

Flexibilité du réseau d'évacuation d'un site industriel, le cas EUROFARAD

ADRIEN LELIEVRE¹, SEVERINE DURIEUX², SAMIR LAMOURI¹

¹ Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux SUPMECA, 3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint-Ouen Cedex, France

² Laboratoire de recherche d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes IFMA, Campus des Cézeaux, BP 265, 63175 Aubière, France

adrien.lelievre@ecp.fr, durieux@ifma.fr, samir.lamouri@supmeca.fr

Résumé — Dans un environnement économique décrit comme turbulent, la flexibilité est perçue comme un facteur clé de succès que les entreprises doivent maximiser. Pourtant, la notion de flexibilité est souvent présentée comme un concept relatif au domaine étudié. Le résultat de cette tendance fait de la flexibilité un concept difficile à appréhender de façon globale. Nous proposerons donc d'introduire la notion de potentialité, que nous définirons comme un dénominateur commun des différentes approches de la flexibilité. La potentialité nous permettra également de concevoir la flexibilité comme un levier d'action à optimiser plutôt qu'un objectif absolu à maximiser. Nous illustrerons notre propos par l'optimisation de la flexibilité du réseau d'évacuation d'eau du nouveau site industriel d'Eurofarad. Nous utiliserons la valeur actualisée nette comme critère d'efficacité à travers une simulation de Monte-Carlo pour comparer les scénarii alternatifs selon le principe du bilan différentiel.

Mots clés — Flexibilité, efficacité, potentialité, simulation de Monte Carlo.

I. INTRODUCTION

La littérature récente sur les systèmes de production identifie un besoin de plus en plus pressant pour un système en parfaite symbiose avec son environnement. Dès 1961, certains auteurs des théories des organisations comme Burns et Stalker [4] s'inspirent de systèmes biologiques pour modéliser la structure organique de celles-ci. On assiste ensuite, au début des années 80, à l'introduction du concept de « Supply Chain » [20]. Ces approches illustrent le changement radical de perception d'un système productif indépendant et autonome en un élément constitutif d'un tout et en interaction avec celui-ci. De plus, l'analyse de l'environnement économique montre de profondes mutations durant cette période. Ainsi, l'un des enjeux majeurs devient : la conception d'un système adapté aux environnements turbulents, aux évolutions incertaines.

Dans ce cadre, c'est l'ensemble de l'entreprise qui a cessé de se concevoir comme un système isolé depuis que les rapports entre l'offre et la demande se sont inversés. En effet, depuis le passage de l'aire de la standardisation avec F. W. Taylor et H. Ford à l'aire de la variété, l'entreprise se doit d'établir un lien étroit avec son marché mais également avec les maillons de la chaîne logistique. L'apparition de cette notion illustre le fait que l'entreprise s'intègre dans un système plus vaste et que ses performances dépendent intimement des performances des autres maillons de la chaîne et de l'articulation de ces derniers.

Un des principaux leviers d'action dont dispose l'entreprise est le traitement et la maîtrise du flux d'information (internes ou externes). Ces derniers permettent aux décideurs de percevoir

avec plus ou moins de précision les évolutions de son environnement et de se positionner par rapport à eux.

En effet, l'entreprise a le choix entre plusieurs types d'actions par rapport à ces événements. Elle peut changer ou non son fonctionnement en fonction de l'ampleur du changement constaté. Elle peut également anticiper les évolutions extérieures en extrapolant à partir des processus observables à un instant t . Enfin, elle peut préférer une réponse réactive plutôt que proactive. Le choix entre ces différents types d'action dépend à la fois des caractéristiques de l'information disponible et des choix des décideurs comme le décrivent les méthodes de prise de décision sous incertitude [19] ou le concept de rationalité limitée en micro-économie [25].

Nous accorderons une importance toute particulière à la nature et à la qualité des informations traitées lors du processus de prise de décision. Pour cela, nous introduirons la notion d'imprévisibilité à l'instar des auteurs traitant de l'agilité comme Arteta et Giachetti [2]. L'imprévisibilité complète la vision binaire des données certaines et incertaines en rappelant que l'incertitude est souvent perçue comme un concept que l'on peut estimer, approcher. Ce qui est imprévisible échappe par nature aux décideurs et nous rappelle les limites du processus de décision. En effet, le système décisionnel n'est plus perçu comme un système clos, mais comme une fonction de l'appréciation par un décideur de son propre environnement.

Que ce soit au niveau stratégique, tactique ou encore opérationnel et quel qu'en soit sa fréquence, le processus décisionnel intègre à chaque itération les données nouvelles et les évolutions dans la perception du décideur des risques et de leur évaluation. Ce processus a pour but de piloter le système considéré à travers les variables de décision.

Or, comme nous l'avons rappelé, la recherche de l'exhaustivité des données nécessaires à une décision comme la recherche de l'exactitude de celles-ci paraît illusoire. L'identification des limites intrinsèques du pilotage a conduit naturellement les auteurs à s'intéresser aux aptitudes du système à piloter. Ainsi, différentes notions ont été introduites pour caractériser l'aptitude du système à s'adapter comme la fiabilité, flexibilité, l'agilité, la résilience, la robustesse, la stabilité ou encore la sensibilité [9].

Nous commencerons notre étude par expliciter notre perception de la flexibilité et en introduisant la notion de potentialité comme dénominateur commun à la diversité des approches présentées dans la littérature. Ensuite, nous utiliserons cette notion comme paramètre lors de la prise de

décision de la conception d'un système de production. Nous présenterons alors dans une seconde partie une méthode d'optimisation de la flexibilité selon un critère d'efficacité, basée sur l'étude d'un cas réel de conception d'infrastructures pour un nouveau site industriel en Ile de France. Nous terminerons en proposant une articulation entre les concepts de flexibilité et d'agilité, basée sur la potentialité et l'efficacité.

II. LA FLEXIBILITÉ, UNE APTITUDE NÉCESSAIRE EN UNIVERS INCERTAIN

La nature des facteurs clés de succès propres aux systèmes de production poursuit son évolution en se déplaçant toujours plus des problématiques de réduction des coûts, aux problématiques de réduction des délais de réaction souvent assimilés à la notion de « Time to market » [13,16].

Cette transformation traduit le degré de complexité de l'environnement économique actuel qui ne peut être appréhendé de façon pertinente sans distinguer les différents types de données à disposition du décideur. Nous pouvons nous représenter les limites inhérentes à toute prise de décision liée à la qualité de l'information à travers la classification des qualités d'information à disposition du décideur (Figure 1).

| Chronologie | Événement | Données | Qualité |
|-------------|---------------|----------|--------------|
| Passé | Produit | Etablies | Certain |
| | Considéré | Estimées | Incertain |
| Futur | Non considéré | Absentes | Imprévisible |

Figure 1 Classification des qualités d'information à disposition du décideur.

Nous retiendrons pour cette étude la terminologie employée par les auteurs comme Gunasekaran [14] et Sharifi et Zhang [23] dont les travaux portent sur la notion d'agilité. Ainsi, nous distinguerons de façon usuelle les données dites certaines et incertaines comme dans les travaux de Luce et Raiffa [18], mais nous intégrerons également au processus de décision le caractère imprévisible d'événements auxquels tout système doit faire face.

A. Une notion multidimensionnelle

La notion de flexibilité a fait l'objet de nombreuses études depuis la définition proposée par Stigler [26]. Elle est perçue comme l'un des facteurs clés de la compétitivité à privilégier [7]. En effet, dans un environnement économique où la concurrence par le coût cède la place aux stratégies de différenciation et de spécialisation [22] et aux stratégies de réduction des délais présentées par Holzwarth [15], la flexibilité d'un système productif apparaît comme le levier idoine pour acquérir un avantage concurrentiel.

La flexibilité est définie par Upton [28] dans son acception globale comme la capacité d'un système à réagir ou à se transformer en minimisant : le délai de réaction, les coûts et la perte de performance liés à cette évolution. Cependant, la littérature abondante sur le sujet tend à particulariser les différents aspects de la flexibilité par rapport au domaine étudié et au contexte retenu. Par conséquent, la variété des approches en fait une notion multidimensionnelle dont la complexité rend difficile une compréhension globale unifiée. Shewchuk et Moodie [24] expliquent cette situation par « le fait que les chercheurs aient défini en général les différents types de flexibilité, sous un angle de vue limité du système de production, reflétant ainsi leur propre domaine de recherche et les biais qui leur sont propres ».

Apter [1], Cohendet et Llerena [6] et Carlsson [5] distinguent deux types de flexibilité en fonction de l'environnement économique. La flexibilité statique est liée à un environnement dont les caractéristiques d'évolution sont incertaines alors que la flexibilité dynamique se rapporte à un environnement dont les caractéristiques d'évolution sont imprévisibles. Si l'introduction de l'imprévisible nécessite vraisemblablement la définition d'une aptitude nouvelle pour les systèmes de production, cette approche restreint la portée du concept de flexibilité en la rendant contingente et relative. Nous retrouvons le même relativisme dans la description méthodique de Parker et Wirth [21] qui référencent huit types de flexibilité : « machine flexibility », « routing flexibility », « volume flexibility », « expansion flexibility », « process flexibility », « product flexibility », « operation flexibility » et « production flexibility ».

D'autres auteurs se sont également exprimés sur le manque évident d'unité au sein de la littérature traitant de la flexibilité. Gerwin [11] appelle à une théorie unifiée de la flexibilité : « La plupart des études sur la flexibilité supposent l'approche multidimensionnelle de ce concept mais ne fournissent aucune base théorique pour trouver sa dimension essentielle ». De même, D'Souza et Williams [8], Toni et Tonchia [27] et Volberda [29] expriment un besoin identique.

Nous proposerons dans la partie suivante la notion de « potentialité » comme dénominateur commun aux différentes approches de la flexibilité.

B. La potentialité, vecteur de flexibilité

Malgré la diversité des définitions et approches présentées, le concept de flexibilité laisse apparaître un invariant : la capacité du système à changer d'état. Or, nous considérons que l'ensemble des états atteignables à un instant donné par le système constitue un espace que nous nommerons la potentialité du système. En effet, la reconfiguration d'un système, quel qu'il soit, requiert de façon implicite l'existence d'un espace de réalisation. L'évolution d'un système est souvent bornée par les conditions initiales issues de sa configuration primaire. Notre hypothèse est donc la suivante : l'événement perturbateur endogène ou exogène qui aura pour conséquence la reconfiguration du système ou le changement de ses objectifs n'est pas un test pertinent pour mesurer la flexibilité d'un système. Il permet tout au plus de mesurer l'adéquation du champ des possibles de celui-ci avec les évolutions de son environnement.

La flexibilité dépend donc des caractéristiques de l'espace de réalisation du système considéré que nous nommerons sa « potentialité ». Cet espace peut être décrit selon son nombre de degrés de liberté N et le coût de déplacement au sein de celui-ci C qui est une fonction d'un couple d'éléments de l'espace x_1 et x_2 : $C=f(x_1 ; x_2)$. x_i désigne une potentialité du système, c'est à dire un état atteignable grâce aux différentes combinaisons des variables de décisions de l'ensemble des individus du système. Il est alors possible de projeter cet espace sur un plan afin de caractériser l'accessibilité de chacune des potentialités selon des critères de coût et délai (Figure 2). Prenons l'exemple d'une extension de la capacité d'un atelier de production. Nous nous intéressons aux états atteignables du système sans nous préoccuper dans un premier temps de savoir quelle variable de décision ou combinaison de variables de décision permettent de l'atteindre. Nous pouvons citer dans ce cas plusieurs états :

X₁ : L'atelier garde le même nombre d'opérateurs mais ceux-ci modulent leur temps de travail.

X₂ : L'atelier garde le même nombre d'opérateurs mais ceux-ci effectuent des heures supplémentaires.

X₃ : L'atelier augmente ses effectifs grâce à l'intérim.

X₄ : L'atelier augmente ses effectifs par l'embauche d'un nouveau salarié dans le cadre d'un contrat à durée déterminée.

X₅ : L'atelier automatise une partie de ses procédés et investit dans une nouvelle machine.

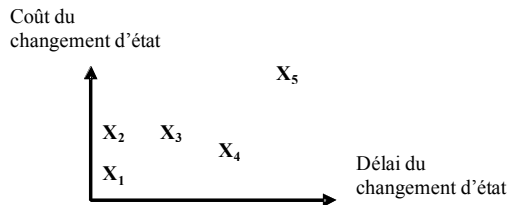


Figure 2 Cartographie des potentialités.

En effet, toutes les potentialités d'un système ne sont pas toujours descriptibles simplement par la combinaison des leviers d'action à disposition d'un décideur unique. Ainsi, l'espace des variables de décision n'est pas équivalent à celui des potentialités. Pour illustrer cette différence, prenons l'exemple d'une équipe d'ingénieurs en bureau d'étude. Le responsable de ce service dispose principalement de deux variables de décision pour ajuster la capacité de son service à la charge de travail : l'effectif et le nombre d'heures supplémentaires utilisées. Pourtant, la potentialité de ce service n'est pas limitée à la simple combinaison de ces deux variables puisqu'elle est étendue par les variables de décision de chacun de ses membres. Ainsi, la capacité peut être affectée par de multiples décisions individuelles telles que le nombre et le temps des pauses, la réflexion et la résolution de difficultés sur des dossiers en dehors des heures de travail...

La potentialité d'un système de production n'est pas toujours clairement identifiée a priori et l'apparition d'un événement perturbateur peut constituer à la fois un catalyseur et un révélateur de celle-ci. Cependant, la notion de potentialité montre qu'il faut distinguer notre état de connaissance des aptitudes réelles du système. Ce principe change à la fois la perception du concept de flexibilité, la manière de la développer et de la mesurer.

La potentialité ainsi définie est un vecteur de flexibilité pour le système productif. En effet, une entreprise est dite flexible si sa potentialité est adaptée à son environnement. La notion d'agilité caractérise quant à elle la mise en œuvre de la flexibilité. L'importance du rôle de la potentialité dans la recherche de la flexibilité est évidente. Or, c'est en amont, durant la phase de conception du système que la potentialité sera déterminée.

Analysons brièvement le cas de la polyvalence du personnel qui est souvent citée dans la littérature comme une composante intéressante de la flexibilité d'un système productif. La flexibilité opérationnelle ainsi recherchée est fondée sur les savoirs et savoir-faire à partir desquels le personnel réunit des compétences. La définition de Le Boterf [17] selon laquelle « La compétence est la mobilisation ou l'activation de plusieurs savoirs, dans une situation et un contexte donnés » permet de caractériser la potentialité d'un individu. Il est possible d'accroître dans ce cas la potentialité par sa formation

dont le coût doit être rapproché de la probabilité d'utiliser cette extension.

L'identification de la potentialité comme vecteur de la flexibilité modifie profondément l'approche traditionnelle de la flexibilité qui la perçoit comme une notion multidimensionnelle. Non seulement elle permet de franchir une première étape vers l'unification au sein de ce domaine d'étude, mais elle permet également de considérer la flexibilité comme une véritable variable de décision. La plupart des auteurs conçoivent leur système en ayant pour objectif de maximiser la flexibilité [12]. Cependant, il est plus pertinent de voir la flexibilité comme une variable de décision et de régler cette flexibilité en fonction d'un critère d'optimisation. La flexibilité ne doit donc pas être perçue comme un objectif absolu qu'il faudrait maximiser mais bien comme un paramètre à optimiser. Nous choisissons comme critère d'optimisation l'efficacité. Nous retiendrons la définition de Bouquin [3] selon laquelle « l'efficacité est le fait de maximiser la quantité obtenue de produits ou de services à partir d'une quantité donnée de ressources ». Dans ce cadre, la prochaine partie de notre étude sera consacrée à l'optimisation de la flexibilité d'une infrastructure industrielle.

III. OPTIMISATION DE LA FLEXIBILITÉ DES INFRASTRUCTURES DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD

L'entreprise EUROFARAD a été fondée en 1965 et s'est rapidement développée par la mise au point et l'introduction sur le marché de composants électroniques passifs de haute technologie. L'activité d'EUROFARAD repose sur l'étude et la fabrication de produits « haut de gamme » destinés aux secteurs industriel, professionnel, ferroviaire, médical, militaire et spatial. À partir des diverses technologies maîtrisées, les laboratoires d'EUROFARAD développent des produits en accord avec les exigences techniques des clients. Ainsi, pour soutenir la stratégie de différenciation adoptée, dans un environnement marqué par l'innovation, l'entreprise doit développer sa capacité d'adaptation.

Dans ce contexte, la flexibilité constitue un véritable facteur clé de succès que l'entreprise EUROFARAD recherche à tous les niveaux : opérationnel, tactique et stratégique. La construction en 2008 d'un nouveau site industriel pose l'enjeu de la flexibilité de l'implantation de la zone de production. Les potentialités de configurations des ateliers de production seront déterminées lors de la conception des différents réseaux : informatique, électricité, air comprimé, extraction d'air ou encore arrivée et évacuation d'eau.

Le réseau d'évacuation d'eau présente une double spécificité. Tout d'abord, le process industriel d'EUROFARAD inclut des opérations pour lesquelles le rôle de l'eau est capital. C'est le cas du traitement de surface qui utilise des solutions aqueuses et des nombreuses opérations chimiques des gammes de fabrication qui utilisent de l'eau désionisée. Ensuite, les choix concernant ce réseau doivent être pris très tôt dans le projet de construction de l'usine et ne peuvent plus être remis en cause par la suite. En effet, l'option d'un réseau enterré s'arrête avec le coulage de la dalle. Nous étudierons donc dans cette perspective deux alternatives techniques pour la conception du réseau d'évacuation d'eau, le système gravitaire et le système en dépression.

A. Méthodologie appliquée

La conception d'un réseau d'évacuation d'eau repose tout d'abord sur le choix de la technologie utilisée (Figure 3). En

effet, il faut distinguer le réseau gravitaire traditionnel d'un réseau mécaniquement mis en dépression par une pompe à vide. Pour comparer ces deux solutions alternatives, nous avons retenu le principe du bilan différentiel [10]. Cette méthode permet d'analyser les conséquences économiques des différents scénarii retenus par rapport à une solution de référence. On s'intéresse donc aux variations physiques ou financières induites par la ou les solutions nouvelles. La mise en relief des éléments qui sont modifiés par les décisions prises, présente également l'avantage de limiter le recueil des données.

| | Installation du réseau | Evolutions du réseau |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------|
| Système en dépression | Centrale et boîtiers collecteurs | Tranchées |
| Système gravitaire | Tranchées | Raccordement |
| | | Nouvelle Tranchée |

Figure 3 Description des deux technologies.

Or, comme le soulignent Cohendet et Llerena [6] « Chaque décision importante devra incorporer ces différents éléments de gains et de coûts « potentiels » ou « virtuels » liés au processus temporel et à l'incertitude sous jacents à chaque décision ». En effet, les données disponibles au moment de la décision ne sont pas homogènes et leur traitement doit tenir compte de leur caractère incertain voire imprévisible.

Pour cette raison, nous utiliserons une méthode de simulation de Monte-Carlo qui permet d'introduire une approche statistique du risque dans une décision financière. Nous distinguerons les variables du projet qualifiées d'incertaines que nous pouvons approcher par une distribution de probabilité comme le coût d'évolution de chacune des technologies, des variables dites imprévisibles, comme l'utilisation de la flexibilité du système que nous modéliserons par un coefficient purement aléatoire, c'est à dire suivant une loi de probabilité uniforme continue sur l'intervalle [0 ;1].

B. Evaluation des scénarii

Le choix technologique entre un réseau gravitaire traditionnel, considéré comme non-flexible, et un réseau mis en dépression, offrant une flexibilité totale sur le positionnement des évacuations d'eau grâce à un système de boîtier, est rarement fondé sur un calcul économique. En effet, cette formulation du problème oppose radicalement les possibilités des deux systèmes, légitimant de ce fait le surcoût lié à la recherche de flexibilité. Sur le terrain comme dans la littérature, le paradigme actuel est bien de maximiser la flexibilité.

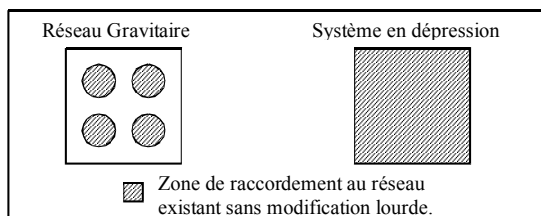


Figure 4 Espace de Production

Cependant, la variété des solutions n'est pas limitée à ces deux choix extrêmes. Il existe un gradient de solutions plus ou moins flexibles allant du réseau gravitaire répondant strictement au besoin actuel au réseau en dépression. Ce gradient peut être obtenu par l'optimisation du réseau gravitaire en quadrillant plus ou moins finement l'espace de

production (Figure 4). Le nombre d'attentes non utilisées à l'instant initial ainsi que le coût de ce réseau augmentera avec le degré de finesse du quadrillage mais les caractéristiques de l'espace des potentialités obtenues s'approcheront de celle du réseau en dépression.

En effet, les deux systèmes offrent le même espace de potentialités au sens où il est possible d'implanter dans les deux cas autant d'évacuations que nécessaire aux emplacements souhaités. C'est bien la fonction C du coût de déplacement entre les différentes potentialités qui diffèrent de l'un à l'autre. Dans le cas du système en dépression, cette fonction coût est uniforme sur l'ensemble de l'espace puisque l'ajout comme la suppression de boîtiers collecteurs a un coût directement proportionnel au nombre de boîtiers posés quelque soit leur position dans la zone de production. Le cas du système gravitaire se distingue par le fait qu'il présente deux types d'évolution différents suivant les contraintes. Leur coût respectif est inférieur au coût d'un boîtier pour un simple raccordement à une attente du réseau d'évacuation, alors qu'il est supérieur pour le creusement d'une nouvelle tranchée dans la dalle. Le choix entre ces deux évolutions possibles est déterminé par la distance entre le point à raccorder et l'attente la plus proche. En effet, si celle-ci est inférieure à 10 mètres, la pente permet d'envisager un simple raccordement alors que si elle est supérieure à 10 mètres, il est nécessaire de creuser une nouvelle tranchée. La figure 5 illustre ainsi la cartographie des potentialités obtenue à savoir :

- X_1 : L'ajout d'un nouveau boîtier au système en dépression.
- X_2 : Le raccordement d'un équipement à une attente du réseau gravitaire.
- X_3 : La création d'une nouvelle tranchée

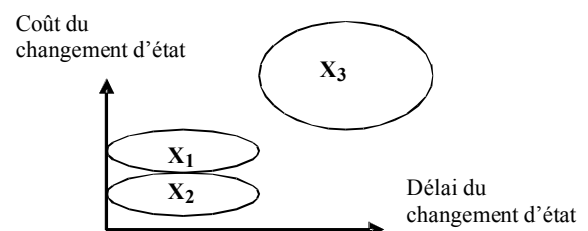


Figure 5 Cartographie des potentialités du système d'évacuation

La définition selon laquelle la flexibilité d'un système résulte de l'adéquation de sa potentialité avec son environnement subordonne la recherche de potentialité aux caractéristiques de l'environnement. C'est donc ce paramètre que nous optimiserons selon un critère d'efficacité : la valeur actualisée nette.

C. Modélisation du problème

La fonction objectif de notre problème d'optimisation est la fonction coût des technologies présentées. Le critère d'optimisation est l'efficacité. Nous disposons dans le cadre de cette étude de deux variables de décision. La première est celle de la technologie utilisée, la seconde concerne la finesse du maillage du réseau dans le cas du système gravitaire. A potentialité équivalente, le critère d'optimisation devient la minimisation de la fonction objectif. La valeur actualisée nette permet de prendre en compte la composante temporelle dans le calcul économique d'un investissement. Nous limiterons notre horizon temporel à celui de la période d'amortissement de la centrale du système en dépression, c'est à dire à 10 ans. D'une part, nous évaluons le coût d'installation des deux réseaux

respectifs : le réseau gravitaire (Figure 6) et le réseau en dépression (Figure 7).

| Poste | Quantité | Prix Unitaire | Total |
|----------|----------|---------------|-------------|
| Centrale | 1 | 43 761,05€ | 43 761,05€ |
| Boîtier | 15 | 1 851,37 € | 27 770,55 € |
| Réseau | 1 | 7 098,19 € | 7 098,19 € |
| | | | 78 629,79 € |

Figure 6 Coût d'installation du système en dépression

| Poste | Quantité | Prix Unitaire | Total |
|-----------|----------|---------------|-------------|
| Tranchées | 200 | 52,84 € | 10 568,00 € |
| Regards | 10 | 171,33 € | 1 713,30 € |
| | | | 6 997,30 € |

Figure 7 Coût d'installation du système gravitaire

Ensuite, nous évaluons les coûts associés à leur évolution dans le temps :

- Ce coût correspond pour le réseau en dépression à celui de l'installation d'un boîtier supplémentaire (Figure 8).

| Poste | Quantité | Prix Unitaire |
|---------------|--|---------------|
| Boîtier | 1 | 1 851,37 € |
| Raccordement | Loi Normale N(1 ;0,1) | 400,00 € |
| Main d'oeuvre | Loi Exponentielle E(0,7) majorée de 7 unités | 400,00 € |

Figure 8 Coût d'évolution du système en dépression

- Par contre, le réseau gravitaire présente deux alternatives : soit un raccordement simple à une attente (Figure 9), soit une modification du réseau lui-même (Figure 10).

| Poste | Quantité | Prix Unitaire |
|---------------|--|---------------|
| Raccordement | 1 | 40,00 € |
| Main d'oeuvre | Loi Exponentielle E(0,3) majorée de 3 unités | 50,00 € |

Figure 9 Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas d'un raccordement

| Poste | Quantité | Prix Unitaire |
|----------------------|---|---------------|
| Location Matériel | Loi Discrète P(1) = 0,7 ; P(2) = 0,2 P(3) = 0,1 | 200,00€ |
| Matériaux | Loi Normale (1 ;0,1) | 600,00€ |
| Main d'oeuvre | Loi Exponentielle E(5) majorée de 50 unités | 50,00 € |
| Perte d'exploitation | Loi Exponentielle E(0,5) majorée de 5 unités | 2 000,00 € |

Figure 10 Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas du creusement d'une nouvelle tranchée

Dans ce dernier cas, les décideurs favoriseront en pratique le raccordement simple même si cela implique des contraintes supplémentaires sur le positionnement des équipements. Seuls des événements imprévisibles peuvent conduire les décideurs à opter pour la modification du réseau. Nous avons choisi d'introduire une variable aléatoire A suivant une loi de probabilité uniforme continue sur l'intervalle [0 ;1], dans un premier temps, afin de modéliser le caractère imprévisible de ce phénomène. Ensuite, nous verrons quels impacts peuvent

avoir les décisions concernant les paramètres des réseaux sur cette imprévisibilité.

Coût d'une évolution du réseau gravitaire = $A \cdot CR + (1-A) \cdot CT$

Avec CR = coût du raccordement et CT = coût d'une nouvelle tranchée

D'autre part, nous évaluons également le nombre d'évolutions du réseau par année par une loi de poisson de paramètre $\lambda=3$. Ce nombre a été obtenu par l'expérience des dirigeants de l'usine actuelle d'EUROFARAD.

La modélisation des différentes composantes intervenant dans le calcul économique est intimement liée à la manière dont ont été collectées les données chiffrées. Afin de rester au plus proche de la problématique des décideurs d'EUROFARAD et de leur perception de leur environnement, nous avons agrégé des données de deux natures différentes :

- 1) Les données propres aux installations des deux systèmes, issues des consultations auprès des entrepreneurs pour leurs prix unitaires et dont les quantités sont des variables de décisions. Ces données sont considérées comme certaines.
- 2) Les données propres aux coûts d'évolution de ces deux systèmes pour lesquelles il est nécessaire de recourir à l'expérience des décideurs d'EUROFARAD pour les estimer.

Ainsi, pour modéliser l'incertitude de ces données par une loi de probabilité réaliste en ce qui concerne le coût d'un raccordement aux attentes du système gravitaire ou bien pour le creusement d'une nouvelle tranchée, nous avons choisi comme variables les quantités de chacun des postes intervenant dans ces coûts.

D. Application numérique

Dans un premier temps, nous comparons les deux systèmes proposés pour répondre au besoin actuel d'EUROFARAD en matière d'évacuation d'eau. Le système en dépression est constitué d'une centrale et de 24 boîtiers. Le système gravitaire se résume quant à lui en une centaine de mètres de tranchées.

Nous calculons la différence des valeurs actualisées nettes $\Delta VAN = VAN_{\text{système gravitaire}} - VAN_{\text{système en dépression}}$ sur une période de 10 ans à un taux de 5% de ces deux scénarii. A partir de la fonction de répartition de la variable ΔVAN , on définit la fonction densité qui permet de calculer la probabilité pour cette variable d'être dans l'intervalle $[0, +\infty[$. Ce calcul montre que le système en dépression est plus efficace avec une probabilité de 78% d'avoir un ΔVAN positif.

Cependant, il est possible de modifier la limite entre les deux types de coûts de déplacement au sein de l'espace des potentialités du système gravitaire en concevant un réseau avec un maillage plus fin. Cette option a pour conséquence d'augmenter le nombre de mètres linéaires de tranchées à l'installation du réseau et donc d'en augmentant le coût (Figure 11), mais elle permet également de privilégier le raccordement à une attente du réseau pour les évolutions futures du système. En effet, un réseau munit d'attentes espacées de 20 mètres permet de se raccorder à celui-ci sans avoir à creuser de tranchée sur l'ensemble de la zone de production. Ainsi, le coefficient A peut être perçu, non plus comme une variable aléatoire, mais comme un coefficient que nous prendrons égal à 0,8 :

Coût d'une évolution du réseau gravitaire = $0,8 \cdot CR + 0,2 \cdot CT$

| Poste | Quantité | Prix Unitaire | Total |
|-----------|----------|---------------|-------------|
| Tranchées | 1000 | 52,84 € | 52 840,00 € |
| Regards | 30 | 171,33 € | 5 139,90 € |
| | | | 57 979,90 € |

Figure 11 Nouveau coût d'installation du système gravitaire

Dans cette nouvelle configuration, la différence des valeurs actualisées nettes $\Delta VAN = VAN_{\text{système gravitaire}} - VAN_{\text{système en dépressio}}$ sur une période de 10 ans à un taux de 5% de ces deux scenarii montre que le système gravitaire est plus efficient avec une probabilité de 99% d'avoir un ΔVAN négatif.

IV. CONCLUSION

Après avoir proposé la notion de potentialité comme dénominateur commun à la diversité des définitions de la flexibilité, nous avons utilisé le principe du bilan différentiel et une méthode de simulation de Monte-Carlo pour optimiser la flexibilité d'un réseau d'évacuation d'eau pour le nouveau site industriel d'EUROFARAD.

Nous avons proposé une alternative au paradigme actuel selon lequel la flexibilité devait être maximisée en tant que facteur clé de succès pour les systèmes productifs en univers incertain. Nous préférons concevoir la flexibilité comme un levier d'action du système productif qui mérite d'être optimisée plutôt qu'un objectif absolu en soi. Nous avons choisi pour cette étude le calcul de la valeur actualisée nette comme critère d'efficience.

Pour développer cette réflexion, il serait intéressant de montrer qu'il est préférable de se contenter d'une flexibilité restreinte à un instant t en développant parallèlement une aptitude à déplacer la potentialité d'un système. Cette aptitude pourrait servir d'articulation entre les notions de flexibilité et d'agilité.

V. REFERENCES

- [1] Apter, J. (1985). *Maîtriser la flexibilité de l'entreprise – Une méthode de gestion et ses applications*, Masson, Paris.
- [2] Arteta, B. M. et Giachetti, R. E. (2004). A measure of agility as the complexity of the enterprise system, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20, pp. 495-503.
- [3] Bouquin, H. (2004). *Le contrôle de gestion*, Presses Universitaires de France, Paris.
- [4] Burns, T. et Stalker, G.M. (1961). *The management of innovation*. London: Tavistock.orgанизations. New York: Wiley.
- [5] Carlsson, B. (1992). Management of Flexible manufacturing: An international comparison, *OMEGA* 20 (1), pp. 11-22.
- [6] Cohendet, P., Llerena, P. (1990). Flexibilité et évaluation des systèmes de production. In Cohendet, P., Lorino, P., Jacot, J.-H., ECOSIP, *Coherence, Pertinence et Evaluation*, pp. 41-60. Hardcover, France.
- [7] Cox, T. (1989). Toward the measurement of manufacturing flexibility, *Production and Inventory Management Journal*, First Quarter, pp. 68-72.
- [8] D'Souza, D. E. et Williams, F. P. (2000). Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions, *Journal of Operations Management* 18 (5), pp. 577-593.
- [9] Durieux-Paris, S., Genin, P., Thierry, C. (2007). *Prise de décision dans la chaîne logistique en monde incertain : Document de synthèse du projet GdR MACS*, http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/rapport/RapportProjet_DecisionDansLaChaineLogistiqueEnMondeIncertain_GDRMACS_2007.pdf
- [10] Giard, V. (2005). *Gestion de la production et des flux*, Chap. 3, Economica, Paris.
- [11] Gerwin, D. (1993). Manufacturing flexibility: A strategic perspective. *Management Science* 39 (4), pp. 395-410.
- [12] Graves, S. C. et Tomlin, B. T. (2003). Process Flexibility in Supply Chains. *Management Science* 49 (7), pp. 907-919.
- [13] Griffin, A. (1997). PDMA research on new product development practices: Updating trends and benchmarking best practices. *Journal of Product Innovation Management* 14 (6), pp. 429-458.
- [14] Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: a framework for research and development, *International Journal of Production Economics* 62, pp. 87-105.
- [15] Holzwarth, F. (1993). Corporate Fitness: Putting Theories into Practice, *Siemens Review* 60 (3), pp. 7-11.
- [16] Ittner, C.D., Larcker, D.F. (1997). Product development cycle time and organizational performance, *Journal of Marketing Research* 34 (1), pp. 13-23.
- [17] Le Boterf, G. (1995). *De la compétence, essai sur un attracteur étrange*, Editions d'organisations, Paris.
- [18] Luce, R.D., Raiffa H. (1967). *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*. New York: Wiley.
- [19] Munier, B. (2003). New models of decision under uncertainty: An interpretative essay. *European Journal of Operational Research* 38 (3), pp. 307-317..
- [20] Oliver, R. Keith, and Michael D. Webber (1982). *Supply Chain Management: Logistics Catches Up with Strategy*, Outlook, reprinted in Martin Christopher (1992), *Logistics: the Strategic Issues*, London, England: Chapman & Hall.
- [21] Parker, R. P. et Wirth, A. (1999). Manufacturing flexibility: measures and relationships, *European Journal of Operational Research* 118, pp. 429-449.
- [22] Porter, M.E. (1985). *Competitive advantage*, The Free Press, New York; Traduction française: 1986, *L'avantage concurrentiel*, InterEditions, Paris.
- [23] Sharifi, H. et Zhang, Z. (2001). Agile manufacturing in practice—application of a methodology, *International Journal of Operations and Production Management* 21, pp. 772-794.
- [24] Shewchuk, J.P. et Moodie, C.L. (1997). A framework for classifying flexibility types in manufacturing, *Computers in Industry* 33, pp. 261-269.
- [25] Simon, H. A. (1997). *Models of Bounded Rationality Vol. 3: Empirically Grounded Economic Reason*. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge.
- [26] Stigler, G. (1939). Production and Distribution in the short run, *Journal of Political Economy* 47, pp. 305-328.
- [27] Toni, D. A. et Tonchia, S. (1998). Manufacturing-flexibility: a literature review, *International Journal of Production Research* 36 (6), pp. 1587-1617.
- [28] Upton, D.M., (1994). The management of manufacturing flexibility, *California Management Review* 36 (2), pp. 72-89.
- [29] Volberda, H.A. (1998). *Building the Flexible Firm*. Oxford University Press, New York.