*Revue française de Gestion industrielle*
*N° 2 - 1994*

# ANALYSE COMPORTEMENTALE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION COMPLEXE

*Pierre Massotte - IBM France*

Revue française de Gestion industrielle 0242-9780/94/02 61/$ 4.00/© AFGI

**RESUME :**

De récents travaux ont montré que les modèles développés pour étudier le comportement humain, les systèmes économiques, et aussi, les systèmes de production et de distribution mettaient en évidence la présence de régimes chaotiques. Le but de cet article est d'étudier et d'analyser de tels phénomènes dans des ateliers d'assemblage et de fabrication.
Nous avons pu montrer que le chaos déterministe pouvait être produit par les systèmes de décision humains : les équations établies pour représenter les règles de décision appliquées dans un système complexe, dès les années 1990, ont permis de conclure à l'existence du chaos, dans des régions applicables de l'espace de phase. Nous avons ensuite mis en oeuvre une démarche associée à des outils appropriés, de façon à en vérifier la présence sur des chroniques issues d'observations réelles. Une des conséquences essentielles est que de tels systèmes complexes ne peuvent être gérés par des systèmes de décision et de gestion conventionnels.
Dans un prochain article, si les lecteurs le désirent, nous analyserons les différentes méthodes et outils de gestion de production applicables dans de tels cas (complexités intrinsèque et comportementale).

**ABSTRACT:**

Recent works have shown that well-known models used for the analysis of human behaviour, in economics and in production-distribution contain unsuspected regimes of deterministic chaos. This paper is intended to study and analyse such behaviour in manufacturing and assembly shops.
We have shown how deterministic chaos could be produced by human decision making : the equations built from decision rules generally applied in a complex manufacturing system, lead to chaotic behaviour in a realistic region of parameter space. Also, we have implemented a methodology with associated tools to verify the nature of a production system and to highlight the above assumptions. Such target systems concerned by a deterministic chaos cannot be controlled through conventional management systems.

## 1 - INTRODUCTION

La modélisation est la représentation simplifiée des structures d'une réalité. En génie industriel, on s'est surtout attaché à l'aspect QUANTITATIF des systèmes étudiés. Les principes de Galilée furent souvent appliqués pour prédire le futur : l'approche est ici basée sur le fait qu'on peut formuler mathématiquement un problème à partir de paramètres, de variables et d'algorithmes. Ce principe suppose que le système est PREDICTIBLE et qu'il y a absence d'ambiguïté.

Ceci est parfaitement en accord avec l'approche déterministe définie par LAPLACE : "En connaissant à un instant T la position et la vitesse de chaque particule dans le ciel, il est alors possible de connaître le futur de l'UNIVERS".

En appliquant de tels principes dans des domaines tels que la planification ou l'ordonnancement, nous pourrions dire :"En connaissant la position , l'état et le procédé de fabrication de chaque produit dans un système de production, il est alors possible de déterminer avec précision la position et l'état de ce système dans le futur, ainsi que son mode d'évolution".

Ceci suppose bien sûr, la connaissance approfondie des nomenclatures, gammes, description technique...des produits et procédés. Cependant, en considérant des systèmes de production multi-produits et multi-procédés, impliquant des centaines d'opérations et de références, nous ne pouvons calculer et prédire un événement précis à un instant futur. Il en est de même pour le comportement dynamique de ce système: cela est simplement du a l'application des principes d'INCERTITUDES tels que les a définis HEISENBERG.

Dans ce qui suit, nous allons donc parler essentiellement de COMPLEXITE d'un système de production, et nous allons voir comment appréhender ce concept, le mettre en évidence et en mesurer le effets pour mieux les exploiter.

## 2 - COMPLEXITE

### 2.1 DEFINITIONS PRELIMINAIRES

Les systèmes Industriels ont évolué de façon continue au cours du temps: d'abord destinés à l'assemblage ou à la fabrication de produits simples, comprenant peu d'opérations élémentaires, ils sont devenus de plus en plus sophistiqués. De nos jours, il est fréquent de disposer d'ateliers permettant d'assembler des produits complexes et variés compte tenu de contraintes de flexibilité et de réactivité très strictes.

Par exemple, dans une usine de semi-conducteurs, plusieurs centaines de références de produits seront considérées. Ils seront regroupés en familles de produits correspondant à des procédés différents. Ces systèmes de production sont considérés comme complexes, et tout changement de priorité ou de règle de gestion, dans un secteur particulier, peut entraîner des perturbations inattendues plutôt qu'une amélioration de performances.

Dans ce qui suit, nous allons décrire et définir différents types de complexité relatifs à des phénomènes et des problèmes spécifiques des ateliers de fabrication ou d'assemblage.

### 2.2 TYPES DE COMPLEXITES

Trois types différents de complexité sont ici considérés. Ils correspondent à des classes de problèmes et de solutions bien particuliers.

*1 - COMPLEXITE STRUCTURELLE.*

La complexité est ici liée à la structure des produits :
* Assemblage : on considère ici des nomenclatures à plusieurs niveaux , comportant des relations verticales (arbres), mais aussi horizontales. Les problèmes rencontrés sont essentiellement dus aux difficultés de synchronisation et à la gestion des données techniques.
* Fabrication : compte tenu des problèmes d'initialisation et de synchronisation de ressources, l'ordonnancement et l'organisation des systèmes de production domineront ici.

Bien entendu, la complexité est fonction de la nature et de la taille des systèmes de production considérés.

Dans un atelier d'assemblage, les moyens de production sont souvent regroupés en fonction de la structure des nomenclatures. Les listes de matériel comprendront des arborescences simples pour certains produits mais seront complexes pour d'autres. En fonction des liens, mais aussi du nombre de niveaux, les contraintes de synchronisation et la mise en oeuvre de programmes de production requièrent des solutions complexes et des moyens informatisés prohibitifs.

*2 - COMPLEXITE INTRINSEQUE.*

La modélisation d'un système de production ne peut être réalisée dans de bonnes conditions : il est fréquent de ne disposer que de données partielles, incomplètes, incertaines et même floues. Dans ce cas, le modèle possède une fiabilité limitée. Dans le même ordre d'idées, la formalisation du problème ne pourra être approximative : c'est le cas notamment de la programmation mathématique qui est basée sur un formalisme puissant et strict mais qui est peu adaptée à la représentation de phénomènes non-linéaires ou discontinus...
Des approches de résolution cohérentes ont été élaborées dans ce sens (principle of incompatibility, Zadeh 1973).

*3 - COMPLEXITE DYNAMIQUE et CHAOS DETERMINISTE.*

Souvent, la complexité d'un système de production est d'abord structurelle. Elle devient progressivement intrinsèque. Toutefois cette évolution comporte un "chaînon manquant" : un système de production ne possédant que peu d'éléments et soumis à des règles de gestion de production simples est sujet à des événements "inattendus" et à un comportement "aléatoire" . En fait il n'en est rien, car un tel comportement est déterministe : une chose simple peut paraître complexe et la notion de complexité correspond simplement ici à la possibilité qu'a le système de posséder une grande variété d'états différents et d'en changer. De ce fait, on lui attribue à tort une propriété d'instabilité.

### 2.3 CONSEQUENCES :

Le CONSTRUCTIONISME possède des faiblesses liés aux phénomènes d'échelle et de complexité.

De nombreux systèmes de production sont difficiles à modéliser. En conséquence, l'analyse de leur comportement, comme leur prédictabilité sont limitées et ne peuvent être assurées avec les approches et technologies actuelles.

En ce sens, nous appliquerons, pour la gestion et l'ordonnancement de systèmes industriels, les principes énoncés par P.Anderson : "Le comportement de particules élémentaires en interaction et d'agrégats complexes de particules élémentaires ne peut être déterminé par extrapolation de chaque comportement élémentaire. A chaque niveau de complexité, de nouvelles caractéristiques apparaissent et doivent être étudiées et analysées avec des approches et des moyens différents et spécifiques, afin de comprendre et de déterminer le comportement du système dans sa globalité".

Ceci contredit l'approche généralement admise consistant à développer des sous-modèles pour décrire et analyser le comportement local d'un système, puis à les assembler pour en étudier le comportement global. En effet cette simplification conduit à ignorer , soit les relations intra-modèles, soit les relations inter-modèles.

Dans cet article, nous allons essentiellement porter notre attention sur la complexité dynamique d'un système que nous appellerons également : COMPLEXITE COMPORTEMENTALE.

## 3 - COMPORTEMENT D'UN SYSTEME COMPLEXE

Ne pouvant décrire de façon satisfaisante un système complexe comme un assemblage d'objets ou d'éléments associés à des lois élémentaires et complémentaires, nous utiliserons la DYNAMIQUE du CHAOS. Cette nouvelle approche mathématique est applicable ici, pour décrire les phénomènes dynamiques et en étudier la nature, en se basant sur de simples lois.

Comme nous allons le voir, un changement mineur dans une variable de contrôle peut modifier un flot stable de produits et le rendre turbulant, comme en dynamique des fluides. Nous verrons également qu'un ORDRE peut émerger du CHAOS.

## 3.1 CONDITIONS INITIALES NECESSAIRES A L'APPARITION DU CHAOS

Le CHAOS n'est pas forcément généré de façon compliquée. D'ailleurs ce qui est COMPLIQUE n'est pas toujours COMPLEXE, et vice versa. Des systèmes simples, soumis à des non-linéarités, et très sensibles à des conditions initiales seront imprédictifs et, comme en rhéologie, ils pourront avoir un attracteur de type LORENZ.

Dans ce qui suit, nous allons étudier deux types de contraintes préalables à tout comportement chaotique.

*1 - SENSIBILITE et SENSIBILITE AUX CONDITIONS INITIALES (SCI)*

La sensibilité, ou SCI, est caractéristique de nombreux systèmes bouclés, comportant des recyclages, des opérations répétitives dans une même gamme de fabrication, ou sujets à des problèmes de rendement et entraînant des effets amplificateurs.

Dans un système de production , nous appellerons un en-cours (WIP) X, et le cycle de fabrication associé (TAT) : Y. Les valeurs de X et Y pourront être très sensibles aux réparations. Pour illustrer cela, nous prendrons comme exemple l'opération simple décrite sur la figure 1.

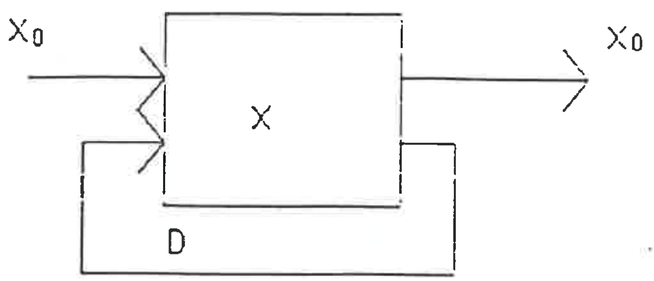



Fig.1 - Basic Cell

Dans ce cas, D% représente le rendement et X0 la demande initiale.

L'en-cours, WIP est exprimé par :

$$X = X0 / (1 - D)$$

Le cycle, représenté par le TAT : Y, peut être comparé au temps brut de fabrication, Y0 . Il suit la même règle :

$$Y = Y0 / (1 - D)$$, une fois stabilisé.

Lorsque D varie et se trouve proche de '1', X devient très grand. Cependant après une courte période de temps, le débit, que nous appellerons Z, reste constant.

*2 - NON LINEARITES et DISCONTINUITES*

Le calcul de l'évolution, ou trajectoire, du système impliquent que l'on dispose de variables et paramètres continus, un système d'équations et des relations linéaires. Ceci est aussi vrai si nous voulons pouvoir prédire, de façon simple, l'état futur de ce système.

Par exemple, les variables X, Y, et Z, à un instant T, seront linéairement combinées entre elles dans une formule. En réalité, ces variables devraient être multipliées ou divisées ensemble, élevées à la puissance...

Dans ces conditions, un ensemble d'équations peut ne pas avoir de solution algébrique. Pour cette raison, il peut être impossible de calculer sa trajectoire, donc, de prédire son comportement.

Voici quelques exemples :

- Dans un système de production, le débit est exprimé par un rapport:
  $Z = X/Y$, où 'X' est une quantité de produit et 'Y' une durée.

- Pour mettre en oeuvre les principes de Juste à Temps (JAT) ou (CFM), la demande E=X0 devra être envoyée à l'opération précédente de façon combinée aux valeurs de seuil suivantes (voir figure 2) :
  $X01 = \mathrm{Min}(X1, X2) = Qmin$ or $X02 = MAQ = Qmax$

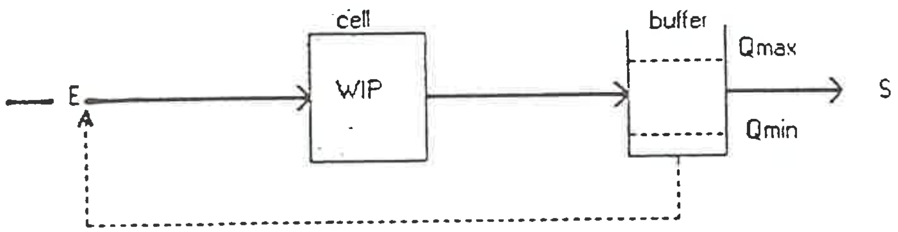



Fig.2 - Nonlinear Basic Cell

L' information relative à X0 est déterminée par le WIP lorsqu'il atteint la valeur maximum de seuil appelée : Maximum Allowable Quantity (MAQ).

- Dans un atelier flexible, certaines entités peuvent être très autonomes, la gestion de production étant elle même distribuée. Ici aussi en raison des interactions et des phénomènes de propagation, nous aurons des systèmes non-linéaires et cela rendra la gestion de l'ensemble très complexe.

## 3.2 ANALYSE MATHEMATIQUE DU CHAOS

Dans une ligne flexible, une cellule sera affectée à plusieurs opérations. Il est donc fréquent de voir un même produit subir plusieurs opérations au même endroit. De la même façon, une gamme de fabrication complexe implique des opérations répétitives et il sera possible de voir des produits reboucler des dizaines de fois dans une même cellule.

Suite aux différents rebouclages, mais aussi aux non-linéarités, l'inventaire appelé : variable d'état X, varie au cours du temps. On suit donc son évolution par Xn+1 à partir de Xn.

L'expression mathématique de X dans le temps sera exprimé par :

$$dX/d(t) = Fn(X,L)$$

Dans cette formule, L représente un ensemble de paramètres de contrôle qui influencent l'évolution du système.

Quelle que soit la forme de Fn, lorsqu'un état stable, ou un régime spécifique, est atteint, la solution d'équilibre est définie par :

$$Fn(X,L) = 0.$$

Une modélisation étant toujours une abstraction, mais aussi une simplification, de la réalité, un système de production ne pourra toujours se ramener à un ensemble complet d'équations mathématiques. Nous limiterons ici l'étude , pour illustrer le phénomène de chaos, à un simple circuit comprenant des boucles de retour, comme illustré sur la figure 3.

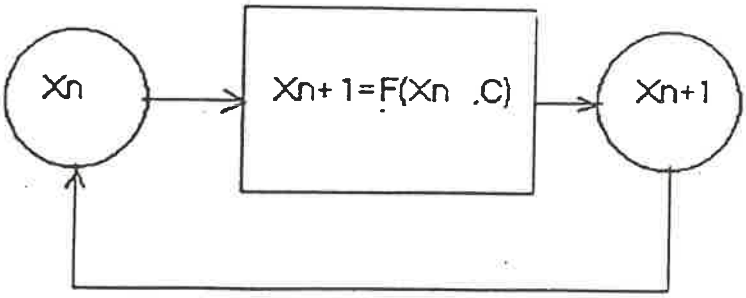



Fig.3 - Closed Loop System

Il s'agit d'une fonction non-linéaire liant la valeur d'état (X) au paramètre de contrôle (C) aux étapes n et n+1.
F(Xn,C) agit comme un facteur amplificateur et conduira à un CHAOS.

Dans les 2 cas, (n) est l'index indiquant le nombre de passage d'un produit dans une cellule, F(Xn,C) représente la fonction dynamique propageant X de sa valeur X0 à X1, X2, ...Xi...

La suite des points X est appelée "trajectoire", ou "orbite", du système. Elle en décrit la dynamique chaotique. Lorsque cette courbe a une forme symétrique, ou ordonnée, on dira que le système possède une dynamique d'ordre.

Après un certain nombre de boucles, ou de recyclages, la quantité de produit présente dans le système est définie par : $Xn = ( 1 + R )n . Xo$
X0 représente la taille du lot initial dans la cellule.

En réalité, une croissance exponentielle de l'en cours n'apparaîtra pas car :

* la capacité de traitement d'une cellule est limitée a Xm
* le rendement, fonction de R, est variable et se réduit lorsque l'inventaire est proche de X.
* les ressources affectées au système de production sont fonction de la criticité de la situation. Une autorégulation est toujours présente.

En pratique, lorsque la taille de la population croit trop rapidement, des phénomènes d'auto-contrôle vont apparaître :

*1 - LIMITATIONS PAR LE "MAQ" :*

Le "Maximum Allowable Quantity (MAQ)" permet la régulation ainsi que la limitation du flot de produits dans un atelier. L'entrée des pièces est limitée par le système de contrôle du stock tampon. Quand le seuil maximum est atteint, le flot des pièces est limité par effet de "cascade amont". En appelant X l'inventaire, son évolution sera représenté par :

$$Xn+1 = (( 1 - A )+ R ).Xn$$

Avec : A= C1.Xn et : C1= 1/X .
C1 est défini par 'O' quand X est égal à Xn.

Dans ce cas, nous avons la formule générale :

$$X_{n+1} = (1 + R - (1/X).X_n).X_n$$

A l'état stable, quand la limite est atteinte, l'en-cours devient :

$$X_{n+1} = X_n + X_n.(R - X_n/X)$$

En choisissant une métrique appropriée, la formule simplifiée devient :

$$\underline{X = (1+R).X - X^2}$$

Le graphe des trajectoires est en figure 4. comme nous pouvons le voir, le comportement de la cellule est un chaos déterministe. Cette situation apparaît dès que R >= 2 , c'est à dire pour un rendement inférieur à 50% ( D<=.5 ).

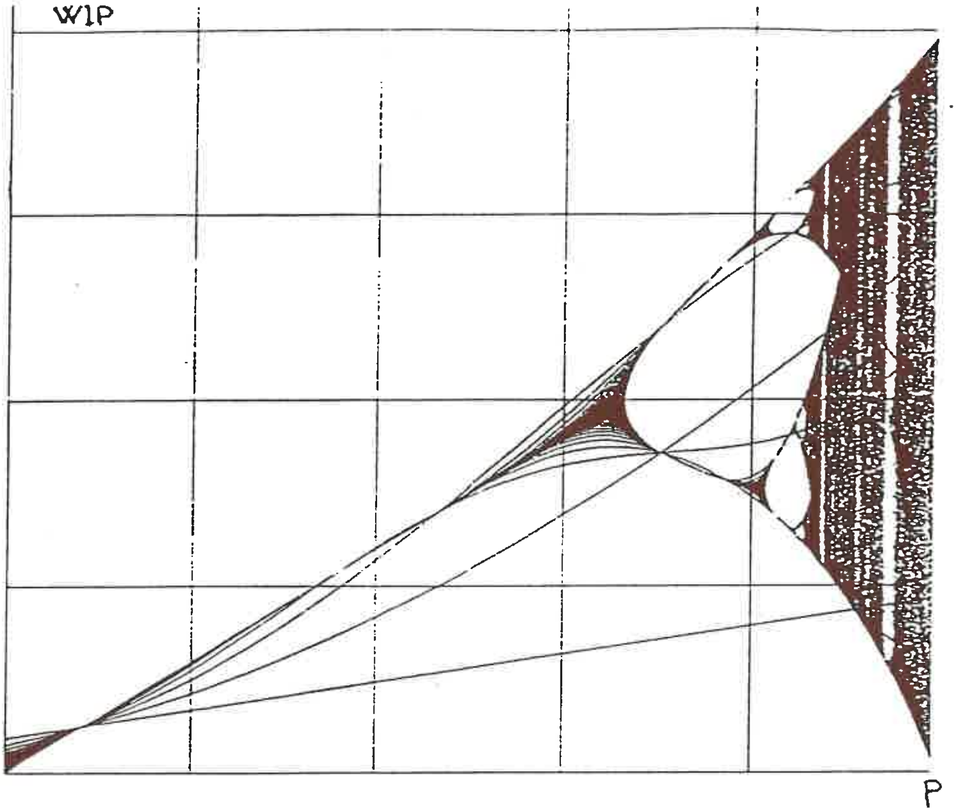



Fig.4 - Phase Plane Trajectories (MAQ)

Mise en évidence des BIFURCATIONS :

* La première bifurcation est trouvée lorsque

$$F(X)=X .$$

Dans ce cas, 2 solutions sont possibles :

$$X=0 \text{ et } X=R.$$

Alors, $F'(0)=1+R$ et $F'(R)=1-R$.
Sachant que $R>0$, $X=R$ est alors valide.

La bifurcation est atteinte pour

$$abs[F'(X)]=1$$

c'est à dire quand : $R=2$ et $X=2$.

* La seconde bifurcation est définie par

$$F2(X)=X \Longrightarrow -X2+(R+2)X-(R+2)=0.$$

alors :

$$X1=( (R+2)+((R2-4)^{*}.5)/2$$

et :

$$X2=((R+2)-((R2-4)^{*}.5)/2$$

On peut en déduire :

$$R=2.45 , X1=.517 \text{ et } X2=2.931$$

Ces observations concernent également les systèmes de production où un ensemble d'opérations est dupliqué.

## 2 - *LIMITATIONS PAR REGLES D'AFFECTATION ("DISPATCHING RULES") :*

Les règles d'affectation peuvent être changées de façon à ne pas pénaliser le flot principal des pièces, en donnant une priorité moindre aux produits recyclés ou faisant l'objet de réparations au niveau d'une cellule.

Dans ce cas, le taux de croissance R sera progressivement limité par un seuil et aura pour valeur : $R - C2.Xn$, avec $C2 = R/X$.

La croissance de la population s'annule lorsque :

Xn =Xm (Xm étant la limite supérieure de X).

Ainsi,

$$Xn+1 = ( 1+R-C2.Xn).Xn$$

lorsque C2 est remplacé par sa valeur, on obtient :

$$Xn+1 = Xn + R.Xn.( 1 - Xn/X )$$

Comme précisé plus haut, la formule, à l'état stationnaire devient :

$$\underline{X = X + R.X ( 1 - X )}$$

Le graphe représentatif est à la figure 5.

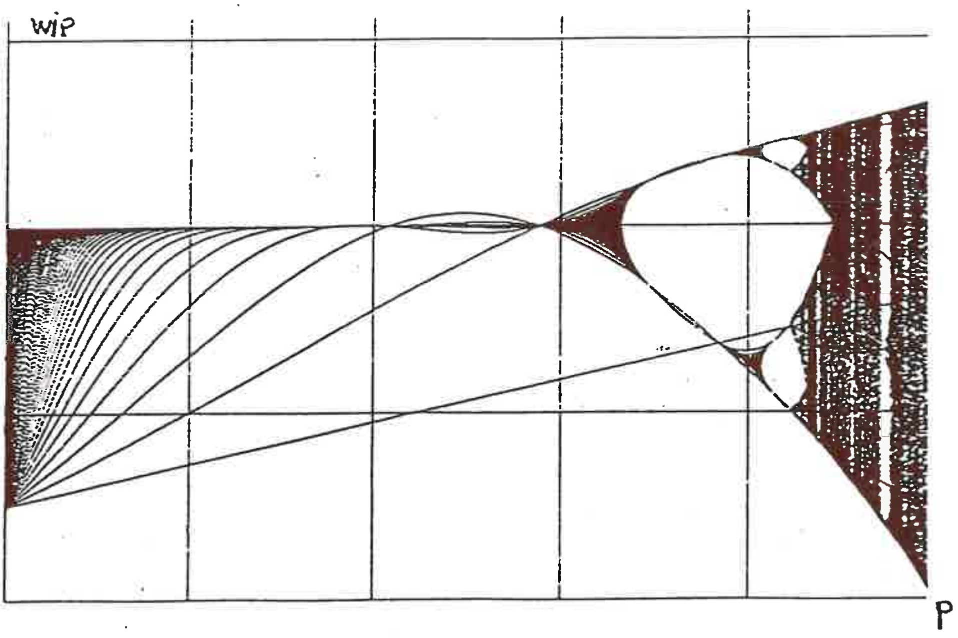



Fig.5 - Phase Plane Trajectories (Dispatching)

Là encore, le comportement est un chaos déterministe.

* La première bifurcation apparaît lorsque $F(X)=X$, alors $X=0$ ou $X=R$
Nous pouvons ainsi définir :

$$F'(0)=1+R \text{ et } F'(R)=1-R$$

donc :

$$R=2 \text{ et } X=2$$

* La seconde bifurcation est obtenue pour $F2(X)=X$
alors :

$$-X2+(R+2)X-(R+2)=0$$

donne X1 et X2 comme précédemment.
avec R=2.45, on peut en déduire

$$X1=.619 \text{ et } X2=1.197$$

Ces formules sont donc similaires aux fameuses équations définies en 1845 par P.F Verhulst.

### *3 - GESTION DES GOULOTS D'ETRANGLEMENT*

Les usines de semi-conducteurs, par exemple, sont par nature multi-produits (plusieurs centaines de références) et multi-process (gammes différentes et personnalisées). De plus, l'organisation en ateliers flexibles fait que certaines opérations sont souvent reprises ou répétées : masque, nettoyage, tests de mortalité...Les équipements sont polyvalents, onéreux et de mise en oeuvre parfois complexes. Heureusement ils sont peu nombreux mais imposent une gestion de production sophistiquée et sont souvent à l'origine de goulots d'étranglement. C'est pour cela que les efforts sont concentrés sur ces postes afin d'en gérer les files d'attente, d'en optimiser les flux de produits et les taux d'utilisation.

Il est fréquent que la stratégie suivante soit adoptée : "si une opération est source de congestion, ne jamais la sous-charger. Dès que la file d'attente est réduite , en dessous d'un certain seuil, charger la cellule correspondante avec les produits possédant le temps de traitement le plus élevé". On n'est donc pas géré par la demande, ni par le programme... mais par l'équipement. Est ce la bonne solution ? Nous le verrons plus tard !

Soient Xb et Tb, les valeurs de l'en-cours (WIP) et du seuil admis au niveau du goulot.
La valeur de l'en cours évolue suivant la formule suivante :

$$X_{n+1} = X_n + K.(T_b - X_b) - X_b \text{ , avec } K=f(1/X_b).$$

Cette formule peut aussi s'exprimer par :

$$X_{n+1} = X_n + C.( 1 + X - T/X ),$$

où C est une constante jouant le rôle de paramètre de contrôle.
A l'état stationnaire, on obtient la formule générale :

$$\underline{X = X + C/X.(X^2 + X - T)}$$

Ici encore, le comportement de l'en cours est chaotique.

## 4 - VALIDATION DES CONCEPTS

Dans la section précédente, on a mis en évidence la présence de chaos à partir de la modélisation de cellules de base, simples. En fait, la modélisation d'un atelier complet est compliquée : de nombreuses cellules sont imbriquées et l'approche mathématique, seule, n'est pas suffisante.

L'objectif est maintenant de valider ces hypothèses en vérifiant, à partir d'observations, que les résultats trouvés sont applicables et que de tels comportements existent dans la réalité.

Cette démarche est nécessaire car l'impact au niveau des méthodes de gestion de production est primordial. En effet, chaque type de comportement, chaque classe de problèmes induisent des principes et méthodes appropriés.

Dans cet esprit, un ensemble d'outils de simulation, des techniques d'analyse d'images et des tests, ont été mis en oeuvre pour :

* vérifier la présence de phénomènes chaotiques dans un système de production
* mesurer et visualiser de tels phénomènes dans les systèmes étudiés.

## 4.1 DETECTION DU CHAOS DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION

1 - Des **approches mathématiques** peuvent être utilisées pour détecter la présence de chaos dans un système dynamique. La plupart d'entre elles sont qualitatives et sont en mesure d'en analyser avec un bon niveau de confiance. Parmi celles-ci, nous avons mis en oeuvre et expérimenté :

* analyse spectrale : un programme utilisant les transformations rapides de Fourrier (FFT) a été développé pour étudier les grands ensembles de données.
* analyse de diagramme des phases ( un outil de visualisation 3-D appelé GALAXY a été mis en oeuvre sur RS/6000).
* analyse de coupes de Poincaré
* test de Sugihara May.

Les commentaires que nous pouvons émettre sont les suivants : toutes ces approches permettent de décrire, de visualiser ou de vérifier la présence de comportements chaotiques dans un système dynamique.
Cependant durant nos expériences, nous n'avons pu confirmer de façon "claire", c'est à dire avec un risque suffisant, l'existence de chaos.

Les meilleurs résultats furent obtenus avec la méthode FFT. Nous avons réalisé des analyses sur des séries chronologiques journalières concernant la livraison de modules électroniques (TCM) : ce n'est que récemment que la présence d'un spectre continu fut observé. Ceci fut un résultat important et encourageant dans le cadre de cette étude.

2 - Pour améliorer **l'analyse comportementale** d'un système de production, une approche quantitative, différente a été mise en oeuvre. Elle est basée sur l'étude des exposants de LYAPUNOV. Cette approche repose sur la mesure de la déviation de la trajectoire près d'un attracteur et permet de prédire la situation d'un système dynamique.
Dans ce qui suit nous ne détaillerons pas le calcul ni le principe sous-jacent de cette méthode. Nous rappellerons néanmoins les conditions liées a la valeur de deux exposants :

* SI Lambda et Sigma sont positifs, ALORS le système est chaotique.

Là encore, nous avons éprouvé des difficultés pour mettre en oeuvre la méthode des coefficients de LYAPUNOV et nous avons fait appel à des approches complémentaires.

Le commentaire que nous pouvons faire est le suivant : l'analyse fiable du comportement d'un système de production nécessite un grand nombre d'observations (environ 10D/3, D étant la dimension de l'attracteur).

Au début de nos expériences, nous n'avions pas été en mesure de collecter un ensemble suffisant de données pour valider nos hypothèses. Pour mémoire, l'usine IBM de Montpellier a la charge d'assembler et de tester des modules électroniques intégrés appelés TCM, pour les calculateurs haut de gamme. Le système informatique collecte et enregistre l'évolution journalière des inventaires.

La durée de vie d'une famille de produits étant de 3 ans environ, nous disposions de séries de 1000 valeurs. Dans ces conditions, il était difficile de confirmer, avec une probabilité suffisante, la présence de chaos dans ces lignes d'assemblage.

3 - **Génération d'informations** : une solution au problème précédent consiste à modéliser le système de production, et à le simuler afin de générer des ensembles de valeurs significatifs. La simulation est une bonne approche pour représenter un système de production complexe, en prenant en compte des particularités mais aussi des règles de gestion spécifiques... mieux que ne peut le faire une approche analytique.

Deux approches ont été développées :

* simulation à partir de DSL (Dynamic Simulation Language) : DSL est un langage de haut niveau permettant la simulation continue d'un système de production. On utilise un ensemble d'équations différentielles pour décrire le système et on les résoud pour en étudier le comportement dynamique.
  DSL est particulièrement bien adapté pour l'analyse des phénomènes transitoires et nous avons pu ainsi analyser de nombreux modèles de production.
* NETSIM : Cet outil développé en SMALLTALK permet de modéliser des réseaux de production. Chaque noeud du réseau

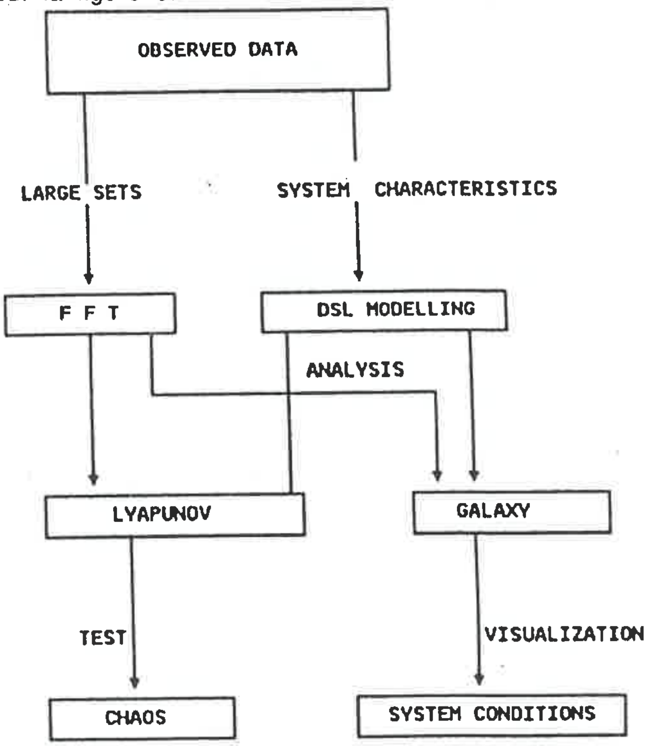
peut être un équipement ou une cellule. Les noeuds sont reliés entre eux par des arcs représentant les flux de produits et possèdent une méthode qui régit le mode de fonctionnement et de gestion de chaque entité. NETSIM est un outil orienté objet, facile d'emploi.

DSL et NETSIM furent très utiles pour générer de longs vecteurs de données, représentatifs de systèmes de production. Ces données ont été utilisées comme entrée de programme de LYAPUNOV pour calculer les exposants associés au système dynamique en cours d'étude.

Dans de nombreux cas nous avons mis en évidence des phénomènes cycliques à 16, 24 ou 32 périodes de temps. Nous avons pu également montrer que certains ateliers possédaient un chaos faible.

## 4.2 METHODOLOGIE

La définition de la nature d'un système dynamique requiert la mise en oeuvre de plusieurs outils. Nous avons pu déterminer que l'enchaînement de plusieurs approches était possible et souhaitable, compte tenu des caractéristiques et de la nature des observations. Ceci est illustré sur la figure 6.



Cette démarche a été utilisée avec succès dans de nombreux cas :

* Chaque fois que les séries numériques sont insuffisantes (en nombre d'observations), la simulation basée sur DSL doit être utilisée.

La difficulté est de choisir les paramètres significatifs, mais ceci est un problème classique de modélisation.

* FFT est un bon outil pour analyser des spectres de valeurs.

Cependant la FFT n'est qu'une aide, sur le plan de la visualisation, et la preuve de l'existence de chaos doit être basée sur la méthode de LYAPUNOV.

* Enfin, l'analyse qualitative est une aide utile pour montrer comment les variables et paramètres d'un système dynamique peuvent être combinées et pour représenter des trajectoires périodiques ou non dans un espace de phases.

### 4.3 APPLICATION : RESULTATS OBTENUS SUR UN SYSTEME DE PRODUCTION

Nous avons étudié plusieurs systèmes de production et effectué des essais sur une longue période de temps.

Les 2 caractéristiques analysées furent les en-cours (WIP) et les cycles de fabrication (TAT). Ce sont des variables dont il est difficile de prédire l'évolution. Pour cette raison, nous avons utilisé la modélisation analytique et nous avons ainsi démontré qu'il existait une forte présomption quant à la présence de chaos, au niveau du WIP et du débit.

Dans chaque cas, nous avons maintenu une demande constante. Le paramètre de contrôle est la taille des Kanbans.

Le modèle mathématique conduit à la présence de chaos. Toutefois, nous ne pouvons être pleinement affirmatif sur le chaos observé, dans un système réel, pour les raisons suivantes :

* les rendements, au niveau des boucles de retour, sont variables.
* le nombre de variables d'état dont dépend la complexité du système, varie en fonction des modifications du procédé de fabrication et des gammes.
* les vecteurs de valeurs sont limités dans un système de collecte de données industrielles. Ils comportent également des manquants (les valeurs aberrantes par contre ne sont pas à rejeter car elles peuvent découler d'un chaos).
* On peut facilement mettre en évidence les phénomènes de "pompage" avec des changements d'états comme : état stable, bifurcations et doublements de cascade... mais le passage au chaos est malaisé.
* En vérifiant les séries de nombres, on peut faire correspondre à certaines anomalies, des événements tels que stimulus externe, pannes... qui influencent la chronique.

Comme on l'a déjà laissé supposer, il convient donc d'être toujours prudent : l'approche mathématique met en évidence un comportement chaotique mais... compte tenu des difficultés de collecte et de mesure, nous n'avons pas toujours un ensemble de données suffisant et fiable.

Les conclusions doivent donc toujours être validées avec prudence. Nous pouvons dire que dans la plupart des cas la probabilité de chaos est forte. Ce n'est que récemment, dans le cas de la production de TCM's, que nous avons pu mettre en évidence et de manière quasi certaine ( car la probabilité "1" n'existe pas) un comportement chaotique.

Compte tenu de ce "STRONG BELIEF", comme le diraient nos amis, nous partirons donc de l'hypothèse "UN SYSTEME DE PRODUCTION COMPLEXE A UN COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE TYPE CHAOTIQUE" pour concevoir et mettre en oeuvre des systèmes de contrôle et de gestion de production appropriés et optimaux.

## 5 - ANALYSE DES SYSTEMES DE CONTROLE DANS LES ATELIERS

### 5.1 INTRODUCTION

Nous avons vu précédemment comment mettre en évidence des comportements chaotiques dans des systèmes de production.
Le but de ce paragraphe est d'étudier deux familles de systèmes de contrôle largement utilisés dans l'industrie et décrits dans les approches CIM.
La classification qui en découle permettra de définir la bonne stratégie à appliquer pour chaque type de situation.
Dans ce qui suit le système de production considéré sera soumis à une demande , appelée DM, de nature stochastique ou chaotique.

### 5.2 CAS 1 : SYSTEME PLANIFIE

Considérons tout d'abord un atelier géré par MRP. Par ailleurs, il contient des boucles de retour d'information. Plusieurs ateliers du même type seront interconnectés pour former une usine complète. Le problème consiste donc à analyser le comportement d'un tel système : pour ce faire, nous avons fait appel à la DYNAMIQUE des SYSTEMES. Nous avons appliqué cette démarche pour étudier l'influence dynamique des interactions entre des usines puces <--> cartes <--> ordinateurs.

#### MODELISATION

Un modèle à été développé avec le langage DYNAMO. Il a été soumis à une demande échelon DM, au niveau ordinateurs. L'objectif est ici d'analyser l'impact sur l'évolution des en-cours. La modélisation sous formes d'équations différentielles fut très simple et l'on a intégré des paramètres variables (taille des stocks tampons, délais de réponse...).Dans ce cas, l'en-cours, au niveau puces a évolué comme indiqué sur la figure 7 : lorsque DM varie, le système de production est soumis à une variation décroissante du WIP. Pour certaines valeurs des paramètres de contrôle, on observe un maintien des oscillations. Ce phénomène très connu des logisticiens est appelé "effet de pompage". Ces oscillations sont plus ou moins amplifiées en fonction du taux de retour sur les boucles, et dans certains cas, le phénomène devient chaotique.

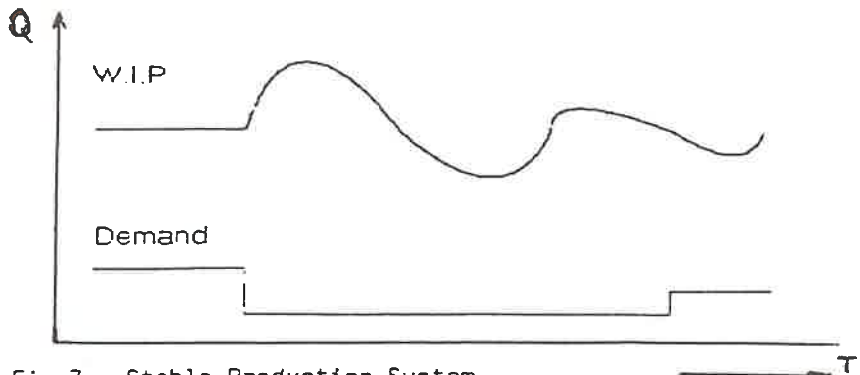



Fig.7 - Stable Production System

DEMANDE CHAOTIQUE

Nous considérons ici un atelier d'assemblage des modules TCM. Le système de production est modélisé et simulé avec un langage appelé RESQ.

Nous supposons ici que la demande est chaotique, comme indiqué sur la figure 8. Contrairement aux àpparences, la demande initiale DM n'est pas aléatoire. Pour des raisons que nous n'expliquerons pas ici, mais que nous avons mis du temps à élucider, le vecteur DM possède un effet de "MEMOIRE" des situations et des événements précédents. En fait, DM est le résultat d'une demande déterministe modifiée par de nombreuses et simples perturbations, des à coups et des soubresauts générés par des décideurs... Dans cette étude, nous n'avions pas de données suffisantes pour affirmer avec certitude que DM était chaotique. Néanmoins la probabilité étant forte, nous avons considéré cette hypothèse.

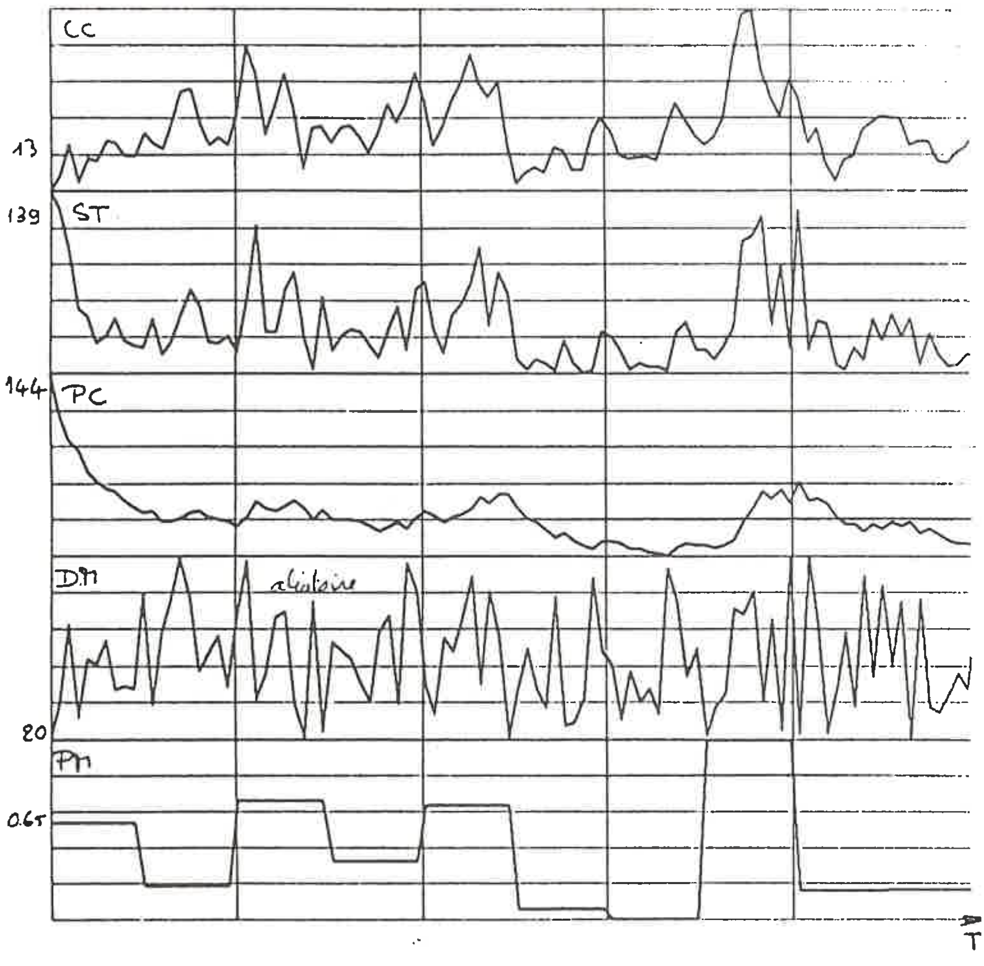



**Fig.8 - Behaviour Analysis of the TCM Production system**

Les courbes décrivant l'évolution des différentes variables dans le temps sont représentées sur la figure 8. La production est représentée par (PC). L'évolution du fichier de commande est (CC), l'en-cours (ST) suit la demande (DM). Cependant, à cause des stocks tampons, (nombre, taille, temps de réponse...), les résultats peuvent être lissés, atténués, ou même amplifiés. Lorsque les stocks tampons sont trop importants, et les rendements faibles, le système peut même diverger : dans ce cas, le bruit est amplifié.

La réaction normale est de réagir pour tenter de compenser les variations. Dans ce cas nous avons un système de gestion trop 'planifiant' entraînant des variations dangereuses, inattendues et non prévisibles : changements et soubresauts. Ceci est normal car les systèmes de gestion de production usuels ne sont pas conçus pour traiter des programmes chaotiques. Dans de tels systèmes de production, ils ne peuvent qu'en dégrader les performances globales.

On en déduit donc que les systèmes de gestion planifiants, si rassurants et fort utiles par ailleurs, ne sont pas les mieux adaptés à certains types de comportements dynamiques.

Nous pourrions déjà proposer de piloter des systèmes instables avec du BRUIT plutôt que LINEAIREMENT pour mieux contrecarrer les effets du pompage. En introduisant du bruit et de l'incertain dans les paramètres de contrôle ainsi que dans les stimuli et les variables d'entrée, on a certainement la possibilité de compenser, ou même de supprimer, les à coups.

## COMMENTAIRES

Nous ne détaillerons pas ici les recommandations destinées à améliorer un système de gestion de la production puisque cet article est destiné avant tout à mettre en valeur des comportements dynamiques inhabituels propres à des systèmes de production en situation particulière.

Nous dirons simplement que les systèmes de gestion planifiants sont , comme leur nom l'indique, destinés à préparer un système de production mais non à le gèrer au mieux. Dans certains cas, ils sont même inutiles car trop contraignants. Ils sont parfois inaptes à maîtriser un système de production complet. Les questions qui en découlent sont donc :

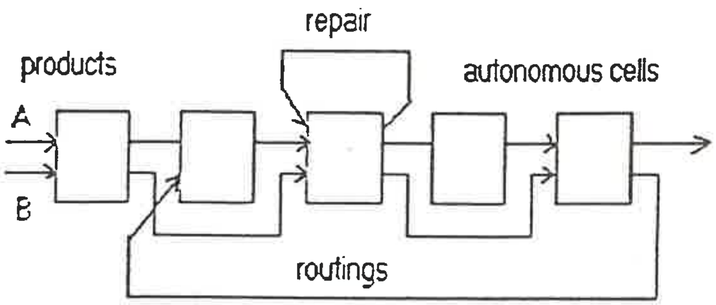
* Quelle organisation doit-on proposer ?
* Quel type de modélisation choisir pour analyser une demande variable ?

Quel que soit le niveau de complexité inclus dans le modèle d'un tel système, nous ne pouvons tout représenter sans risque de générer du bruit.

De même, il est fréquent que les décideurs introduisent du bruit : ils peuvent modifier, en permanence, les priorités des produits dans l'atelier, en fonction des changements de situation et des demandes contradictoires. En fait ils créent encore plus de perturbations et d'à coups. Les capacités du système de production étant limitées, certains produits sont pénalisés par rapport à d'autres... l'effet de "buffer" est amplifié.

### 5.3 CAS 2 : SYSTEME DE PRODUCTION FLEXIBLE

Considérons un atelier flexible : multi-produits, multi-process, équipements dupliqués, boucles de retour... et gammes compliquées (figure 9).



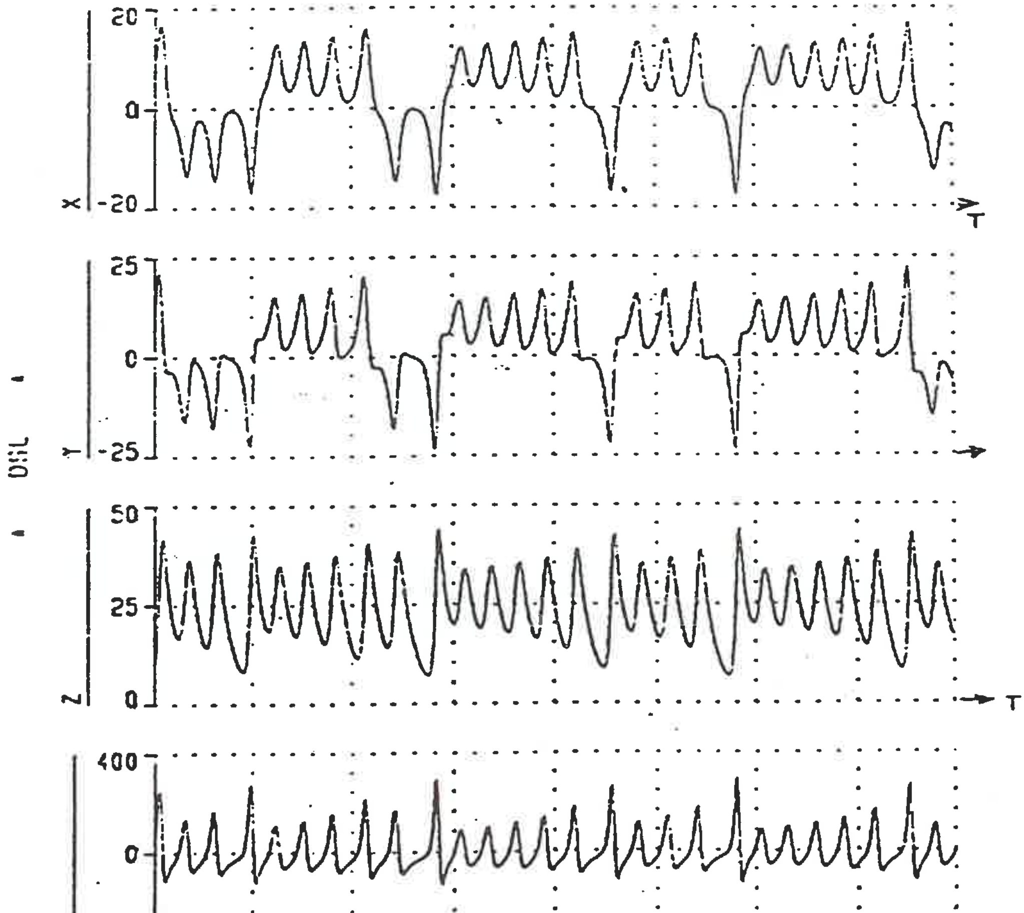



Fig.9 - Flexible Manufacturing System

La situation est favorable pour qu'il y ait un comportement chaotique. Chaque noeud, ou cellule, dans un tel système de production aura son propre système de contrôle et ses procédures comportementales.

Ici, le chaos sera essentiellement dû aux interactions entre cellules : des oscillations crées par les appels et les ordres du système de gestion de production vont se propager d'une cellule à l'autre et vice versa. .En pratique, ceci induit de nombreux états possibles pour le système de production. Lorsque celui est sujet à des fonctions non-linéaires et que les phénomènes sont amplifiés, le rendant sensible aux conditions initiales (SIC), il y a alors possibilité de chaos. Ceci est dû aux effets d'enchaînement propres à la structure physique et logique du système de production. Nous appellerons cela "effet CATERPILLAR".

Dans ces conditions, nous ne pouvons prédire le comportement d'un tel système. Le modèle correspondant à un atelier réel est relativement complexe et ne peut intégrer tous les paramètres et hypothèses : il n'est pas utilisable dans un but de pilotage.

En termes d'effets, chaque cellule a sa propre élasticité et les perturbations s'auto-compensent. Avec des stocks tampons réduits, l'adaptation des entrées et des sorties est plutôt rapide grâce à des effets d'autorégulation.

Plus généralement, nous recherchons des situations du système de production qui le placent à la limite des états stables et instables. Lorsqu'il correspond au "chaos faible", ce qui est facile à obtenir dans des ateliers non-linéaires, sa flexibilité est maximum.

Ceci sera étudié plus tard. Il faut noter toutefois que ces concepts sont à la base d'un projet international appelé GNOSIS dans le cadre du programme Japonais IMS (Intelligent Manufacturing Systems).

## 6 - CONCLUSIONS

Cet article a été consacré à l'étude des systèmes complexes. Plus précisément, nous avons porté l'effort sur leur comportement dynamique.
La plupart des systèmes de production peuvent être sujets à du chaos déterministe que l'on appelle effet PAPILLON ou effet CHENILLE. Ces propriétés impliquent le développement de technologies destinées à

détecter le chaos, avec une bonne fiabilité. L'approche que nous avons définie s'est montrée efficace, et nous avons pu observer du chaos dans des systèmes de production réels. Cela fut parfois difficile mais nous y sommes parvenus récemment.

Dans de telles conditions, les systèmes conventionnels de gestion et de pilotage ne peuvent s'appliquer : les systèmes de production sont non prédictibles et difficiles à contrôler. On ne peut donc les forcer à réagir à certains stimuli et commandes, et de nouvelles approches de gestion doivent être envisagées. C'est ce que nous développerons plus tard. En effet nous ne pouvons réagir à la complexité par plus de complexité.

Plus le système est complexe, plus le système de pilotage doit être simple.

Ceci remet fondamentalement en cause les concepts CIM , qui, mal appliqués conduisent à des systèmes de flux d'informations trop contraints et trop centralisés, alors que, comme nous l'avons perçu, nous devons miser sur des systèmes plus libres, autonomes et distribués.

Dans les systèmes de production impliqués par le chaos déterministe, le système n'est que difficilement contrôlé de l'extérieur. Il doit donc posséder des propriétés d'auto-organisation pour s'adapter à de nouvelles situations, tout en restant à l'intérieur d'un cadre de liberté.

Nous devons enfin préciser que dans l'industrie, il est fréquent de penser qu'un système a un comportement erratique et aléatoire lorsqu'il devient incontrôlable, alors qu'il est simplement soumis à un phénomène chaotique. Ceci est important dans la mesure où le chaos génère de l'ordre : dans un tel cas, le système de production est donc contrôlable et de nouveaux concepts doivent donc être développés. C'est un des objectifs du programme international IMS.

Certaines des approches décrites dans cet article ont été mises en oeuvre avec succès dans l'atelier d'assemblage des TCM, à l'usine de Montpellier et des outils de gestion de production appropriés ont pu être conçus dans le but d'améliorer et d'optimiser les flux de produits (LMA : Line Management Advisor, basé sur des techniques d'intelligence artificielle).

## ABREVIATIONS

| | |
|---|---|
| AI | Artificial Intelligence |
| BAT | Bond Assembly and Test |
| DSS | Decision Support System |
| DSL | Dynamic Simulation Language |
| FCS | Floor Control System |
| FFT | Fast Fourrier Transform |
| FMS | Flexible Manufacturing Systems |
| KBS | Knowledge Based System |
| MAQ | Maximum Allowable Quantity |
| MCS | Manufacturing Control System |
| MRP | Material Requirements Planning |
| NC | Numerical Control |
| RESQ | Research Queuing Package |
| SIC | Sensitivity to Initial Cond. |
| TAT | Turn Around Time |
| TCM | Thermal control Module |
| WIP | Work In Process |

## BIBLIOGRAPHIE

- MIDOUX.N - Mécanique et rheologie des fluides en génie chimique. - Lavoisier - 1983

- HAKEN.H - Synergetics - Springer Verlag - 1978

- TITLI.A - Analyse et commande des systèmes complexes - AFCET - 1979

- DEVLIN.K - Mathematics: The new golden age - Penguin

- PAO Y.H - Adaptive pattern recognition and Neural networks - Addison Wesley - 1989.

- GREENE .J.H - Production and Inventory Control handbook. Mac Graw Hill ( 1987 ).

- GIARD.V - Gestion de la production. Calcul économique - Economica (1987).

- TEMMYO.T HASEGAWA.M MATSUKA.H - Distribution control in manufacturing cells. IBM TRL (IROS 1988)

- BANKER.R.D DATAR.S.M. KEKRE.S MUKHOPADHYAY.T Costs of products and process complexity -Carnegie Mellon University ( EDRC grant 8522616 ).

- LESOURNE.J - The O.R contribution to strategy formulation in a turbulent environment. European Journal of O.R ( N38, P 286-289) North holland - 1989.

- MOSEKILDE.E LARSEN.E.R STERMAN.J.D
Coping with complexity: Deterministic chaos in Human decision making. TIMS Conference- OSAKA - Japan 1989.

- BERGE.P POMEAU.Y VIDAL.C
L'odre dans le chaos
Hermann - 1988.

- PEREZ.JC
De nouvelles voies vers l'intelligence artificielle
Masson - 1988

- ZEIGLER.B.P - Hierarchical modular discrete-event modelling in an object oriented environment
SIMULATION ( 49-5 P 219-230 ) 1987.

- STERMAN J.D - Deterministic chaos of human behavior:
Methodological issues and experimental results.
System Dynamics review Vol 4 - 1988

- ARECCHI.F.T Caos e ordine nella fisica
Il nuevo saggitatore (Soc It. di Fisica)
Vol 1- N3- P35 - 1985.

- LESOURNE.J - Un système autopoetique: le marché.
AFCET - Revue de systemique. Vol 1-2, 1987.

- E.TSE, LEE.H, BEVAN WU - Computer Integrated Manufacturing Enterprise Management Systems

- Intelligent Manufacturing Systems II (Dubrovnik - 1987).

- BALMES.R - Flexible Line Simulator (FLI) - Functional Specifications - (Montpellier - 1989)

- BEAUDOIN.J, MASSOTTE.P - Line Manager Advisor (LMA) Technical Report # 79079. Montpellier , 1990

- BEZIAT.P, MASSOTTE.P - Plant Layout Optimization (PLOOT) A tool using Group Technology and simulated annealing (MICAD - 1989)

- HAYNES B.R, BILLINGS S.A - Qualitative Analysis of Chaos in nonlinear Data Systems and System Identification - Journal of Systems Engineering V2-N2-1992.

- PROTH. JM. Conception et Gestion des Systemes de Production (PUF), 1992.

- DAVIS L. Handbook of Genetic Algorithms. (VNR - 1991).-PAGE :13.