

LA SIMULATION INDUSTRIELLE : AIDE REELLE OU VIRTUELLE A LA PRISE DE DECISION ?

Eric Ballot*

Résumé. - La simulation informatique, tout d'abord outil de laboratoire, a montré son intérêt dans l'étude des propriétés des systèmes dynamiques complexes. Mais la simulation devient aussi, grâce aux progrès des outils de modélisation, un outil de "terrain" au service de la définition ou de la validation de choix industriels. Cet outil d'aide à la décision s'apparente dans ses principes à un outil de calcul de flux et de stocks résultant d'une implantation de ressources et de règles de pilotage fixées par ailleurs. Ceci implique qu'il n'y a pas de garanties particulières quant à la cohérence des règles introduites dans le modèle, donc des résultats. Si l'on ne peut pas avoir de certitudes sur les résultats obtenus, en particulier parce que l'outil traite de problèmes souvent inaccessibles aux méthodes analytiques, la question de la validation repose alors entièrement sur la méthodologie de mise en oeuvre de la simulation et de l'exploitation des résultats. En nous appuyant sur un cas industriel de dimensionnement et de pilotage d'une unité de production, nous apporterons un témoignage de l'intérêt de cet outil mais aussi des difficultés méthodologiques qui l'accompagnent. La simulation n'est qu'un exemple de l'histoire des outils d'aide à la décision récents (recherche opérationnelle, systèmes experts,...). Nous nous appuyerons donc aussi sur cette histoire pour rechercher par comparaison des facteurs explicatifs de leurs impacts dans les entreprises.

Mots clés : simulation industrielle, aide à la décision, modélisation.

1. Introduction

La simulation est aujourd'hui une méthode extrêmement répandue dans de très nombreux domaines : la physique, la finance, l'aviation ainsi que l'industrie. Si l'essence même de la simulation reste la même quel que soit le domaine d'utilisation, c'est-à-dire selon la définition du dictionnaire « la représentation du comportement de systèmes physiques en décrivant par des signaux appropriés ses grandeurs réelles », les usages, eux, sont relativement variés. Comparons ceux cités en exemple ci-dessus :

* Maître-assistant en Systèmes de Production au Centre de Gestion Scientifique de l'Ecole des Mines de Paris.

- modèle de compréhension d'un phénomène en physique,
- aide à la décision en finance par évaluation des risques afférents à certains choix,
- outil de formation pour le pilote de ligne, mais aussi d'exploration de situations extrêmes que l'on souhaite, précisément, ne jamais rencontrer, ...

Ces différents outils de simulation et leurs usages révèlent néanmoins des points communs : compréhension, apprentissage et exploration d'un système physique.

Tant par les compétences requises pour sa mise en oeuvre que par les motivations premières de la simulation, à savoir la question de la compréhension, son origine se trouve dans les laboratoires de recherche, y compris pour l'étude des systèmes de production. On trouve donc, dans les revues scientifiques s'intéressant à la production, une mobilisation plus ou moins importante de cet outil dans de très nombreux travaux touchant par exemple aux problèmes de stabilité de la planification sous l'effet de variations de la demande, d'ordonnancement, etc. Certains travaux, dont ceux de D. Thiel [g], reposent essentiellement sur la simulation pour expliciter l'ensemble des mécanismes de coordination en production. Mais depuis quelques années, on constate aussi un développement important de la simulation informatique dans les entreprises, notamment lors de l'industrialisation de nouveaux produits ou de la conception d'installations [o], où ils viennent s'ajouter aux outils d'aide à la décision déjà existants.

Malgré les nombreuses critiques formulées à l'encontre des outils d'aide à la décision fondés sur des approches quantitatives, on constate, actuellement encore, leur progression y compris dans des domaines peu formalisés, comme l'a souligné J. C. Moisdon dans l'introduction de l'ouvrage "Du mode d'existence des outils de gestion" [a]. Dans ce secteur, la gestion industrielle fut l'une des plus réceptive à ce type d'approche puisque l'on trouve, dès le début du siècle et en particulier dans les travaux de Taylor [b], la préoccupation de la quantification des tâches de production pour augmenter la performance des ateliers. Aujourd'hui encore, la gestion industrielle a recours à de nombreux outils formalisés : GPAO, méthodes d'ordonnancement, TGAO, ... même si leur utilisation effective ne recouvre pas toujours l'étendue de leurs possibilités. Deux raisons sont évoquées par H. Molet [c], la complexité inhérente aux opérations de production qui rend tout modèle parcellaire ainsi que leur intégration délicate en production compte tenu de leurs limites intrinsèques mais aussi des organisations souvent rigides en place.

Dans ce contexte, la simulation industrielle apparaît comme le dernier d'une longue série d'outils de rationalisation de choix d'implantations industrielles. Après une présentation rapide des caractéristiques des outils de simulation industrielle, nous analyserons leurs apports de deux points de vue : celui de l'histoire récente des outils de recherche opérationnelle et celui tiré d'un cas industriel réel. Ces approches nous amèneront à situer les caractéristiques de l'aide à la décision apportée par la simulation.

2. La problématique de la simulation industrielle

Depuis plusieurs années maintenant, sous l'effet de la diffusion généralisée des moyens informatiques, on trouve de plus en plus de logiciels d'aide à la conception et au pilotage des moyens de production au sein des entreprises. Mais c'est aussi la nature de ces outils qui a quelque peu changé avec la généralisation d'une part, de l'interactivité qui permet à des non spécialistes des modèles sous-jacents d'agir sur eux, et d'autre part de la visualisation des

résultats qui facilite leur communication et leur compréhension. C'est plus particulièrement, à ce type d'outil que l'on s'intéressera ici car la simulation est très représentative de cette évolution.

2.1 Les objectifs de la simulation industrielle

Dans ce cadre, la simulation industrielle se propose de reproduire le fonctionnement dynamique d'installations existantes ou non. Les questions susceptibles d'être abordées à travers cet outil sont multiples :

- dimensionnement d'une installation,
- aide au choix de règles de pilotage,
- évaluation de l'impact d'un nouvel équipement,
- gain apporté à l'ensemble d'un atelier par l'augmentation de disponibilité d'un de ses équipements,
- recherche des facteurs de réduction des temps de cycle, etc.

Cette liste non exhaustive des questions que l'on peut aborder avec la simulation illustre l'intérêt qui peut être porté à l'outil dans le sens où ces questions s'insèrent assez bien dans les préoccupations de responsables industriels, tant sur leur forme que sur le fond.

2.2 Fonctionnement des outils de simulation industrielle

Le principe des simulateurs industriels est simple. Il consiste à faire avancer une horloge pas à pas et à calculer pour chacun de ces pas les conséquences sur le système des règles de décision édictées. Il s'agit donc de modélisation à événements discrets.

Pour ce faire, le simulateur, logiciel informatique, requiert de la part de son utilisateur un ensemble de données qui concernent aussi bien les ressources techniques que les règles de pilotage, d'approvisionnement, etc. Les éléments du modèle peuvent eux-mêmes être discrets (des articles, des machines, ...) ou continus (des fluides). Les machines sont décrites par le temps de cycle nécessaire à la réalisation de chaque article, ainsi que les temps de réglage. Les pannes seront modélisées par des tirages effectués à partir de suites pseudo-aléatoires et suivant la distribution choisie. Pour que la simulation puisse débuter, il faut y ajouter un scénario d'approvisionnement des articles dans l'atelier. À partir de l'ensemble des éléments décrits dans le modèle, la boucle de calcul avance pas à pas dans le temps. A chaque instant, le simulateur scrute l'échéancier des événements et calcule à partir de l'ensemble des règles actives, le nouvel état du système et les prochains événements à inscrire dans l'échéancier. Le simulateur agit en fait de la même manière qu'un automate programmable et pose ainsi les mêmes questions vis-à-vis de la discrétisation du temps (stabilité des états, synchronisation d'événements,...) [i].

Une fois le modèle défini, il se déroule à partir d'un scénario préétabli. Sur un simulateur doté d'une interface graphique, on suit tous les changements d'états intervenant en production. Enfin, les résultats fournis par l'évolution du modèle seront analysés par l'intermédiaire d'indicateurs. En effet, la simulation fournit une représentation extrêmement détaillée de la production puisque chaque événement y est consigné. Dès lors, évaluer le résultat de simulations correspond exactement au problème de l'évaluation de la performance d'une véritable production.

Les progrès accomplis dans la gestion des interfaces ne réduisent évidemment en rien la complexité du système modélisé mais favorisent leur abord. Par contre, la programmation sous une forme "décentralisée", par renseignement de multiples dialogues, occulte en partie lors du processus de modélisation l'acquisition d'une vision globale du système et par là réduit les possibilités d'en réaliser la synthèse.

Simuler dynamiquement une installation industrielle revient donc à évaluer les conséquences d'un ensemble de règles de représentation, à chaque incrément de temps du modèle, voir à ce titre [d] et [e]. On comprend dès lors l'étendue des applications possibles.

3. Outils d'aide à la décision et rationalisation de la production

Comme tous les modèles de calcul, un modèle de simulation repose sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent être rapprochées de celles liées à d'autres outils de formalisation de la recherche opérationnelle : approche purement quantitative, formalisation, objectif de rationalisation, ... Ces hypothèses ont été largement critiquées pour leur caractère réducteur des réalités des situations de gestion. Les outils actuels de simulation, parce qu'ils remettent en cause en partie ces hypothèses, changent aussi la nature de ces critiques. Pour mieux comprendre leur développement relativement récent, il nous faut les situer, notamment par rapport aux outils de la recherche opérationnelle dont ils sont issus.

3.1 *Les outils de la recherche opérationnelle : caractéristiques et limites*

Nombreuses sont les situations industrielles pour lesquelles on peut envisager une formulation du problème du type : minimisation d'une fonction économique sous un ensemble de contraintes industrielles. Cette approche, résumée ici sous la forme d'un problème d'optimisation, recèle des difficultés mathématiques non négligeables propres à la nature dynamique, non linéaire, combinatoire et régulièrement aléatoire des problématiques industrielles. En dehors de ces contraintes mathématiques [m], la plupart de ces techniques ont d'abord suscité un vif intérêt avant de faire l'objet de critiques et d'être finalement assez peu utilisées aujourd'hui ou alors de manière relativement limitée. Il suffit pour s'en convaincre de comparer l'ambition et la sophistication des outils mathématiques de la recherche opérationnelle avec le principe de calcul de MRP qui n'accorde pas de place aux aléas et découple les variables de manière à simplifier au maximum l'algorithme.

Parmi les nombreuses critiques adressées à ces méthodes issues de la recherche opérationnelle, nous en retiendrons quatre catégories issues des travaux de B. Roy [f]. Elles concernent le caractère restrictif des hypothèses, le type de résultat apporté par ces méthodes, l'existence d'une solution préférable et enfin leur insertion dans le processus de décision. De plus, ces catégories constitueront une base de comparaison avec les outils de simulation industrielle.

En premier lieu, les hypothèses requises par la modélisation mathématique sont relativement restrictives par rapport à la complexité des situations industrielles. Par exemple, l'hypothèse de linéarité nécessaire à l'emploi de l'algorithme du simplexe en programmation linéaire n'est que rarement vérifiée. Dès lors, deux alternatives sont possibles : l'abandon de l'outil ou la réduction de la situation réelle à un modèle compatible avec l'outil envisagé. Il faut donc "styliser" la réalité. Dans bien des cas, la tentation d'essayer

d'enfermer la réalité dans un modèle est grande. Le risque encouru est alors à la hauteur du travestissement de la réalité, nécessaire pour faire fonctionner le modèle.

En revanche, si l'étape de formalisation aboutit, les méthodes de recherche opérationnelle nous fournissent non seulement une solution mais aussi une qualification de la nature de celle-ci, par exemple, l'optimum ou l'unicité. Cette rigueur de qualification du résultat, naturelle dans le domaine des mathématiques, l'est moins dans celui de l'entreprise. Elle n'en demeure pas moins extrêmement séduisante. Pour preuve, le langage des responsables qui emploient souvent l'expression « Nous ne sommes pas loin de l'optimum » ou *a contrario* « Nous sommes encore loin de l'optimum ». Un optimum existerait et les outils de la recherche opérationnelle le trouveraient et en donneraient sa nature ! La réalité est quelque peu différente.

Quand bien même il serait possible d'obtenir une solution mathématiquement "optimale", il n'est pas évident qu'elle le soit effectivement. En effet, il n'est pas toujours facile de définir une pondération entre les différentes composantes d'une fonction objectif. Par exemple, lorsque l'on cherche à minimiser le coût de stockage, on s'aperçoit qu'il n'existe pas de méthode universelle d'addition des coûts de stockage et de rupture, chacun appréciant différemment les risques et leurs coûts associés. De plus, les nombreux aléas qui ne manquent pas de survenir entre la définition d'un plan et sa mise en oeuvre bousculent celui-ci. Pendant combien de temps une solution d'ordonnancement peut elle être appliquée ? La notion d'optimum mathématique perd donc sa rigueur "absolue" dès lors que l'on cherche à l'appliquer concrètement à des choix industriels. L'optimalité d'une solution a donc pour caractéristique de ne pas être stable à la fois dans le temps et par rapport aux acteurs.

Enfin, la difficulté de compréhension et d'appropriation de ces modèles ne facilite pas leur insertion dans une organisation où se mêlent certes des modèles de décisions rationnels mais aussi des enjeux organisationnels et des jeux d'acteurs. En particulier, si le modèle, dans sa logique de fonctionnement, entre en contradiction avec les règles de fonctionnement de l'organisation dans laquelle il se trouve employé, il en résultera une crise dont l'outil risque fort de faire les frais, comme l'ont soulignée A. Hatchuel et H. Molet [j].

3.2 Les outils de simulation industrielle : une comparaison de leurs caractéristiques avec les méthodes de recherche opérationnelle

Par rapport au programme de la recherche opérationnelle, celui des outils de simulation industrielle apparaît à la fois comme un prolongement par ses objectifs de rationalisation mais aussi moins ambitieux par leur fondement. Pourtant ceux-ci semblent aujourd'hui les remplacer dans le rôle d'aide à la décision dans de nombreuses situations industrielles. Pour éclairer ce paradoxe, nous reprenons les quatre thèmes de critiques rappelés ci-dessus.

En premier lieu, on constate d'emblée qu'il existe avec ces nouveaux outils des possibilités de modélisation très développées. Ces possibilités viennent diminuer sensiblement les critiques formulées à l'encontre de la recherche opérationnelle. En effet, il n'est plus besoin de tenir compte des propriétés de linéarité ou autres entre les différentes variables. Quasiment tout type de règle formelle est envisageable, la limite est donc bien plus d'ordre pratique que théorique. Prenons l'exemple d'un poste comportant des règles de priorité particulièrement complexes car liées à la morphologie des pièces. Le codage de ces règles sera long mais pas nécessairement impossible. Par contre, il n'est pas forcément utile de tout modéliser pour reproduire globalement le fonctionnement de l'installation. En

pratique, les choix de modélisation aboutissent souvent à des modèles relativement détaillés donc à un ensemble d'hypothèses, certes moins restrictives mais plus nombreuses donc difficiles à contrôler. Il subsiste évidemment toujours l'hypothèse de quantification des phénomènes à piloter et de la connaissance précise de leurs caractéristiques.

Corollaire de l'ouverture du champ de la modélisation, il n'existe quasiment pas de moyens directs pour cerner la pertinence d'un résultat de simulation et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, la simulation est mobilisée le plus souvent pour des classes de problèmes où il n'y a pas de résultat analytique donc pas de référence théorique possible. C'est d'ailleurs un des apports de la simulation que d'obtenir des résultats dans ces conditions. La deuxième raison est liée à la nature même de l'outil : celle d'un automate qui exécute des règles sans moyen de contrôle de leur cohérence. Conséquence, la qualité du résultat dépend exclusivement de la qualité des règles de fonctionnement introduites lors de la modélisation. En résumé, on peut dire que si les techniques de simulation permettent toujours d'obtenir un résultat, en revanche elles n'apportent intrinsèquement rien quant à sa validité, et ceci sur deux plans : celui de la cohérence des règles introduites et celui de la représentativité par rapport à la réalité. La validation reposera donc davantage sur la méthodologie concrète d'accompagnement du projet de simulation.

En comparaison avec la recherche opérationnelle, la construction des modèles de simulation permet de tirer de nombreux éléments quantifiés de l'activité modélisée : dates de lancement, attentes devant un poste, taux d'occupation des ressources, temps de cycle, niveaux d'en-cours,... Trop même, puisqu'il est nécessaire pour analyser les situations d'agrèger les données et de construire des indicateurs représentatifs de l'activité simulée. La question des ordres de préférence se trouve ainsi rejetée en aval de la simulation car on n'a pas, du moins en théorie, à choisir un critère particulier pour faire fonctionner un modèle de simulation. Ce découplage est néanmoins partiel car un projet de simulation procède par itération de phases de modélisation puis d'analyse des résultats. Considéré globalement, le choix de représentation des résultats et les conclusions qui en sont tirées interfèrent donc fortement sur les objectifs²¹. La question du choix des critères d'évaluation de la performance, si elle s'enrichit des apports des modèles de simulation par l'élargissement de l'évaluation à de nombreux critères, n'en demeure pas moins entière.

Pour terminer cette première comparaison, on constate que les progrès de l'informatique associés à ceux des logiciels de simulation rendent la compréhension de ces modèles de plus en plus abordable, ceci constituant une condition nécessaire à une meilleure intégration de ces outils dans les organisations. En effet, la représentation des modèles peut être aujourd'hui suffisante pour qu'un responsable ou un conducteur d'installation puissent se retrouver dans le modèle. Cette identification enrichit alors de manière significative la compréhension du modèle par les différents acteurs et par la suite l'efficacité des échanges.

Par ailleurs, on a pu constater avec un public d'étudiants une amélioration notable de la vitesse de résolution d'un problème de recherche de goulot par l'utilisation des animations graphiques en complément des écrans de synthèse de type tableaux de bord (niveau d'en-cours, taux d'utilisation des machines,...).

Au terme de cette comparaison, il apparaît que la simulation répond point par point et dans une large part aux critiques formulées à l'égard de la R.O. Qu'en est-il exactement ?

²¹ Ainsi en pratique on constate le plus souvent que les hypothèses retenues pour la construction du modèle tiennent compte du critère de performance que l'on souhaite évaluer.

C'est ce que nous allons illustrer à travers un cas d'utilisation de la simulation industrielle sur un exemple concret, une scierie, dans un premier temps, puis analyser les apports et limites, dans un second temps.

4. La simulation d'une scierie innovante

La scierie, dont nous avons simulé le fonctionnement dans le cadre d'un contrat de recherche intervention, est entièrement nouvelle puisque son démarrage en production ne remonte qu'à la fin de 1995. Cette unité de production n'est pas seulement récente, elle est aussi particulièrement innovante car elle transpose une part importante des concepts des ateliers flexibles dans le domaine du sciage du bois : diversité des produits, multiplicité des gammes, taille de lots très faible et automatisation quasi intégrale. Autant d'éléments qui rendent difficile la détermination de la capacité de production et justifieront le recours à la simulation.

4.1 La problématique du sciage : un choix de gestion de la complexité

Le secteur du sciage des résineux présente lui aussi quelques particularités par rapport à d'autres productions. C'est une production incertaine par la nature de la matière première (les troncs d'arbres) d'une qualité constatée *a posteriori*²² et d'une diversité très importante. Dès lors, la production ne peut être complètement programmée, notamment par la conversion du besoin en produits finis en matières premières. En revanche, il subsiste une marge de manoeuvre importante dans l'affectation des produits attendus aux matières premières. En effet, les troncs de grands diamètres permettent d'obtenir une large palette de références. Il en résulte néanmoins une combinatoire importante de gammes de fabrication possibles.

Indépendamment des choix d'organisation, le process de sciage est organisé autour de 4 grandes étapes.

1. Une découpe transversale des troncs d'arbre, aussi appelés grumes, qui détermine un couple longueur commercial, diamètre. Cette première opération est conditionnée par le choix des couples (longueur, diamètre) qui sont retenus par le scieur pour la production. En outre, cette opération a aussi pour objectif de minimiser les chutes de bois étant donné l'importance du coût de la matière première.
2. Une étape de classement des bois qui s'étend selon les scieries d'un tri grossier à des dispositifs à 100 cases où les bois forment des couples (longueur, diamètre) homogènes.
3. La phase de sciage longitudinal est distribuée sur un ensemble de scies qui sont organisées de manières très différentes suivant les scieries : parallèle, flow-shop ou job-shop.
4. Une dernière étape de tri des produits finis.

Enfin, ce secteur est soumis à des contraintes économiques [h] à la fois fortes, le prix de la matière première représentant une part très importante du prix de vente, et déroutantes, l'approvisionnement en matière première est local et fortement variable en prix et en volume

²² Le bois est une matière vivante et hétérogène. Il est donc difficile de prévoir exactement la structure et la qualité interne du bois en l'observant de l'extérieur, seule source d'information possible avant le sciage. Il arrive donc de déclasser des bois après leur sciage ce qui remet en cause le plan de production de la référence considérée.

alors que les prix et les volumes de ventes sont en partie fixés par les grands pays producteurs indépendamment des fluctuations locales sur la matière première. De ce fait et en dehors des efforts de structuration des filières économiques du bois, les entreprises de ce secteur s'orientent aujourd'hui vers la recherche d'une organisation de production de volume²³ la plus adaptée pour faire face à ces contraintes et éviter d'en subir les conséquences.

Face à cette situation, l'entreprise, objet de notre recherche, a fait le pari de pouvoir pallier en partie les incertitudes de cette production par la gestion d'une partie de la diversité en cours de production. Cette voie intermédiaire se situe entre les scieries qui trient les bois de manière fine et scient en continu, mais constituent des stocks très importants de produits standards (de l'ordre de 10.000 m³), et celles qui acceptent la diversité de la matière première, mais dont près de la moitié du temps disponible est consacré aux réglages en position des scies. Le choix entre l'une ou l'autre des stratégies est alors notamment guidé par les caractéristiques du bois du bassin d'approvisionnement et la politique commerciale de l'entreprise. L'innovation de l'installation étudiée réside dans une minimisation de l'impact de l'hétérogénéité des bois sur la productivité sous deux aspects :

- Une diminution des temps de réglage des machines par leur automatisation fondée sur la reconnaissance et le suivi informatisé de bois hétérogènes.
- Une diminution du nombre de réglages par la constitution de lots lors du regroupement sur des quais de classes de bois, classes qui sont définies en début de chaque campagne de production.

Cette diversité autorise alors une plus grande réactivité, ce qui doit améliorer l'ajustement à la demande sous deux aspects : réduction des délais commerciaux d'une part et production de dimensions particulières d'autre part. En contrepartie, la gestion des flux à l'intérieur de la scierie sera complexifiée par la gestion de nombreuses références à des cadences élevées (6 à 8 billons de bois/min. en entrée et 80 à 100 produits finis / min. en sortie).

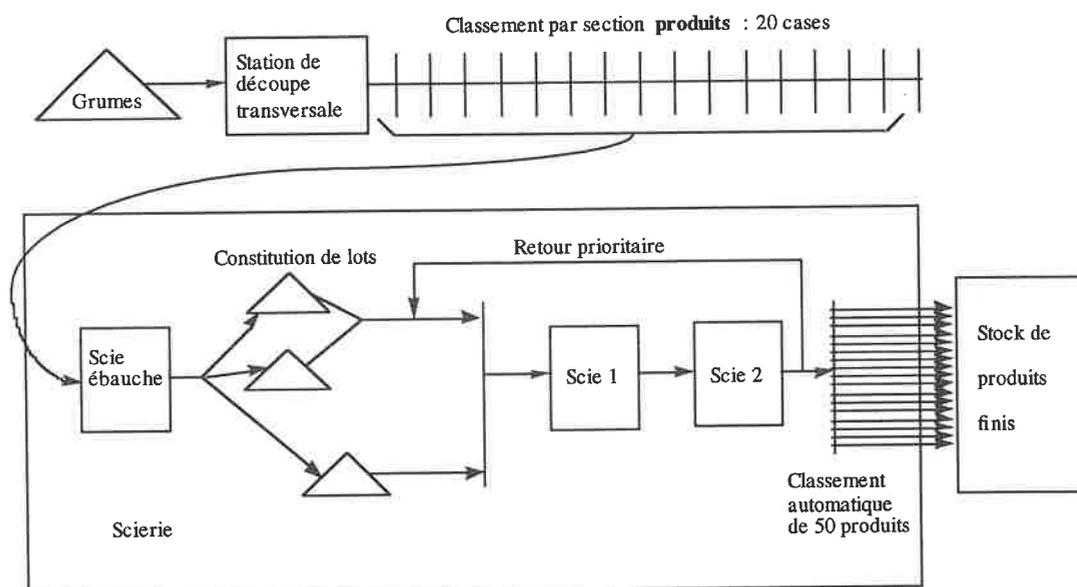


Fig. 1 : schéma simplifié de l'implantation générale

²³ Les unités de sciage modernes produisent environ 100 000 m³ de sciage/an, soit 2Ha de forêt /jour.

La scierie avec laquelle nous avons travaillé est alimentée par un module de découpe transversal automatisé, suivi d'un tri partiel (20 cases comportant chacune ± 10 bois différents). Chaque jour, 2 à 3 cases sont choisies et alimentent la scierie. Celle-ci est organisée en un job shop qui débouche sur un dispositif de tri des produits à 50 cases, fig. 1.

Au moment de la construction du modèle de simulation, l'unité de production était en cours de réalisation et de montage sur place. L'architecture ainsi que les principaux choix d'organisation étaient donc déjà faits (choix d'implantation des lignes, affectations des bois aux lignes, etc.). La définition de l'unité de sciage à savoir plusieurs lignes reliées entre elles par des convoyeurs pour former un job-shop était donc acquise (cf. la partie scierie de la fig. 1).

Contrepartie de cette flexibilité, la constitution dynamique des lots, de tailles variables, complexifie les flux à l'intérieur de l'usine de sciage. On court alors le risque d'obtenir des lots de faible taille ce qui influence notablement la productivité. En effet, le temps de changement de fabrication peut-être de l'ordre de la moitié du temps de production unitaire. La Fig. 2 montre la distance, donc le temps, qui doit séparer deux bois lors du sciage quand ils ont des dimensions différentes.

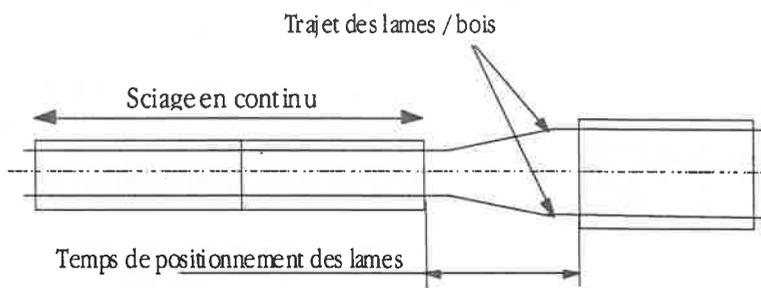


Fig. 2 : temps de changement de fabrication / temps productif lors des opérations de sciage

L'importance des temps de réglage, la diversité des flux et de leur imbrication, fait de la taille des lots une inconnue majeure et difficilement calculable. La Fig. 3 illustre à ce titre un des points de rencontre des flux de l'usine où les lots sont susceptibles d'être modifiés.

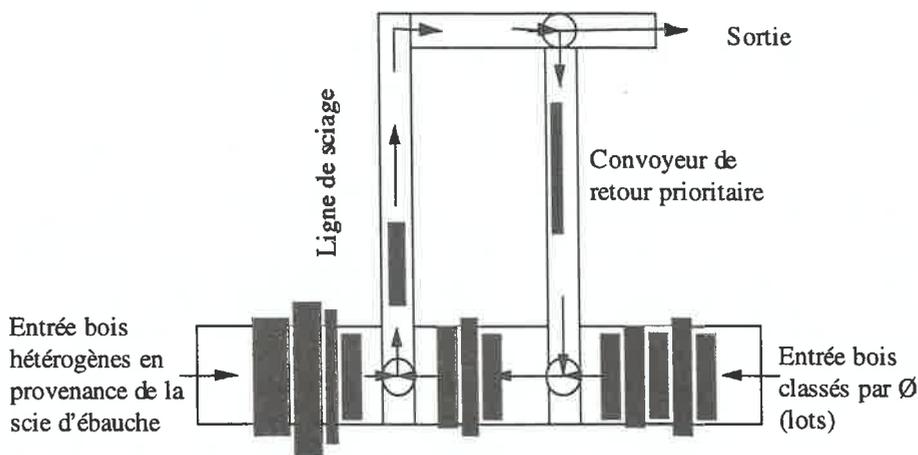


Fig. 3 : exemple de deux points de rencontre et d'un point de séparation des flux en production

4.2 La recherche de la capacité de production par simulation : un réexamen de la conception

Dans ce contexte, l'objectif assigné à la simulation fut d'affiner les calculs de capacité réalisés lors de la conception car ceux-ci nécessitaient, pour des raisons mathématiques, de prendre comme hypothèse une taille de lot moyenne. Or si l'on pouvait ainsi mesurer l'impact des tailles de lots sur la productivité, on était incapable de l'estimer *a priori*. Nous nous trouvions donc dans le cas où les hypothèses étaient trop restrictives pour entreprendre des calculs directs alors que la simulation permettait de mesurer sur le modèle les tailles de lots résultantes des règles de pilotage.

La mise en œuvre de la simulation, par l'ensemble des informations qu'elle requiert, nous a en fait amenés à examiner la conception de l'installation, d'abord d'une manière globale puis plus détaillée lorsque le comportement ne correspondait pas à sa définition. La collecte des informations s'est déroulée en grande partie auprès de l'exploitant mais aussi du constructeur à chaque fois que cela fut nécessaire. En pratique, il a fallu :

- définir des lots de bois à traiter dans la scierie à partir des caractéristiques de l'approvisionnement actuel et des futures procédures,
- repérer sur les plans les données constructeurs, les vitesses des convoyeurs ainsi que leurs contraintes : dimensions, modalité de mise en route et d'arrêt, etc.,
- mais aussi expliciter les règles de pilotage envisagées de manière à rendre compte autant que possible du futur fonctionnement de l'installation (priorité des flux, vitesses de coupe,...).

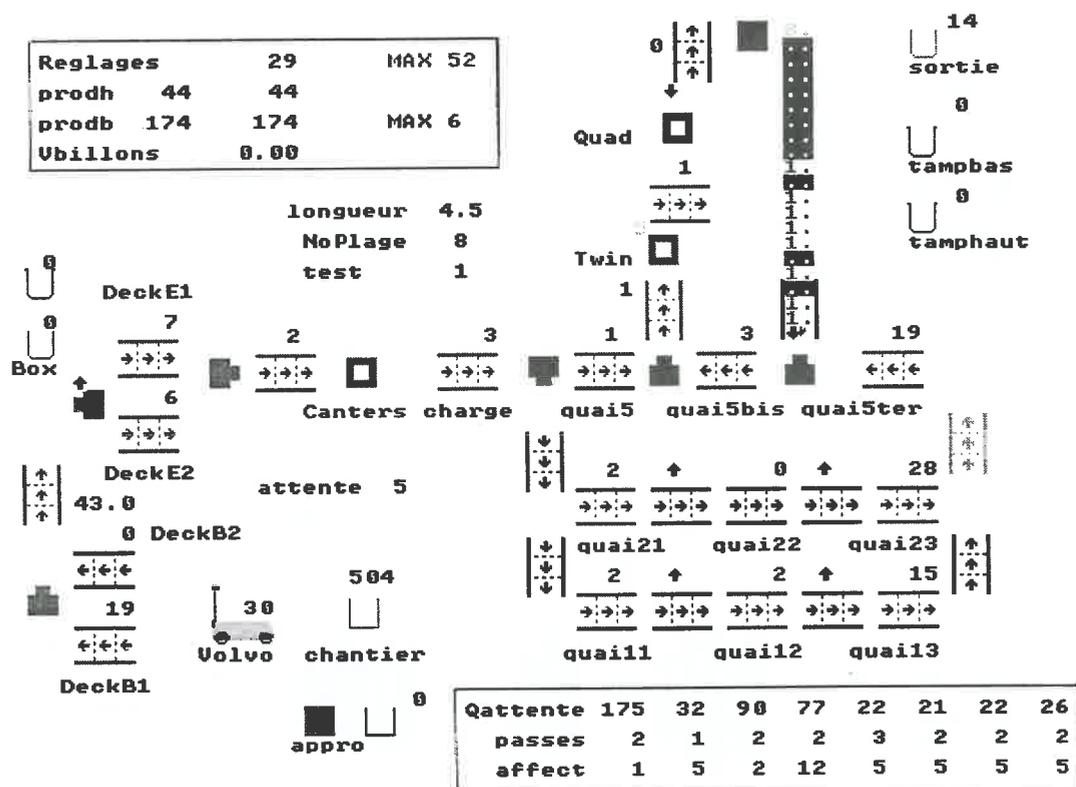


Fig. 4 : représentation de la scierie par le modèle de simulation

Le fort degré de mécanisation et d'automatisation de l'installation a joué ici un rôle positif pour la simulation dans la mesure où la plupart des données de conception de l'installation étaient clairement définies et seraient appliquées par les automatismes. La Fig. 4 montre la représentation graphique du modèle de simulation de la scierie.

Le niveau de détail et l'exhaustivité exigés pour rendre compte du comportement attendu de l'installation nous ont amenés à nous intéresser particulièrement aux points de rencontre des flux. Pratiquement, nous avons recherché toute l'information nécessaire pour faire fonctionner correctement le modèle. Cette démarche a procédé par itérations de confrontations et affinages du modèle à partir des difficultés soulevées.

Cette phase de construction du modèle a mis en évidence, parmi l'ensemble des données, d'une part des lacunes dans la conception du pilotage et d'autre part des définitions contradictoires entre le futur exploitant et le constructeur de l'installation. En l'occurrence, il s'agissait :

- d'options encore non fixées de pilotage des flux,
- de points de vue divergents sur la fréquence et la modalité des réglages, donc sur leurs durées.

Ces différences de points de vue sur l'installation, révélées et enrichies par les résultats de la simulation, ont initié un débat sur les modifications à apporter à la conception de l'installation. Ce débat entre exploitant et le constructeur fut d'autant plus important que les simulations laissaient apparaître de manière significative que les performances projetées initialement ne seraient pas atteintes.

4.3 Les modifications de la conception à partir de la simulation

Le principal diagnostic apporté par la simulation porta sur la difficulté qu'avaient les règles initiales de pilotage des flux à constituer et à maintenir des lots dans tout le processus de sciage. L'étude du schéma des flux de la Fig. 3 montre qu'il existe une possibilité de scission des lots par l'arrivée de bois du retour. Le remède à ce problème résidait dans une coordination entre les flux de retour et l'utilisation des quais de stockage.

En fait de nombreux flux ne pouvaient pas être pilotés de manière fine car cette possibilité n'avait pas été prévue initialement. Ainsi, on ne pouvait pas arrêter les longs convoyeurs en raison de leur inertie. Ces flux devenaient donc prioritaires. Or, une mauvaise priorité entre les flux à ces endroits de l'installation entraînait la scission des lots patiemment construits en amont et remettait en cause la productivité globale de l'installation. La simulation mit ce problème en évidence.

Etant donné le niveau d'avancement de la construction de l'usine, la plupart des choix étaient déjà arrêtés. La remise en cause de la conception ne fut donc possible qu'à la marge car les contraintes étaient très nombreuses et difficiles à remettre en cause. Il restait donc à imaginer une solution de pilotage qui tienne compte des degrés de liberté restant et pallie les problèmes soulevés par la simulation. L'outil de simulation est alors devenu un instrument de médiation entre les parties en proposant un cadre de réflexion commun et en permettant la validation des concepts de pilotage en développement.

S'il est connu que la taille des lots est un paramètre prépondérant de la réactivité et de la productivité, une étude de T. Smart [k] montre alors que la façon de découper les lots est

généralement un facteur de second ordre par rapport à leur taille. Deux stratégies de pilotage furent finalement élaborées et testées pour s'assurer des tailles de lots les plus importantes possibles.

1. La préservation volontariste de lots y compris par un arrêt momentané de la production.
2. Le lancement de lots dans les meilleures conditions possibles mais sans la garantie absolue de leur sauvegarde.

Un plan d'expériences fut alors défini de manière à étudier la sensibilité de chaque stratégie à la variation de cinq facteurs définis par l'exploitant : schémas de découpe (gamme), nature des approvisionnements, dispositifs de stockage annexes et 2 types de produits sciés. Les résultats de la simulation montraient alors l'influence des différents facteurs introduits dans le plan d'expérience sur les niveaux de production atteints, la taille des lots, etc.

Ce plan d'expériences rendu possible par le peu de paramètres encore modifiables n'aurait sans doute pas été possible au début du projet. En effet, si la simulation intervient en cours de conception, les données sont moins précises et la combinatoire des choix importante. La simulation devient alors un outil d'exploration. Par contre, la simulation en fin de conception mais avant la réalisation a permis de valider celle-ci²⁴. La simulation se positionne alors comme un outil de validation, d'anticipation par la résolution de problèmes avant leur découverte lors de la mise au point.

4.4 Les différents niveaux de résultats de cette simulation

La simulation de la scierie n'a pas simplement apporté une estimation de la productivité de l'usine de sciage mais a contribué aussi à nourrir différentes réflexions.

En effet, avant même la connaissance des résultats numériques, la simulation par son exigence propre en informations révèle les lacunes éventuelles dans la définition des caractéristiques de l'installation. Cette rigueur requise pour la collecte des informations, fut ici riche d'enseignements car ce fut aussi l'occasion d'enrichir la coopération entre le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage. On peut donc dire que la visualisation du fonctionnement et des résultats de simulation ont permis l'émergence d'un processus d'apprentissage croisé au fil des itérations. De la mise en commun par les deux parties d'un ensemble de contraintes et d'objectifs a résulté un approfondissement du modèle autour des exigences requises et des questions soulevées par la simulation.

Si dans un premier temps, la simulation a surtout montré les difficultés qu'il y avait à atteindre les objectifs de productivité, elle a ensuite permis de hiérarchiser les solutions élaborées en les comparant sur les critères jugés pertinents :

- niveau de productivité,
- régularité du flux en sortie,
- saturation des capacités de stockage, ...

Comme toutes les simulations, celle-ci reposait aussi sur des paramètres aux valeurs aléatoires dont il fallait maîtriser les impacts. Dans le cas de la scierie, la matière première

²⁴ En revanche, il n'est pas facile de définir l'instant le plus approprié car on tend de plus en plus à mettre en parallèle des tâches pour réduire les délais, donc à commencer la construction sans avoir fini de définir le pilotage.

de chacune des campagnes de production est hétérogène et stockée en vrac. Dans la simulation ce mode de fonctionnement fut reproduit par un ordre de passage en scierie issu d'un tirage au sort des bois. Des tests ont été effectués avec différents scénarios alternatifs d'entrée aléatoire des bois. Nous nous sommes ainsi assurés, à quelques pour-cent, de la robustesse des méthodes de pilotage en modifiant ainsi l'ordre d'entrée des bois.

Mais la simulation a aussi apporté trois autres éléments. Le premier est une réorientation de l'étude car l'analyse de sensibilité de validation a montré que le facteur prépondérant de la productivité n'était pas la stratégie de pilotage employée mais le type de gamme employé (les schémas de découpe). La Fig. 5 montre le niveau de productivité en nombre de billons²⁵/min.) en fonction de leur diversité (taux de classement²⁶). Chaque point sur ce graphe représente une expérience pour laquelle on a fait varier un des différents paramètres envisagés. On note sur cette Fig. une structuration des données en deux groupes qui après examen relèvent du schéma de découpe, paramètre dont rien ne permettait de dire *a priori* qu'il serait aussi important. Dans le cas de cette scierie, ce paramètre se révèle même plus important que le choix de la stratégie de pilotage en termes de taille de lot, donc de productivité.

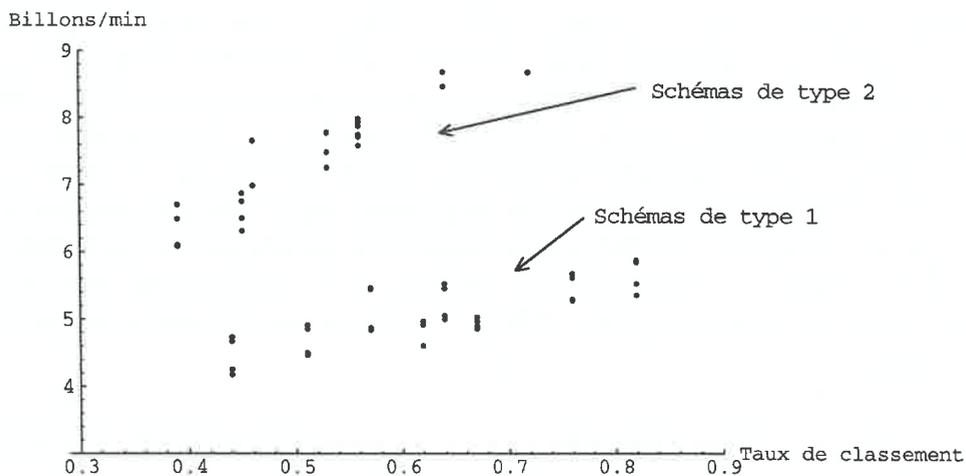


Fig. 5 : Effet des schémas de découpe sur la productivité

En l'occurrence, nous avons ainsi montré la sensibilité de l'installation à certains paramètres (schéma de découpe mais aussi utilisation des quais de stockage) et par complémentarité ceux qui n'influent pratiquement pas. En ce sens, cet outil a permis de dépasser l'objectif initial en devenant un véritable outil d'apprentissage du fonctionnement de cette unité de production.

Le deuxième résultat est constitué par la transposition du synoptique de suivi des bois du simulateur sur les écrans de contrôle de l'installation. Le schéma de la Fig. 4, reproduction

²⁵ Nom donné aux morceaux de troncs d'arbre qui entrent dans la scierie.

²⁶ Le taux de classement mesure l'homogénéité des billons contenus dans une campagne de sciage. Ainsi un taux de classement de 1 indique des billons qui ont tous le même schéma de découpe. A l'inverse, un taux de classement de 0 indique des billons qui ont tous des schémas de découpe distincts.

animée de l'installation sur le simulateur, a servi de maquette pour la réalisation de la console de suivi des bois dans l'installation.

Le troisième élément est sans doute un excès de confiance dans le caractère prédictif de la simulation. En effet, dès lors que le modèle fonctionnait correctement et que ses enseignements furent partagés, la mise en œuvre sembla aller de soi. Or l'installation a connu dans sa phase de démarrage de nombreuses difficultés non anticipées : par exemple aléas techniques sur les machines, problèmes de fiabilité du système d'informations et charge de travail très importante des conducteurs de l'installation.

Finalement cette simulation aura fait comprendre une partie des difficultés liées à ce type d'installation et montré comment celle-ci pouvait fonctionner, du moins virtuellement. Ces apports de l'étude par simulation sont-ils imputables à cette dernière ? Relèvent-ils des propriétés de la simulation ou du processus de modélisation et d'exploitation des résultats ? Pour cela il nous faut analyser quelques caractéristiques des outils de simulation.

5. Les paradoxes de la simulation lors de la conception de systèmes de production

Les outils de simulation actuels en répondant largement aux principales critiques de la recherche opérationnelle déplacent aussi le champ des difficultés rencontrées, donc des nouvelles critiques possibles. Nous en retiendrons quatre, tout en omettant la question de la définition de la performance qui est exogène à la question de la simulation alors qu'elle devait être explicite dans les modèles de recherche opérationnelle. Nous montrerons d'abord que de la multiplication et de la finesse des hypothèses ne résulte pas nécessairement une meilleure représentation de la réalité. Ensuite nous nous attacherons au problème du statut de l'information dans les simulateurs par rapport à la vie concrète des organisations industrielles. Enfin, nous examinerons le rôle des interfaces sur l'insertion de ces outils dans les organisations.

5.1 *De l'enrichissement des hypothèses à l'ajustement du modèle à la réalité*

On constate qu'en lieu et place d'hypothèses nécessairement fortes mais réduites en nombre, les modèles de simulation sont susceptibles d'accepter de très nombreuses règles. De cette multiplication des règles de description, on attend notamment une meilleure représentation du comportement. Mais ces règles restent des propositions logiques d'une portée limitée et ne suppriment pas la formulation d'hypothèses. Au contraire, entrer dans un modèle logique de nombreuses règles, c'est aussi multiplier les sources d'ajustement entre le modèle et la réalité donc multiplier les hypothèses. En effet, il n'est pas rare que les réalités de la vie industrielle soient trop complexes pour être modélisées directement. Par exemple, celles de prise en main des pièces devant un poste de travail, décision de purger un stock tampon,... Dans ces différents cas, des choix de règles devront être faits pour rendre la situation modélisable.

Un modèle de simulation industrielle comporte ainsi des dizaines voire des centaines de paramètres, règles, etc. reflet des choix faits et qui influenceront le comportement du modèle. Il est donc important lors de la modélisation de faire partager entre les acteurs du projet, l'ensemble des choix effectués. Dans le cas contraire les risques encourus sont, de modéliser des points peu importants parce que c'est possible, ou de réaliser de mauvais choix en

particulier si le "modélisateur" n'est pas directement impliqué dans la production, comme c'est souvent le cas. Dans le cas de la scierie, nous nous sommes efforcés de faire expliciter les points délicats de l'installation par les deux parties en présence.

On aboutit donc à un premier paradoxe : augmenter la précision de la modélisation, c'est aussi multiplier les acteurs et les choix, donc risquer la non pertinence ou la non unicité de la représentation.

5.2 Une hypothèse des simulateurs souvent oubliée : un système d'informations parfait...

La simulation entraîne aussi une hypothèse à la fois implicite et relativement forte : une information parfaite. En effet, dans un simulateur la transmission des informations est par nature parfaite. Par exemple, les priorités entre produits sont définies, connues et appliquées. Dès lors, une large part des problèmes rencontrés en production, à savoir la transmission rapide d'informations fiables aussi bien entre personnes qu'entre systèmes d'informations, est le plus souvent ignorée.

Ceci ne signifie pas que ce problème soit résolument en dehors du domaine des simulateurs. En effet, il est tout à fait possible d'intégrer au modèle de production un modèle d'informations. Mais cela complique le modèle alors que le simulateur est par construction "omniscient" par rapport à lui-même. Il y a donc un travail de "contournement" du système d'informations du simulateur pour y parvenir. Par exemple, la réalisation d'un modèle piloté par un kanban montre la nécessité d'une prise en compte d'un modèle des informations. Dans le cas de la scierie, la non prise en compte du caractère imparfait de l'information fut pénalisante car un nombre important des arrêts de l'installation furent provoqués par des informations manquantes ou erronées.

Deuxième paradoxe : malgré des possibilités étendues de modélisation de l'information et de sa diffusion, celles-ci restent implicites et peu mises en œuvre alors que de nombreuses situations industrielles pourraient en tirer parti.

5.3 ...et son absence de conséquences sur l'organisation

La planification centralisée, modèle le plus facile à reproduire dans un simulateur surtout si elle repose sur des règles formelles, n'est pas un modèle universel. De nombreuses approches de pilotage de la production, dont l'organisation en îlots ou le kanban, insistent aujourd'hui sur un formalisme plus souple et tendent à développer l'autonomie. Ces dispositifs peuvent bien sûr être simulés mais leur intérêt même n'apparaît pas directement dans la simulation. En particulier, le traitement implicite de l'information fait par les simulateurs, et évoqué au paragraphe précédent, masque une part importante des efforts menés pour organiser la production. En effet, le passage d'une production en îlots, par exemple, agit d'une part sur la simplification des flux, ce qui permet leur meilleure visibilité, et d'autre part sur la responsabilisation du personnel de production. Ces deux facteurs d'amélioration de la productivité sont difficilement représentables dans un simulateur car tout cadre formel ne peut pas réellement représenter les interactions humaines qui en découlent. Une part des tendances actuelles en terme de management limite donc la portée explicative des outils de simulation. Par contre, une approche globale en terme d'influence du gain local sur la performance de la production est possible [1].

5.4 De l'amélioration des interfaces à l'appropriation des modèles

Les simulateurs sont aujourd'hui de plus en plus simples à utiliser et les animations dynamiques permettent de pallier la difficulté de communication des résultats. Nous en avons d'ailleurs largement fait usage lors de la conception de la scierie pour faire partager notre démarche de modélisation. Ces améliorations des interfaces constituent une condition nécessaire pour faciliter la compréhension des modèles.

On peut penser que l'on contourne ainsi le problème de la complexité inhérente aux problèmes abordés et que la simulation permet une certaine appropriation de la modélisation par les différents acteurs du projet. Il faut néanmoins tempérer cette vision car les modèles industriels sont souvent suffisamment complexes pour que l'on ne puisse pas les appréhender dans leur globalité, y compris par la représentation dynamique des résultats.

Mais si la représentation du fonctionnement est relativement facile et apporte des éléments de compréhension indiscutable²⁷, c'est moins vrai des hypothèses sous-jacentes au modèle. En effet, la vision de type réalité virtuelle ou autre ne permet pas d'appréhender les nombreux choix faits alors qu'elle peut en donner l'impression. C'est ainsi que l'on voit se développer l'usage de la simulation pour montrer l'intérêt d'une machine, par exemple lors de la vente de biens industriels. Qu'en est-il alors des hypothèses du modèle ? On peut facilement imaginer qu'elles sont favorables au nouvel équipement dont la simulation fait l'éloge...

D'une manière plus générale l'insertion de la simulation dans les entreprises n'est pas non plus sans enjeu pour les différents acteurs des projets qu'elle véhicule. La manière dont s'effectue alors la phase de modélisation devient un paramètre fondamental, notamment la phase de validation des hypothèses entre l'exploitant, le modélisateur et le concepteur. A titre d'exemple, plus de la moitié du temps de l'étude de la scierie par la simulation fut consacrée à la mise en commun des hypothèses et à la construction d'une vision partagée des choix et de leurs conséquences.

Il y a donc un risque, encore renforcé par les nouvelles interfaces, de confusion entre un modèle forcément réducteur et la réalité. On constate ici encore un paradoxe entre les possibilités des outils et leur utilisation concrète limitée. L'amélioration de l'interface ne bénéficie pas forcément à la compréhension des modèles sous-jacents car cela renforce aussi son rôle de moyen de communication avec les manipulations potentielles afférentes.

6. La simulation : quelle aide à la décision pour la conception des systèmes de production ?

A travers ce propos, nous avons analysé les propriétés de la simulation industrielle de deux manières différentes, d'une part en la comparant avec la recherche opérationnelle et d'autre part lors de son application à un cas. Les propriétés, parfois paradoxales, de cet outil sont au nombre de trois.

²⁷ Des travaux dirigés menés avec des élèves de grandes écoles, nous ont montré que ceux qui usaient de l'animation dynamique amélioreraient leur raisonnement. Parallèlement, lors de présentations orales, la manière de présenter un modèle focalise le débat sur la question essentielle ou l'égare durablement, y compris avec une assistance composée de professionnels de gestion de production. Des résultats similaires ont d'ailleurs été obtenus dans un domaine très différent : la simulation d'interventions chirurgicales [n].

- Des possibilités de modélisation si étendues que la quantité de paramètres envisageables et la combinatoire des scénarios possibles requièrent un choix des paramètres pertinents et un processus de validation de la modélisation quasi-permanent. Cette validation de la modélisation, par les différents acteurs d'un projet, est d'autant plus importante que la validation par les résultats, souvent citée, ne peut être que grossière. Mais si ce n'était pas le cas, aurait-on eu besoin de simuler !
- Une utilisation des modèles encore largement limitée aux aspects physiques de la production, négligeant ainsi tout les aspects liés à la transmission des informations et *a fortiori* à la connaissance des acteurs. Les obstacles théoriques à la modélisation des flux d'information sont pourtant inexistantes pourvu que ceux-ci soient formalisables dans l'entreprise. Cette prise en compte nous semble pourtant nécessaire pour valoriser le choix de nouvelles organisations.
- De nouvelles interfaces qui rendent presque "palpable" la future installation, ce qui permet de faire partager ou au contraire détourner les enjeux d'un projet. En effet, seule la solution y est représentée et non les hypothèses qui y ont conduit. Ces interfaces ne sont d'ailleurs que la préfiguration des nouvelles générations d'outils faisant largement appel à la réalité virtuelle qui renforceront encore l'impression d'y être ! Le risque que la simulation devienne aussi « faire paraître comme réel, effectif (ce qui ne l'est pas)²⁸... » sera alors encore plus important.

Malgré le caractère délicat que peut revêtir l'utilisation de la simulation et qui devrait naturellement conduire à une diminution du caractère prescriptif des résultats, il semble que l'on assiste à un mouvement plutôt inverse. La simulation se retrouve ainsi viser les mêmes usages prescriptifs que les méthodes de recherche opérationnelle mais sans bénéficier de leur fondement rationnel. Mais le véritable fondement des outils de simulation repose, à notre sens, sur la mise en commun des savoirs, leur confrontation et l'expertise nouvelle qui en résulte. Cette préparation de la décision est encore enrichie par la capacité de la simulation à produire simultanément de nombreux indicateurs permettant ainsi d'éviter la focalisation sur un seul d'entre eux. Ceci a deux conséquences :

- diminuer le caractère apparemment très prescriptif de l'outil (acheter une machine supplémentaire, réduire des deux tiers un stock,...) par le fait qu'il s'agit de l'aboutissement d'un processus de décision au cours duquel les différents points de vue devront s'exprimer.
- expliquer aussi sans doute le rôle important joué par ces outils pour l'apprentissage²⁹ des problèmes de gestion des flux car l'enjeu semble autant dans le partage de l'apprentissage d'un système industriel que dans les valeurs, toujours relatives, des différents résultats.

Il nous semble en fait que la nature même de la simulation industrielle soit à l'origine des paradoxes soulevés. En effet, la simulation n'est pas une imitation de la réalité. C'est simplement une opération de substitution de la réalité par une interprétation formalisée de celle-ci, interprétation par nature non unique et dépendante des enjeux perçus par l'ensemble des acteurs qui s'y impliquent. Il importe alors que cette interprétation ne devienne pas un "rêve animé" mais une exploration virtuelle ce qui signifie qu'elle doit avoir en soi toutes les conditions essentielles à sa réalisation.

²⁸ Définition du dictionnaire "Petit Robert".

²⁹ Une large part des simulateurs industriels fonctionne d'ailleurs au sein de l'enseignement supérieur.

7. Références bibliographiques

- [a] J. C. Moisdon, introduction à "Du mode d'existence des outils de gestion" ouvrage collectif sous la direction de Jean-Claude Moisdon, Seli Arslan, pp 7-27, 1997.
- [b] F. Taylor, « Principes d'organisation scientifique des usines », 1911.
- [c] H. Molet « Une nouvelle gestion industrielle » Editions Hermès, 1994.
- [d] E. Ballot, « La simulation industrielle : apports et limites », Compléments de l'enseignement Systèmes de Production à l'École des Mines de Paris, 1995.
- [e] A. Cernault, « La simulation des systèmes de production », Edition Cepadues, 1988.
- [f] B. Roy, « Critique et dépassement de la problématique de l'optimisation », 19??.
- [g] D. Thiel, « Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production », Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille 3, 1993.
- [h] Henri Prévost « Le bois, une économie qui marche à l'envers » dans Gérer et Comprendre - Annales des Mines, septembre, pp 28-38, 1987.
- [i] Erard J. P., Deguenon P., « Simulation par évènements discrets », Presses polytechniques et univ. romandes, Suisse, ISBN 2-88074-295-1, 1996.
- [j] Hatchuel A., Molet H. « Rational modelling in understanding and aiding human decision-making: about two case studies » European Journal of Operation Research 24, pp 178-186, 1986.
- [k] Smart T. L., Buss A. H, Kropp D. H., « Lot Splitting in Stochastic Flow-Shop and Job-Shop Environments », Decision Sciences, Vol 27, Iss 2, pp 215-238, 1996.
- [l] Kabeche D. « Planification et pilotage de la production dans les systèmes productifs "multi-centriques" » Thèse de doctorat en Ingénierie et Gestion de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996.
- [m] Proth J.M., « Conception et gestion des systèmes de production », PUF, 302p, 1992.
- [n] Pilkington R, Parkerjones C., « Interacting with Computer-Based Simulation - The Role of Dialogue », Computers & Education, Vol 27, Iss 1, pp 1-14, 1996.
- [o] Chau-PYK Bell-PC, « Decision-Support for the Design of a New Production Plant Using Visual Interactive Simulation », Journal of the Operational Research Society, Vol 45, Iss 11, pp 1273-1284, 1994.