend sens qu'au travers de l'articulation de ces connaissances. On rejoint là le problème évoqué ci-dessus. Combien faut-il prévoir de poches de savoir-faire et quelles relations existe-t-il entre elles ? Chacune d'elles doit-elle répondre à un type de question ? Comment s'assurer que toutes les connaissances qui pourraient être utiles ont bien été formalisées ? Autant de questions dont la réponse n'avait rien d'évident à priori.

Ajoutons que la connaissance de cette structuration du savoir en poches joue un rôle fondamental pour la compréhension du fonctionnement du système.

IV.2.1.3 Mise au point et maintenance des bases de connaissances : le souci de cohérence et de complétude

Deux questions classiquement posées par la construction de bases de connaissances sont d'une part la complétude, d'autre part la cohérence. S'interroger sur la complétude revient à se demander s'il ne peut y avoir des lacunes dans les connaissances modélisées qui conduiraient à l'interruption du raisonnement ou si certaines situations pourraient se présenter sans avoir été prévues. La recherche de la cohérence vise à s'assurer qu'il n'y a pas de règles

aux contenus contradictoires, ni de règles qui s'appelant l'une l'autre forment des boucles. Dans tous les cas la difficulté provient de la nécessité d'adopter une vision globale de la base de connaissance alors qu'elle a été bâtie incrémentalement par ajouts successifs et quasi-indépendants des règles.

Des outils ont été prévus pour aider l'utilisateur de TOTEM dans sa tâche de conception et de mise au point des poches de savoir-faire. Il s'agit principalement de la représentation arborescente des enchaînements de règles qui explicite tous les raisonnements possibles pour le système "autour" de l'utilisation d'une règle donnée.

Ainsi, si une erreur (*) est repérée dans une gamme produite par TOTEM, les résultats donnés par le système fournissent une aide précieuse pour repérer l'origine de cette erreur. Cependant leur manipulation n'est pas particulièrement aisée, il s'agit généralement d'épais listings combinant quelques centaines de règles.

IV.2.2 Le partage entre savoir-faire technique et savoir d'exploitation

IV.2.2.1 Préserver un équilibre satisfaisant entre préparateurs et fabrication

Nous avons vu que l'un des objectifs initiaux du projet était de ne pas modifier l'équilibre et la répartition des tâches entre les préparateurs et l'atelier. Ainsi pour les "bandes", la première famille de produits introduite dans TOTEM, le système-expert choisit, pour chaque opération, la machine techniquement la plus adaptée, mais indique également d'autres machines possibles, en laissant à l'atelier le choix définitif de la machine sur laquelle l'opération sera effectivement réalisée. Ce choix est dicté par des contraintes d'exploitation propres à l'atelier, qu'il n'est pas toujours possible de connaître à l'avance:

(*) Erreur doit ici être entendue au sens large : il peut s'agir d'un manquement aux règles de l'art qui rend la gamme inapplicable, ou simplement d'un décalage par rapport à la gamme qu'un préparateur aurait construite à la main.

Les gammes produites par TOTEM sont donc relativement proches de celles qui étaient auparavant construites à la main. Elles conservent le même degré de détail dans les descriptions (nombre et nature des étapes mentionnées, modes opératoires et consignes de postes...).

L'écriture du savoir-faire a néanmoins été l'occasion de certaines modifications et mises à jour que nous allons illustrer par quelques exemples significatifs :

* Le choix des épaisseurs et des dimensions des ébauches stockées

Nous avons montré l'intérêt d'une stratégie de demi-produit dans ce type d'industrie où les gammes de transformation comportent beaucoup d'étapes. Le système-expert va donc chercher à partir d'une ébauche, chaque fois que possible. Cette politique était déjà appliquée avant l'introduction du système ; elle va néanmoins être systématisée et rationalisée par son usage.

La détermination et la gestion de ces stocks d'ébauches ne vont pas sans difficultés : sous quelles formes et en quelles quantités a-t-on intérêt à les stocker ? L'écriture du savoir-faire a été l'occasion de préciser les épaisseurs judicieuses pour constituer ces stocks d'ébauches (les épaisseurs sont déduites des caractéristiques à la fois du parc de machines et des commandes, et les dimensions cherchent à optimiser le fractionnement d'un lingot ou d'une billette réduits à une épaisseur donnée).

* la mise à jour des consignes de postes

La gamme ne décrit en général pas le détail des modes opératoires pour réaliser une opération sur une machine, sauf dans les cas où il faut appliquer une démarche spécifique qui s'éloigne des manières de faire habituelles de l'atelier. Dans ce cas une consigne est indiquée sur la gamme pour rappeler cette opération ou cette précaution particulière. Au cours de la formalisation du savoir-faire, toutes les consignes ont été réexaminées avec les préparateurs et les contremaîtres d'atelier pour établir une liste à jour précisant les conditions d'application. Certaines d'entre elles ont été modifiées, voire supprimées, pour mieux tenir compte des pratiques et savoir-faire effectifs de l'atelier.

* Préciser la définition de certains concepts

Enfin, la définition de certains concepts a pu être précisée. C'est le cas de la tolérance, par exemple. Dans la gamme, les dimensions sont généralement accompagnées de leur tolérance (+ ou - tant de millimètres). Les préparateurs

avaient pris l'habitude de désigner les plus importantes du qualificatif d'impérative. Mais alors, quel sens donner à une tolérance qui n'est pas impérative ? Dans un souci de clarification, seule la notion de tolérance a été retenue dans TOTEM, et elle indique la plage de dimension qui doit être respectée. Les tolérances "indicatives" ne sont, par contre, plus mentionnées.

IV.2.2.2 Une distinction difficile à respecter

Cependant, le travail accompli sur d'autres familles de produits plus complexes a montré qu'il n'était pas toujours possible de respecter cette séparation entre préparation et fabrication, et de ménager l'autonomie de l'atelier par rapport à ses décisions d'exploitation.

Deux exemples montrent comment la recherche d'optimisation peut conduire à effectuer dès la préparation certains choix qui relevaient jusque là de l'atelier.

* L'optimisation de la mise au mille des planches

Une bande est caractérisée par son épaisseur et sa largeur. Pour définir une planche, il faut préciser en plus sa longueur. On rajoute une dimension, le raisonnement ne se fait plus en section mais en volume. Généralement une commande est composée de plusieurs planches identiques. Le problème consiste alors à agencer au mieux ces n planches dans une plaque d'épaisseur donnée et de définir la séquence opératoire qui minimise la mise au mille. Il s'agit d'un problème bien connu de recherche opérationnelle, dit du sac à dos, qui met en oeuvre de la programmation linéaire en nombres entiers.

La question est en fait encore un peu plus complexe, dans la mesure où on ne peut généralement pas conserver un lingot complet au cours de la transformation : il faut le fractionner (contraintes sur les dimensions maxima dans les fours de recuit, par exemple). Le choix des étapes de fractionnement aura bien sûr un effet sur la mise au mille, puisqu'il va conditionner la succession des dimensions ultérieures de chacune des tôles au cours de leurs transformations respectives. On conçoit dès lors que l'optimisation de la mise au mille, associée à la réalisation de ces planches, conduit à définir une séquence opératoire précise. Le choix du métal-départ respectant les dimensions données par la gamme ainsi que celui de la suite des opérations devient impératif, sous peine de risquer de ne pouvoir obtenir le nombre de planches prévues dans la commande. Les degrés de liberté de l'atelier en sont réduits d'autant.

* Le choix de la tréfileuse

Une difficulté traditionnelle de la tréfileuse résidait dans le choix d'une machine et de celui de la cascade des réductions successives des diamètres des filières. En effet, la combinatoire était importante, avec d'un côté un parc de 18 machines relativement polyvalentes et de l'autre côté de multiples séries de diamètres possibles. L'écriture des poches de savoir-faire a été l'occasion de clarifier le choix des machines en précisant les enjeux techniques sous-jacents. Une étude menée par le chef de projet et les responsables de l'atelier a permis de dégager des enchaînements de filières optimaux techniquement, et de spécialiser les machines afin d'éviter des changements d'outils pénalisants du fait qu'ils obligent à arrêter la machine entre deux commandes. Finalement la combinatoire a été largement réduite : un algorithme introduit dans TOTEM lui permet de choisir la succession des réductions de diamètres la plus adaptée, et donc la machine.

Cet exemple montre également les limites d'une attitude passive vis-à-vis de la connaissance, qui chercherait uniquement à transférer un savoir préexistant dans le cadre formalisé du système-expert, sans s'interroger sur la validité et l'efficacité de celle-ci. En fait il y a véritablement eu ici production de savoirs nouveaux, amélioration des connaissances techniques, réorganisation et rationalisation du travail de l'atelier.

IV.2.3 L'existence de savoir-faire généralisable : un critère judicieux de choix des applications

Un autre enseignement tiré de l'élaboration des premières bases de connaissances pour différentes familles de produits réside dans la mise en évidence d'un critère qui permet d'identifier les différentes familles de produits pour lesquelles l'utilisation de TOTEM est intéressante. Le savoir-faire manipulé pour construire une gamme est-il généralisable ? C'est-à-dire peut-on l'écrire sous forme de lois capables de s'appliquer à un nombre de situations relativement important ? Cette propriété dépend à la fois des technologies mises en oeuvre et de la nature des commandes traitées.

En effet, un premier examen des connaissances mobilisées dans l'atelier de platine, par exemple, a montré une très grande hétérogénéité des produits fabriqués, des technologies et des machines utilisées. L'activité est soit très spécifique, et fait alors appel à des machines spéciales (pour la fabrication des filières pour l'industrie du verre entre autres), soit conserve un caractère artisanal marqué, où le savoir-faire du compagnon d'atelier reste déterminant.

IV.3 Mise en oeuvre et condition d'intégration du système

En parallèle avec la mise au point de TOTEM sur une famille de produits, des terminaux informatiques ont été installés dans les bureaux des préparateurs concernés. Quand les gammes produites par TOTEM ont été jugées suffisamment précises et fiables, les préparateurs ont commencé à travailler en utilisant le système expert.

IV.3.1 L'usage du système-expert et le rôle des préparateurs

Le travail des préparateurs a été profondément modifié par l'introduction de TOTEM. Ils ne bâtissent plus les gammes, mais ils se contentent de traduire, éventuellement compléter, et saisir les informations relatives aux commandes qui arrivent pour alimenter TOTEM.

Ils réceptionnent le lendemain les gammes élaborées par le système. Ils les valident, avant de les communiquer à l'atelier. TOTEM édite, en même temps que la gamme, des bordereaux de contrôle et les feuilles de suivi de commandes, ce qui facilite d'autant la gestion administrative.

Cependant, plusieurs aspects fondamentaux du travail des préparateurs n'ont pas été intégrés à TOTEM, et nécessitent encore leur intervention. Il s'agit principalement du choix du métal départ, de la constitution des lots, et du groupage des commandes. En effet, TOTEM a besoin, pour fonctionner, qu'on lui indique le métal-départ et ses caractéristiques. Il revient au préparateur de choisir celui-ci. Il cherchera à partir d'une ébauche et précisera ses dimensions, en s'assurant qu'elle soit bien disponible en stock. Il pourra s'appuyer sur le travail accompli, en particulier au département argent, pour clarifier la gestion des ébauches à l'occasion de l'élaboration du système : redéfinition des épaisseurs et des dimensions, ainsi que des lieux de stockage.

Signalons qu'auparavant, les stocks d'ébauches étaient, pour des raisons de place, localisés en différents points de l'atelier, et souvent mélangés avec d'autres stocks et des en-cours. Leur visibilité était réduite, seuls les contremaîtres connaissaient avec précision leur contenu. Une première réorganisation a permis de les regrouper en partie et de les rendre plus facilement identifiables.

La deuxième opération de construction des lots et de groupage des commandes est en fait un préalable au choix du métal départ, puisqu'elle cherche à tirer parti de caractéristiques communes de certaines commandes, pour les traiter ensemble et limiter d'autant le nombre d'opérations à réaliser dans l'atelier.

Les commandes n'ont pas besoin d'être identiques pour appliquer cette stratégie: il suffit qu'elles aient des étapes de transformation en commun. Par exemple, on pourra partir de la même ébauche à 2,5 mm pour réaliser telle bande en 0,5 mm d'épaisseur, et telle autre à 0,2 mm dans le même alliage, si leurs largeurs sont compatibles ; ou encore, pour optimiser l'utilisation d'un lingot, on a intérêt à rechercher une combinaison de commandes dont le poids, mise au mille comprise, s'approche de celui du lingot de départ.

Ces stratégies de groupages et de lotissements n'ont rien d'évident, elles nécessitent une solide expérience des techniques métallurgiques ; elles vont pourtant prédéterminer dans une large mesure les performances de l'atelier.

Indiquons enfin que de nouvelles tâches pourront être confiées aux préparateurs: la gestion plus fine des temps opératoires (par exemple pour affiner les standards de temps utilisés pour établir les devis commerciaux), ou le suivi et la recherche d'amélioration des mises au mille.

Mais la mission des préparateurs est plus large que cela. Ils devront contribuer au maintien et à l'amélioration du savoir-faire de TOTEM. A ce niveau, la situation varie suivant les familles de produits et les préparateurs. Certains maîtrisent suffisamment l'outil informatique pour être relativement autonomes dans sa mise à jour. D'autres, par contre, ont encore besoin d'une assistance pour modifier les règles ou faire évoluer les poches de savoir-faire.

IV.3.2 L'émergence d'un nouvel acteur : l'ingénieur méthode préparation

S'il n'était pas imaginable que le système puisse être élaboré sans s'appuyer principalement sur l'expertise des préparateurs, il n'était pas non plus concevable qu'ils puissent mener seuls cette tâche à bien. Le chef de projet a joué un rôle clé à chaque étape du projet, qu'il s'agisse de l'explicitation du savoir-faire, de la traduction de l'expérience en lois générales, de l'apprentissage de la syntaxe d'écriture des règles et de la manipulation de l'outil informatique, ou des études menées avec les responsables, visant à améliorer un savoir avant de le formaliser, autant d'éléments que nous avons déjà évoqués, sans parler de tous les problèmes d'implantation informatique, ni des négociations de modification ou d'adaptation du logiciel, avec son contenu.

Les promoteurs du projet concevaient cette mission comme temporaire, durant approximativement le temps de réalisation de l'outil. Les préparateurs devaient, au cours du projet, acquérir une autonomie suffisante pour gérer seuls le système et prendre en charge les évolutions ultérieures. Nous avons vu

que cet objectif n'a pu être que partiellement atteint.

Dans ces conditions, il fallait trouver un acteur capable d'assumer ce rôle permanent d'assistance aux préparateurs. Il convenait d'ailleurs de réfléchir d'une façon plus précise aux missions qui pourraient être confiées à ce responsable afin de dégager le profil le plus adapté, d'autant plus que le chef de projet était appelé à prendre la responsabilité opérationnelle de l'un des départements de l'usine.

Un ingénieur, qui s'était vu confier auparavant des tâches d'organisation de la production, a été choisi. Il n'aura pas, comme le chef de projet, la mission de réfléchir à un nouveau système de gestion de la production ni de le mettre progressivement sur pied, mais il assurera plutôt une fonction d'ingénieur-méthode, tant pour la fabrication que pour les préparateurs.

Autant cette fonction est classique pour ce qui touche les problèmes de fabrication, autant elle est nouvelle pour la préparation. En effet, la préparation est déjà, en quelque sorte, en position de méthode par rapport à la fabrication, puisqu'elle lui fournit un guide pour réaliser les opérations de transformation. Avec la médiatisation, par le système-expert, des tâches intellectuelles accomplies par les préparateurs, apparaît la nécessité de proposer pour ces tâches le même type d'assistance et de rationalisation que pour celles effectuées par les opérateurs sur les machines de l'atelier. Ces deux types de tâches sont maintenant décrites de façon analogue.

IV. 4 Premiers éléments d'évaluation du projet

Deux années après le démarrage du projet, il est possible de dresser un premier bilan.

IV.4.1 La situation actuelle

TOTEM devrait finalement être utilisé dans trois ateliers : laminage argent, tréfilerie argent et or apprêté. Un générateur de gammes plus classique sera mis en oeuvre dans les autres ateliers. Il sert d'ores et déjà à établir quotidiennement les gammes sur une famille de produits de l'atelier de laminage argent : les bandes. Trois mille règles ont été écrites pour formaliser le savoir-faire correspondant. Les bases de connaissances pour les planches et la tréfilerie ont été construites. Les gammes produites sur ces familles de produits sont en cours de validation. Ces deux applications devraient très prochainement être utilisées de manière opérationnelle par les préparateurs concernés.

Les gammes élaborées par TOTEM sont jugées satisfaisantes aussi bien par les préparateurs que par l'atelier. Elles sont plus complètes, mais demeurent assez proches de celles que les préparateurs pouvaient établir à la main.

Signalons toutefois une réaction qui a suscité un débat : avec certaines combinaisons de produits il était possible de trouver, au prix d'un calcul très précautionneux, un meilleur bilan matière que celui proposé par TOTEM. Celui-ci prévoyait, par exemple, d'utiliser 4 lingots là où 3 auraient pu suffire. Ces situations sont malgré tout assez rares, elles indiquent cependant une possibilité d'améliorer l'optimisation locale du système.

Par ailleurs, il est encore peu tôt pour juger de l'effet produit par les gammes dans les ateliers. Par exemple, les modifications de consignes vont-elles changer les comportements ? Les conditions d'utilisation de fours de recuit seront-elles respectées ? Autant d'interrogations qui nécessitent un bouclage sur les pratiques de l'atelier pour valider ces consignes, les faire évoluer au cas où elles seraient inadaptées ou en expliquer le sens et l'intérêt aux opérateurs.

Le choix d'un développement prudent et progressif s'est révélé une bonne stratégie : il a permis de surmonter les difficultés de formalisation, tout en sensibilisant peu à peu l'ensemble de l'entreprise au nouvel outil.

Ces difficultés de formalisation ont entraîné des retards dans l'avancement du projet. Elles peuvent s'expliquer par l'absence de formalisation préalable du savoir-faire accumulé par les préparateurs à force d'expérience, par le caractère abstrait de la modélisation, par le volume du savoir-faire à mobiliser et par l'explicitation insuffisante du raisonnement du système. Une légère erreur a peut-être été commise en n'expliquant pas davantage le raisonnement de TOTEM aux préparateurs, en ne se limitant pas à la présentation de syntaxe des règles (si... alors...). Il aurait certainement été utile aussi d'insister sur la structuration de la connaissance en poches, et l'usage qui en était fait par le système.

Ces difficultés ont soulevé une question au cours du projet : qui va gérer la base de connaissances de TOTEM ? Une solution différente de celle prévue à l'origine devait finalement être trouvée, dans la mesure où l'autonomie des préparateurs par rapport au système et à ses évolutions n'était pas acquise dans tous les secteurs. Nous avons vu que l'idée d'un ingénieur méthode préparation s'est progressivement imposée. Cette évolution n'est pas surprenant : le système-expert peut être assimilé à une machine, et constitue un système

technique qu'il faut maintenir et gérer en tant que tel.

Finalement, on peut caractériser ce projet comme une opération d'automatisation restructurante.

IV.4.2 La part de l'économie dans le projet

Dès l'origine les préoccupations directement économiques n'ont pas joué un rôle déterminant dans le projet. En particulier, il ne s'agissait pas d'accomplir des gains de productivité immédiats en réduisant par exemple le nombre des préparateurs, d'autant plus qu'il n'y a généralement qu'un préparateur par atelier, sauf au laminage, où ils sont deux.

Les justifications de TOTEM sont à rechercher plutôt du côté d'une remise en forme du savoir-faire et de la facilité à le faire évoluer. Ainsi, par exemple, les propriétés nouvelles de l'alliage sont-elles directement répertoriables. Si l'on veut décaler la courbe d'érouissage il suffit de changer un point pour obtenir la nouvelle position du recuit du métal.

Enfin un objectif majeur était de bâtir un premier maillon sur lequel allaient pouvoir s'articuler les autres modules de la gestion de production.

IV.4.3 L'importance des retombées indirectes

Mais un tel projet ne peut pas s'évaluer uniquement par rapport aux objectifs initiaux qui lui avaient été assignés. Il s'accompagne fréquemment, en effet, de nombreux résultats inattendus dont il s'agit de tirer parti.

Le projet TOTEM a été riche de tels résultats :

- * la meilleure définition des ébauches et de leurs caractéristiques dimensionnelles, qui s'est accompagnée d'une réorganisation des points de stockage, permet un recours plus systématique aux demi-produits.
- * l'optimisation de la mise au mille pour les planches, et celle du parc des machineries pour la tréfilerie.
- * l'introduction de nouveaux concepts, qui ouvrent la voie à de nouvelles structurations et organisations. Ainsi la notion de "noeud de filiation" (étape clé de la gamme) est-elle reprise pour définir les étapes du suivi des commandes en cours de mise en place.

En guise de conclusion

Finalement, cette expérience de développement et de mise en oeuvre d'un système-expert nous conduit à remettre en cause un certain nombre d'hypothèses généralement associées à ce type de systèmes. Selon leurs promoteurs, un des attraits des SE réside dans leur capacité à imiter le raisonnement des experts. Il suffit de trouver un "bon" expert, de recueillir ses connaissances et de les déposer délicatement dans le système-expert pour pouvoir ensuite diffuser largement dans d'entreprise cette expertise.

Le projet TOTEM nous apprend au contraire que l'élaboration d'un système-expert nécessite un profond travail de transformation des connaissances. Explication, formalisation, mais aussi découverte de nouveaux concepts ou de nouvelles relations, élaboration de modèles, remise en cause de savoirs obsolètes, restructuration et rationalisation des savoirs sont autant de facettes de cet intense processus de connaissance qui mobilise, et ce n'est pas sa moindre originalité, une quantité inaccoutumée de matière grise autour des problèmes gérés habituellement par des acteurs "modestes" de l'organisation.

Cette caractéristique fondamentale a deux conséquences : le projet s'est déroulé sur une durée plus longue que prévue, mais les objectifs atteints sont en fait plus ambitieux que ceux visés initialement. Plus qu'une simple automatisation des pratiques existants en matière d'élaboration de gamme, le projet a contribué à l'émergence d'une nouvelle ingénierie de la fabrication mieux à même de répondre à la montée de la variété des commandes.