



# **JOURNAL NATIONAL DE LA RECHERCHE EN IUT**

## Un mot pour le réseau

Chères collègues, chers collègues,

L'objet de ce numéro 0, d'une éventuelle revue présentant les travaux de recherche réalisés au sein des IUT, est de susciter des réactions de la communauté des personnels intervenant dans nos instituts afin de trouver un moyen supplémentaire de faire connaître nos engagements dans la dynamique nationale de la recherche.

Notre idée est de disposer d'un journal relatant nos recherches scientifiques, technologiques et pédagogiques, mais aussi nos actions de transfert de technologie ou de compétences. Un journal offrant la possibilité aux enseignants, enseignants-chercheurs, personnels BIATOSS et chargés d'enseignement de valoriser leur travaux, de faire connaître la diversité des thématiques abordées pour de nombreuses finalités, toutes ayant un impact économique qu'il soit local ou international. Nous pourrions nous poser la question de savoir pourquoi ne pas utiliser les revues existantes ? Je n'ai qu'une seule réponse : il n'y a pas de revue de niveau national qui puisse faire un état de la diversité de nos réflexions et de nos réussites. En outre en ces temps de remise en cause de notre place dans le système de formation universitaire il est plus que nécessaire de renforcer le réseau des IUT et d'avoir des outils de valorisation montrant notre implication dans la totalité des missions universitaires.

Cette valorisation aurait pour cible non seulement la communauté universitaire mais aussi nos partenaires industriels et institutionnels.

Nous n'avons actuellement défini ni la périodicité, ni l'organisation de la sélection des travaux, il semble important d'imaginer un processus d'amélioration nous conduisant à moyen terme à trouver les conditions d'édition d'un journal de niveau national. Nous avons posé le nom de « Journal National de la Recherche en IUT » pour faire écho au CNRIUT moment important de rencontre des personnels impliqués dans les IUT et la recherche. Nous profitons de ce moment pour lancer cette idée.

Le présent numéro contient 4 articles choisis par le hasard des rencontres et publiés sous la responsabilité scientifique des auteurs, faute d'avoir eu du temps pour un cycle de relecture et d'expertise, mais avec leur générosité. Ils témoignent aussi de la diversité des thématiques, mécanique, sûreté de fonctionnement, psychologie et économie, de la diversité statut des auteurs enseignants-chercheurs, jeunes docteurs et doctorants et de la diversité des structures de recherche, laboratoire d'IUT à label national et local ou laboratoire d'université avec composante ou non dans les IUT. Ces articles montrent un état des préoccupations de recherche au sein des IUT.

Nous vous souhaitons une bonne lecture malgré les imperfections de formatage. Nous attendons vos remarques, critiques et encouragements que vous pouvez nous envoyer à l'adresse courriel : [lrpmip@univ-tlse2.fr](mailto:lrpmip@univ-tlse2.fr). A la lecture de vos réactions nous prendrons position quand à la pérennité de ce journal.

Thierry SIMON  
Directeur du LRPmip de l'IUT de Figeac



PS : LRPmip jeune « Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire du Nord-Est de Midi-Pyrénées » reconnu par le conseil scientifique de l'Université de Toulouse II.

## Sommaire

**Influence des contraintes interfaciales de compression ou d'arrachement sur l'amorçage du délaminage** Pages 3-17

*Thierry LORRIOT, Hervé WARGNIER, Laurent LAGUNEGRAND*

**Comment aider des personnes âgées à sortir de leur isolement social ? Deux recherches de psychologie sociale appliquée** Pages 18-26

*Séverine HALIMI-FALKOWICZ, Marie MARCHAND, André QUADERI, Robert-Vincent JOULE*

**Allocation de la fiabilité par algorithme génétique : application à la conception d'un Système Instrumenté de Sécurité** Pages

*Frédérique BICKING*

**Les organisations « non orientées vers le profit » : un nouveau champ d'application des outils de la gouvernance** Pages

*Patricia GONTIER*

## **Influence des contraintes interfaciales de compression ou d'arrachement sur l'amorçage du délaminage**

**Thierry LORRIOT**

**Hervé WARGNIER**

**Laurent LAGUNEGRAND**

IUT Bordeaux1, Université de Bordeaux

Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux de Bordeaux, 15 rue Naudet, CS

10207, 33175 Gradignan cedex

courriel : [thierry.lorriot@iut.u-bordeaux1.fr](mailto:thierry.lorriot@iut.u-bordeaux1.fr)

**Résumé** - *En vue de développer un critère d'amorçage du délaminage exprimé en fonction des contraintes interlaminaires moyennées sur une distance caractéristique, l'influence du signe de la contrainte normale a été étudiée. A partir des résultats expérimentaux (essais de traction et de compression) obtenus sur l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$  et en s'appuyant sur les prédictions d'un critère d'amorçage du délaminage en cisaillement pur préalablement mis en œuvre, il est montré que la contrainte normale interlaminaire, quel que soit son signe, a tendance à favoriser l'amorçage du délaminage.*

*Une formulation, en accord avec cette observation est alors proposée. Elle permet de prendre en compte, à l'aide de paramètres matériau adaptés au signe de cette contrainte, les phénomènes d'arrachement et de compression d'interface. Si la formulation étudiée semble bien adaptée à la prédiction de l'amorçage du délaminage, les prédictions concernant l'empilement  $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$  sous-évaluent nettement la contrainte d'amorçage du délaminage. Le modèle d'endommagement utilisé, ne prenant pas en compte les effets de bords, est alors remis en cause.*

**Mots-clés** : *Délaminage, amorçage, effet de bord, contrainte interlaminaire, résistance interfaciale, émission acoustique, matériaux composites, stratifiés.*

### **1. Introduction**

Les applications des matériaux composites stratifiés recouvrent l'ensemble des domaines d'activité, allant des loisirs à l'aérospatiale. Cependant, leur utilisation optimale reste assujettie à la compréhension quantitative de phénomènes encore mal appréhendés, généralement localisés dans des zones à fort gradient de contraintes comme les bords, les trous ou les liaisons. C'est généralement dans ces zones, siège d'un état de contrainte tridimensionnel, que naissent les premiers endommagements et que se produit la rupture. Dans les stratifiés, le délaminage consiste en une décohésion des couches provoquée par différentes causes : impact, sollicitations mécaniques complexes dans des zones où la géométrie évolue (bord, interruption de pli...). Le mécanisme de délaminage est amorcé par des phénomènes d'endommagement microscopiques complexes dépendants de la nature des matériaux en présence (fibres, résine, méthode d'élaboration, ...), de la sollicitation de l'interface, de l'épaisseur du stratifié et de l'orientation des couches adjacentes à l'interface interlaminaire considérée.

L'objectif de cette étude, menée en collaboration avec EUROCOPTER Marignane, et dont nous présentons ici la démarche ainsi que les résultats, est de proposer et de mettre en œuvre une méthode fiable permettant la prévision de l'amorçage du délaminage sur les bords libres d'un stratifié sollicité en traction.

Etablir un critère consiste à définir une fonction mathématique dont les variables caractérisent l'état mécanique vis-à-vis du phénomène étudié puis à comparer la valeur de cette fonction à une valeur critique, identifiée expérimentalement, pour laquelle se produit ce phénomène. Les approches utilisées pour la prédiction de l'amorçage du délaminage sont très variées. Citons trois familles de variables fréquemment utilisées : les contraintes, les facteurs d'intensité de contrainte, les taux de restitution d'énergie. Néanmoins, des critères formulés à partir des variables différentes peuvent s'avérer équivalents (Harry *et al.*, 2000), (Leguillon *et al.*, 2001). Dans cette étude, une approche en contrainte a été retenue en raison de la préférence des Bureaux d'Etude pour ce type d'approche. Cependant, quel que soit le type de variables retenu, le développement ou la proposition d'un critère implique de suivre les étapes suivantes : (i) la définition de la formulation du critère, (ii) l'identification des paramètres du critère, (iii) la validation du critère.

Au voisinage des bords, l'équilibre local d'un stratifié dont les couches ont des directions d'anisotropie différentes est assuré par l'évolution du tenseur des contraintes dans cette zone. En effet, pour que les équations d'équilibre soient satisfaites au niveau des bords libres, il est nécessaire d'introduire un champ de contraintes tridimensionnel au voisinage de ces bords ; champ 3D qui s'atténue très rapidement lorsque l'on s'éloigne des bords pour converger vers la solution classique du champ de contraintes plan de la mécanique des stratifiés. Les contraintes planes sont alors modifiées à proximité du bord et les contraintes hors plan apparaissent dans l'épaisseur. Ces contraintes perpendiculaires à l'interface sont des contraintes interlaminaires de cisaillement et des contraintes normales à l'interface. Elles sont responsables de la surcontrainte qui amorce le délaminage. Pour un matériau donné (fibre et résine), la valeur de ces contraintes dépend fortement de l'orientation des fibres dans les couches du stratifié. Herakovitch (Herakovitch, 1998) traduit cette dépendance en reliant les contraintes interlaminaires  $\sigma_{yz}$  et  $\sigma_{zz}$  à la différence des coefficients de Poisson  $\nu_{12}$ , et  $\sigma_{xz}$  à la différence de coefficients de couplage  $\eta_{12,2}$ , des couches adjacentes à l'interface considérée (figure 1). Selon l'orientation des fibres et la disposition relative des couches dans l'épaisseur, le premier mode de dégradation d'un stratifié est soit intralaminare (fissure transverse, rupture de fibres, décohésion fibre matrice), soit interlaminare (délaminage). Ces deux modes d'endommagement peuvent être présents simultanément de façon indépendante ou couplée.

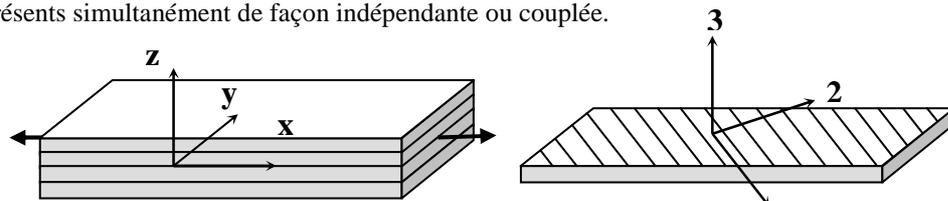


Figure 1. Repère du pli unidirectionnel, repère du stratifié 1

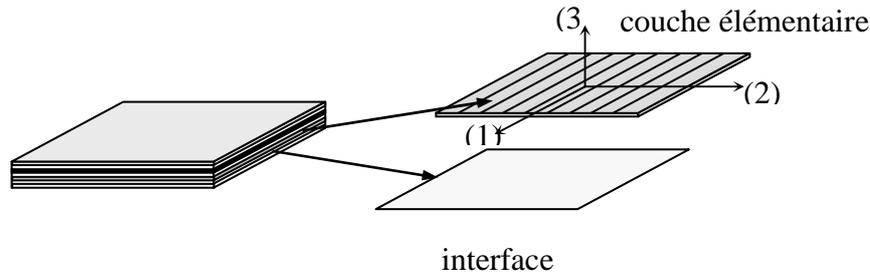
De nombreux critères d'amorçage du délaminage permettent, à partir d'une formulation quadratique en contraintes moyennes, de prédire le niveau de sollicitations à partir duquel les premiers délaminages sont observés (Brewer et *al.* 1988), (Kim et *al.*, 1986), (Marion, 2000), (Lorriot et *al.*, 2003). Les principales différences entre les divers critères résident dans la façon de prendre en compte l'influence de la contrainte normale interlaminaire. En effet, suivant les hypothèses de travail, le terme relatif aux contraintes normales interlaminaires peut être quadratique et/ou linéaire, donnant de ce fait, une signification différente et un effet différent au signe de cette même contrainte normale. Trois hypothèses contradictoires ressortent de ces différentes formulations (i) la contrainte  $\sigma_{zz} < 0$  retarde l'amorçage du délaminage, (ii) la contrainte  $\sigma_{zz} < 0$  favorise l'amorçage du délaminage, (iii) la contrainte  $\sigma_{zz} < 0$  a une influence négligeable sur l'amorçage du délaminage. Il semble donc nécessaire de connaître avec précision quel est le rôle de la contrainte normale interfaciale sur le processus de délaminage. De plus, la formulation choisie du critère influence également la façon d'identifier les paramètres de ce même critère. Ainsi, la formulation et la mise en œuvre d'un critère passent donc par l'étude de l'influence de la contrainte d'arrachement interlaminaire et par l'étude de l'influence de son signe (traction ou compression). Cette étude doit permettre de soumettre des pistes intéressantes dans le but de proposer une formulation en accord avec les résultats expérimentaux.

## 2. Modèle

### 2.1 Modèle d'interface

L'échelle mésoscopique est une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de la couche élémentaire (la fibre et la résine) et l'échelle macroscopique liée à la structure. A cette échelle, le stratifié est schématisé par un empilement de couches et d'interfaces interlaminaires (figure 2). L'interface est une entité surfacique assurant le transfert du vecteur déplacement et du vecteur contrainte, tous les deux normaux à l'interface d'une couche à l'autre. Le comportement des interfaces peut ensuite être considéré de différentes façons :

- soit les interfaces sont de raideur infinie. Dans ce cas, elles assurent la continuité du vecteur déplacement et du vecteur contrainte normal à l'interface (Pipes et *al.*, 1970), (Pagano et *al.*, 1973), (Pagano et *al.*, 1 et 2, 1983).
- soit les interfaces sont de raideur finie ce qui permet d'exprimer les contraintes hors plan en fonction des sauts de déplacements. Il est alors possible de prévoir la dégradation de l'interface (chute de raideur) à l'aide des principes de la mécanique de l'endommagement (Allix, 1989), (Corigliano et *al.*, 2000), (Lévêque, 1998).



**Figure 2.** Composition d'un stratifié à l'échelle mésoscopique

## 2.2 Modèle d'endommagement

Un modèle simple d'endommagement intralaminaire est également appliqué (modèle simplifié de Ladevèze (Ladevèze, 1988)). Il permet de prendre en compte la chute de rigidité de chacune des couches élémentaires en fonction du chargement à partir de deux paramètres (l'un gérant la rigidité en cisaillement plan et l'autre la rigidité dans le sens des fibres) dépendant uniquement du champ de contraintes planes régnant au centre de la structure, zone libre des effets de bord. Deux variables d'endommagement  $d$  et  $d'$  sont introduites pour décrire l'évolution de ces deux modules :

$$E_2 = E_2^0(1-d') \quad G_{12} = G_{12}^0(1-d) \quad (1)$$

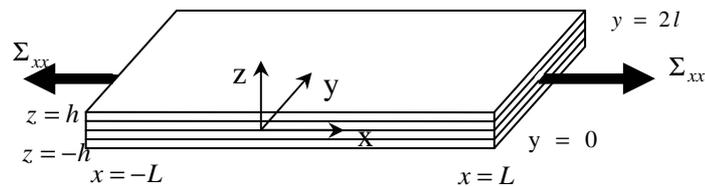
Le modèle permet de calculer le champ de contraintes planes dans la partie intérieure du stratifié à partir de la connaissance de l'évolution des modules plans de traction transverse et de cisaillement au cours du chargement. Afin de l'étendre au voisinage du bord, les évolutions des modules hors plan sont déduites de l'hypothèse d'isotropie transverse de la couche. Le comportement est supposé être identique dans toutes les directions du plan perpendiculaire aux fibres. Les rigidités hors plan sont alors obtenues à partir des relations suivantes :

$$\begin{aligned} E_3 = E_2 = E_2^0(1-d') \quad G_{13} = G_{12} = G_{12}^0(1-d) \\ G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} = \frac{E_2^0(1-d')}{2(1+\nu_{23})} \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.3 Calcul du champ de contraintes au voisinage du bord

De nombreuses méthodes sont présentées dans la littérature. On en trouvera une synthèse dans (Kant et *al.*, 2000), (Marion, 2000), (Lagunegrand, 2004). Afin de réduire les temps de calculs, même si les performances des stations de calcul sont de plus en plus élevées, certains auteurs proposent des méthodes dans lesquelles le champ tridimensionnel est approché. Pipes et Pagano (Pipes et *al.*, 1983) effectuent cette détermination en deux étapes : les contraintes intralaminaires sont déterminées puis elles sont corrigées à proximité des bords. La démarche utilisée dans cette étude

suit ce mode opératoire. Un modèle « classique » de stratifié est donc utilisé (figure 3): plis homogénéisés, comportement élastique, interface parfaite de raideur infinie avec continuité des déplacements et des contraintes interlaminaires à l'interface. Le champ de contraintes CLT décrit correctement l'état de sollicitation à l'intérieur de la plaque mais il doit être corrigé par un champ correcteur noté F à proximité du bord de façon à vérifier les conditions aux limites. Les contraintes interlaminaires (les effets de bord) sont calculées à l'aide du logiciel CLEOPS. La résolution utilisée dans cette étude, développée par Engrand (Engrand, 1981) puis Lécuyer (Lécuyer et al., 1992), est un calcul semi analytique relativement rapide reposant pour la direction y sur une méthode de développements asymptotiques raccordés et sur la méthode des éléments finis dans la direction z.



**Figure 3.** Plaque étudiée

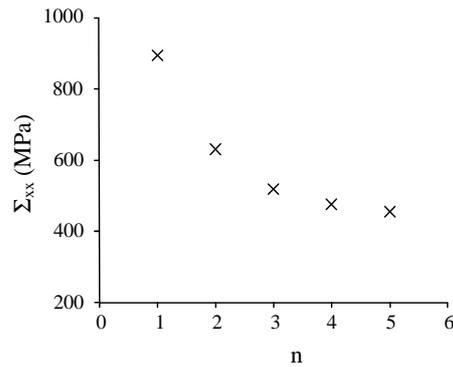
Lécuyer a montré que le tenseur correcteur F décroît très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bord libre de la plaque. L'intérêt de cette démarche réside dans le fait que les six contraintes peuvent être exprimées semi analytiquement en fonction de l'épaisseur totale h du stratifié :

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^N a_k^{ij} e^{-\lambda_k \frac{y}{h}} \quad (3)$$

y est la profondeur de pénétration dans la plaque.  $a_k$  et  $\lambda_k$  sont des termes issus du calcul asymptotique indépendants de l'épaisseur. N dépend du raffinement de la discrétisation de l'épaisseur du stratifié.  $\sigma_{ij}$  est la contrainte interlaminaire à une interface située à une hauteur z dans le stratifié. Les contraintes pouvant être singulière au bord, le critère sera établi en fonction des contraintes moyennes obtenues sur une distance caractéristique  $y_0$  (Léguillon et al., 1987).

On voit apparaître ici de façon explicite la dépendance des contraintes interlaminaires vis à vis de l'épaisseur du stratifié, dépendance qui est observée expérimentalement. Cette dépendance des effets de bords a été largement identifiée et utilisée pour l'identification des paramètres du critère (Lagace et al., 1987), (Lécuyer et al., 1992).

La figure 4 représente l'évolution de la contrainte d'amorçage du délaminage en fonction de l'épaisseur du stratifié pour un empilement  $[15_n/-15_n]_s$  sollicité en traction. On constate que plus le stratifié est fin, moins le risque de délaminage est important.



**Figure 4.** Effet d'épaisseur observé sur des empilements  $[15_n/-15_n]_s$

### 3. Démarche

Il s'agit ici de choisir le matériau et les séquences d'empilement qui vont permettre d'exacerber les phénomènes devant être mis en évidence lors des différentes étapes du développement du critère interlaminaire. Ces étapes, nécessairement basées sur des résultats expérimentaux, sont les suivantes : définition de la formulation du critère, identification des paramètres intrinsèques au matériau (résistances interfaciales, distances caractéristiques), validation du critère.

#### Physionomie des essais mécaniques à mettre en œuvre

Afin de recenser les différentes caractéristiques expérimentales nécessaires au développement du critère, chacune des étapes mentionnées ci-dessus est décrite :

- Définition de la formulation du critère.

Il est nécessaire ici de pouvoir comparer le comportement d'une interface sollicitée en traction ( $\sigma_{zz} > 0$ ) à celui d'une interface identique sollicitée en compression ( $\sigma_{zz} < 0$ ) sur des empilements identiques. Pour cela, la réalisation d'essais de traction et de compression a été envisagée.

- Identification des paramètres du critère

Outre la nécessité de reproduire expérimentalement l'effet d'épaisseur, les empilements doivent permettre d'identifier séparément les paramètres de cisaillement, d'arrachement et de compression d'interface. Des séquences d'empilements délaminant en cisaillement pur puis d'autres délaminant en présence de la contrainte normale interlaminaire ont alors été recherchés.

- Validation du critère

Il a fallu confronter les prédictions du critère aux contraintes de délaminage déterminées expérimentalement sur des empilements représentatifs du champ d'application du critère (présence d'endommagement intralaminaire, délaminage en cisaillement, arrachement et compression interfaciaux).

#### Sélection des stratifiés

Une étude préalable, basée sur des considérations énergétiques simples, a permis de sélectionner le matériau et les empilements qui ont été utilisés lors de la campagne expérimentale. Le matériau a été choisi pour sa faculté à produire un effet

d'épaisseur prononcé dans le but de favoriser l'identification des paramètres du critère. Il est composé de fibres de carbone haute résistance G947 et de résine époxy M18. Les constantes d'élasticité planes (Tab. 1) et les paramètres du modèle d'endommagement (Tab. 2) ont été identifiés expérimentalement. Les propriétés hors plan ont ensuite été déduites de l'hypothèse d'isotropie transverse.

$\nu_f$	$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$G_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$\nu_{12}$
46	97,6	8,0	8,0	2,67	2,67	3,10	0,5	0,5	0,37

**Tableau 1 : Propriétés mécaniques de la couche élémentaire**

$Y_0$	$Y_c$ (MPa)	$Y_c'$	$b$	$b'$
0	12,5	0,55	2,7	1

**Tableau 2 : Paramètres du modèle d'endommagement intralaminare**

Cinq séquences d'empilement ont également été retenues, choisies cette fois-ci pour leur mode de délaminage : les empilements  $[\pm 10_n]_s$ ,  $[\pm 20_n]_s$  et  $[\pm 30_n]_s$  délaminant en mode de cisaillement quasi pur et les empilements  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$  et  $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$  délaminant en mode mixte (cisaillement et arrachement ou compression combinés). Nous n'avons pas trouvé d'empilement délaminant en mode d'arrachement ou de compression pur à une interface de type  $\theta 1/\theta 2$  (avec  $\theta 1 \neq \theta 2$ ).

### Présentation de la démarche

La démarche établie découle directement de la sélection des séquences d'empilement. En l'absence d'empilement délaminant en mode d'arrachement ou de compression quasi pur, l'étude de l'influence de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$  nécessite le développement préalable d'un critère en cisaillement pur. La mise en œuvre de ce critère est réalisée à partir de l'empilement  $[10_n]_s$ . L'influence de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$  est alors mise en évidence à partir de la comparaison d'essais de traction et de compression conduits sur l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$ . Cette étape a permis de proposer une formulation complète du critère d'amorçage.

Dans le but de limiter le nombre d'essais, l'identification des paramètres de ce critère a également été basée sur les résultats expérimentaux obtenus sur l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$ . Les empilements  $[\pm 20_n]_s$ ,  $[\pm 30_n]_s$  et  $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$  ont ensuite été utilisés pour valider les différentes étapes de la mise en œuvre du critère proposé.

## 4. Essais d'Amorçage du DÉLAMINAGE

La démarche énoncée ci-dessus impose la réalisation d'essais d'amorçage du délaminage en traction et en compression. Si des essais de traction (type EDT) sont couramment réalisés dans ce genre d'étude, les essais de compression sont plus délicats à mettre en œuvre et peuvent s'avérer difficilement exploitables (Lévêque, 1998). Un essai de compression a alors été spécifiquement conçu (Lagunegrand et al, 2006).

### Essais de traction

Ces essais sont des essais d'amorçage classiques (Edge Delamination Testing) réalisés sur des éprouvettes munies de talons en composite verre/époxy (Fig. 7).

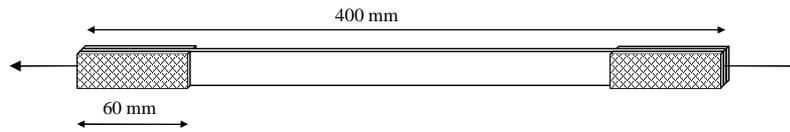


Figure 5 : Eprouvette de traction

### Essais de compression

La compression du stratifié est induite par un chargement de flexion quatre points (F4P) appliqué à une structure sandwich (Fig. 6 et 7).

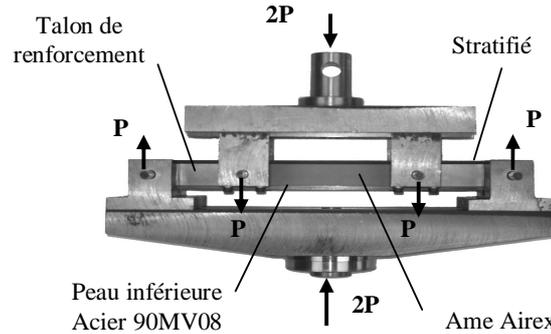


Figure 6 : Eprouvette et montage de flexion quatre points

L'âme de cette structure a été renforcée et l'une des peaux est le stratifié étudié. Les différents éléments de cette structure sont assemblés par collage. L'originalité de ce montage réside dans le principe de chargement de l'échantillon : les efforts sont introduits au niveau des talons en acier limitant ainsi les surcontraintes dans la peau composite. La géométrie de la peau stratifiée testée est identique à celle utilisée pour effectuer les essais de traction ( $L=400\text{mm}$ ,  $b=20\text{mm}$ ).

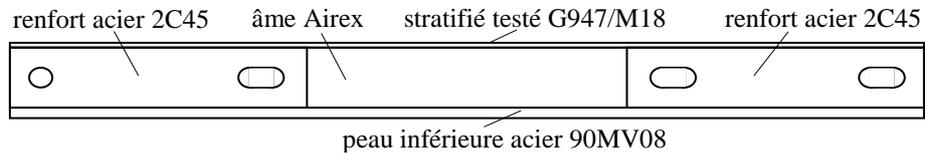


Figure 7 : Eprouvette de compression

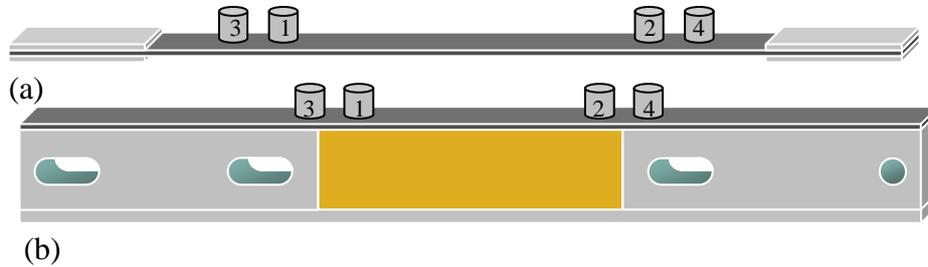
### Détection de l'amorçage du délaminage par analyse des signaux acoustiques.

Afin de détecter de manière fiable l'amorçage du délaminage, l'analyse des signaux acoustiques a été effectuée à l'aide des logiciels d'analyse statistique multivariées. L'analyse multiparamétrique sur les caractéristiques extraites des signaux d'EA est de plus en plus utilisée pour séparer et identifier les différents mécanismes sources. Cette méthode consiste à mettre en évidence, par le biais de multiples corrélations, s'il existe une ou plusieurs relations de dépendances particulières entre ces deux paramètres de forme (amplitude, durée, nombre de coups, énergie, fréquence,...). Cependant, dans les cas les plus complexes, lorsque

les populations des données se superposent ou lorsque le nombre de paramètres corrélés est supérieur à deux, l'analyse des signaux d'EA aux moyens de simples corrélations en deux dimensions n'est plus efficace. Afin d'augmenter la puissance de l'analyse multiparamétrique, Physical Acoustics a développé un ensemble d'outils cohérents utilisant des analyses statistiques, en composantes principales, logiques ainsi que des réseaux de neurones. Cette plateforme d'analyse s'appelle NOESIS, elle permet d'identifier et de séparer des sources d'EA d'origines différentes, mais aussi de qualifier les fonctions de propagation.

Il est alors possible de regrouper par famille les différents événements acoustiques enregistrés lors des essais en comparant leurs caractéristiques (amplitude, durée, nombre de coups, énergie, fréquence,...). Le but était alors d'identifier la famille d'évènements, ou l'évènement, qui correspond à l'amorçage du délaminage.

Pour cela, une signature acoustique de l'amorçage du délaminage a été définie. Elle est basée sur l'analyse de deux graphes de corrélation (énergie/amplitude et nombre de coups/amplitude) ainsi que sur une méthode linéaire de localisation à quatre capteurs. Cette méthode de détection est applicable aux deux types d'éprouvette (traction et compression) utilisés dans cette étude et permet de ne considérer que les évènements dont la source se situe dans la zone utile de ces éprouvettes (Fig. 8).



**Figure 8** : Position des capteurs d'émission acoustique

D'importantes précautions sont néanmoins nécessaires lors de l'interprétation des différents signaux, notamment lors des essais de compression. La rupture du "bourrelet" de colle entre le stratifié et l'âme peut en effet provoquer une signature acoustique similaire à celle attribuée à l'amorçage du délaminage. Des observations au microscope ont donc été réalisées afin de confirmer la présence de fissure interlaminaire.

## 5. Proposition d'Une formulation

La démarche exposée précédemment impose le développement d'un critère en cisaillement afin de pouvoir mettre en évidence l'influence de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$  et ainsi proposer une formulation en accord avec les résultats d'essais.

**5.1 Mise en oeuvre du critère en cisaillement pur**

La formulation du critère en cisaillement pur considéré est une formulation classique (Eq. 4) dans laquelle les caractéristiques en cisaillement dans le plan (x,z) sont supposées identiques à celles en cisaillement dans le plan (y,z). Deux paramètres doivent alors être identifiés : la résistance au cisaillement interlaminaire  $\sigma_{xz}^D$  et la distance caractéristique  $y_{0xz}$ .

$$\frac{\bar{\sigma}_{xz}^2 + \bar{\sigma}_{yz}^2}{(\sigma_{xz}^D)^2} = 1 \quad \text{avec} \quad \bar{\sigma}_{xz} = \frac{1}{y_{0xz}} \int_0^{y_{0xz}} \sigma_{xz} dy \quad \text{et} \quad \bar{\sigma}_{yz} = \frac{1}{y_{0xz}} \int_0^{y_{0xz}} \sigma_{yz} dy \quad (4)$$

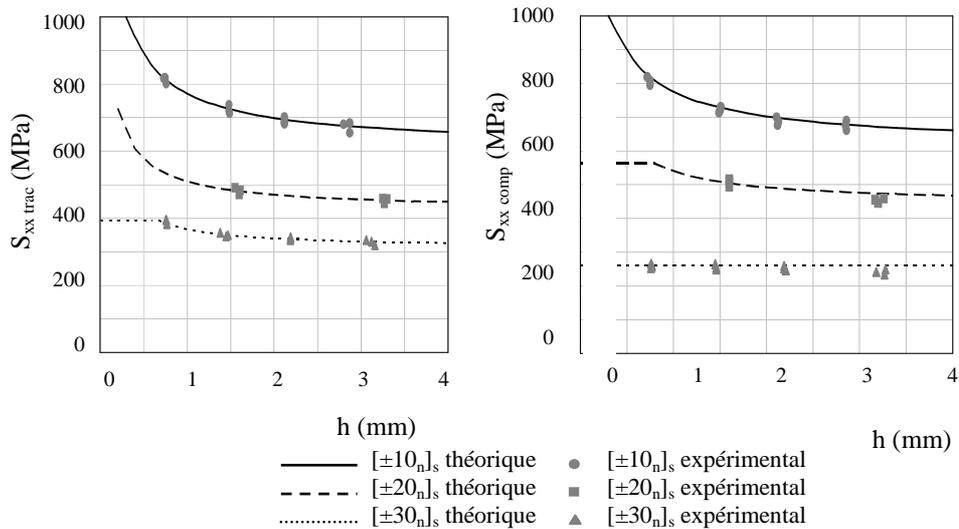
Ces paramètres sont déterminés de façon à minimiser l'écart (Eq. 5) entre les prédictions du critère  $S_{xx}^{th}$  et les résultats expérimentaux  $S_{xx}^{exp}$  de l'empilement  $[\pm 10_n]_s$ .

$$\delta(y_{0xz}, \sigma_{xz}^D) = \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \left[ \frac{1}{n_{ee}} \sum_{j=1}^{n_{ee}(i)} \left( 1 - \frac{S_{xx}^{th}(i)}{S_{xx}^{exp}(i,j)} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Le terme  $n_e$  désigne le nombre d'épaisseurs et  $n_{ee}$  le nombre d'éprouvettes par épaisseur. Les résultats de cette identification (Tab .3 et Fig. 9) valident la méthode utilisée et montrent qu'il est possible, avec un couple de paramètres unique, de prédire l'amorçage du délaminage sur des empilements délaminant en mode de cisaillement pur.

$y_{0xz}$ (µm)	$\sigma_{xz}^D$ (MPa)	écart $\delta$
11	265	$1,13 \cdot 10^{-4}$

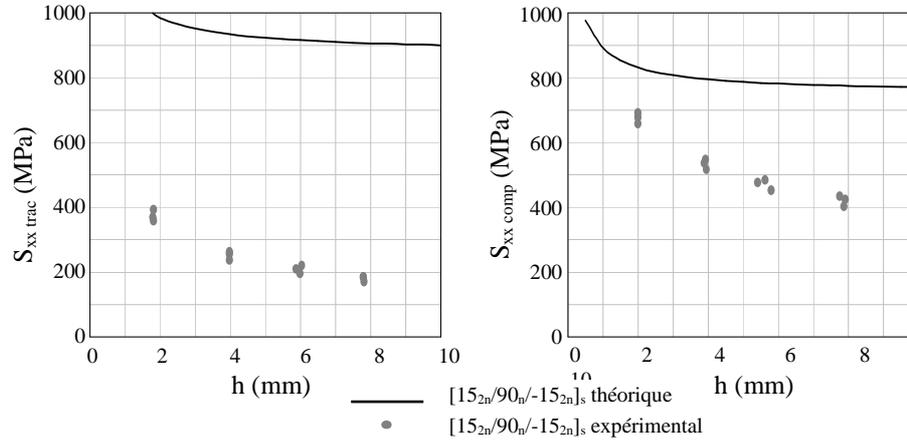
**Tableau 3 : Valeurs des paramètres de cisaillement**



**Figure 9 : Prédications du critère en cisaillement pur en traction et compression**

### 5.2 Mise en évidence de l'influence de la contrainte normale interlaminaire $\sigma_{zz}$ .

Pour quantifier la contribution de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$  sur l'amorçage du délaminage, nous avons utilisé les prédictions du critère en cisaillement pur sur l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$  délaminant en mode de cisaillement et d'arrachement ou de compression combinés (Fig. 10). Nous avons alors supposé que les termes supplémentaires, permettant de ramener ces prédictions aux alentours des résultats expérimentaux, sont fonction de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$ .



**Figure 10 :** Prédiction du critère en cisaillement pur en traction et compression

Il apparaît très nettement sur cette figure que la prise en compte dans le critère de la contrainte normale interlaminaire doit permettre de faire redescendre la courbe théorique et cela pour les deux types de sollicitation (traction et compression). Une contrainte  $\sigma_{zz}$ , qu'elle soit positive (effet d'ouverture de fissure) ou négative (effet de fermeture de fissure) aurait donc tendance à favoriser l'amorçage du délaminage. Il apparaît néanmoins que l'influence de la contrainte normale interlaminaire  $\sigma_{zz}$  sur l'amorçage du délaminage est plus importante lorsque celle-ci est positive.

### 5.3 Formulation proposée.

Les différentes formulations rencontrées dans la littérature peuvent être classées en deux catégories : la première suppose que les phénomènes d'arrachement et de compression d'interface peuvent être décrits par une même formulation, la seconde en revanche suppose que ce sont deux mécanismes distincts et que des formulations différentes sont donc nécessaires pour appréhender ces deux phénomènes. Nous proposons alors d'étudier un critère dont la formulation dépend du signe de la contrainte normale interlaminaire (Eq. 6).

$$\frac{\bar{\sigma}_{xz}^2 + \bar{\sigma}_{yz}^2}{(\sigma_{xz}^D)^2} + \frac{\bar{\sigma}_{zz}^2}{(\sigma_{zz}^{DT})^2} = 1 \quad \text{si } \sigma_{zz} > 0 \quad \text{et} \quad \frac{\bar{\sigma}_{xz}^2 + \bar{\sigma}_{yz}^2}{(\sigma_{xz}^D)^2} + \frac{\bar{\sigma}_{zz}^2}{(\sigma_{zz}^{DC})^2} = 1 \quad \text{si } \sigma_{zz} < 0 \quad (6)$$

Dans ces relations, le calcul de la contrainte moyenne est réalisé sur des longueurs caractéristiques différentes. Ainsi deux paramètres sont à identifier par formulation : une distance caractéristique ( $y_{0zz}^T$  ou  $y_{0zz}^C$ ) et une résistance interfaciale ( $\sigma_{zz}^{DT}$  ou  $\sigma_{zz}^{DC}$ ). Les paramètres de cisaillement sont supposés connus.

## 6. Mise en œuvre du critère

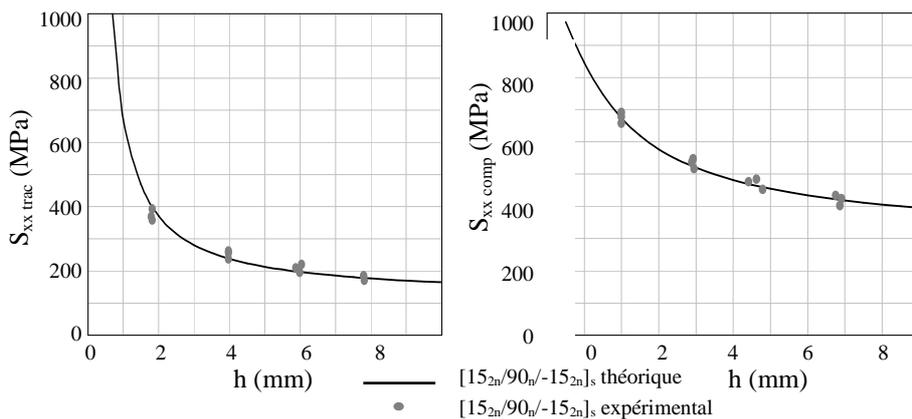
La formulation étant définie, le développement de ce critère nécessite l'identification des paramètres d'arrachement et de compression avant de pouvoir juger de la qualité des prédictions réalisées.

### 6.1 Identification des paramètres.

La méthode d'identification des paramètres est encore similaire à celle utilisée pour déterminer les paramètres de cisaillement. Les résultats expérimentaux considérés sont ceux de l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$  sollicité en traction (pour  $y_{0zz}^T$  et  $\sigma_{zz}^{DT}$ ) et en compression (pour  $y_{0zz}^C$  et  $\sigma_{zz}^{DC}$ ). Les résultats obtenus (Tab. 4 et Fig. 11) valident la méthode utilisée.

$y_{0zz}^T$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{zz}^{DT}$	écart $\delta$	$y_{0zz}^C$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{zz}^{DC}$	écart $\delta$
233	13	$7,16 \cdot 10^{-4}$	235	33	$3,98 \cdot 10^{-4}$

**Tableau 4 : Valeurs des paramètres d'arrachement et de compression**

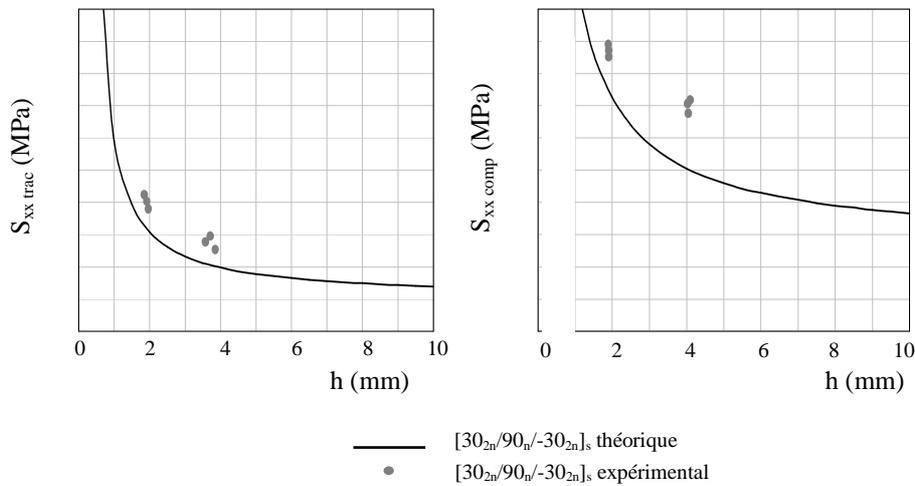


**Figure 11 : Prédications du critère étudié en traction et compression ( $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$ )**

Les distances caractéristiques en arrachement et en compression sont très proches l'une de l'autre. Il semble donc que les phénomènes d'arrachement et de compression puissent être décrits à partir de trois paramètres seulement (pour ce matériau au moins).

## 6.2 Validation du critère.

La validation du critère consiste à comparer les prédictions du critère aux résultats expérimentaux obtenus sur des empilements n'ayant pas été utilisés lors du développement du critère, ici l'empilement  $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$ .



**Figure 12 :** Prédications du critère étudié en traction et en compression ( $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$ )

Nous pouvons voir sur ces graphes que les prédictions du critère sous-évaluent la contrainte d'amorçage du délaminage d'environ 25%, que le stratifié soit sollicité en traction ou en compression. Cet écart provient peut-être de la présence, sur les empilements  $[\theta_{2n}/90_n/-\theta_{2n}]_s$ , de fissures au sein de la couche orientée à  $90^\circ$ . En effet, même si le délaminage a bien été détecté (et constaté), nous n'avons pas pu établir avec certitude qu'il soit apparu lors des essais avant les dégradations intralaminaires observées.

## 7. Conclusion

La méthode suivie pour mettre en évidence l'influence de la contrainte normale interlaminaire a permis de montrer que cette contrainte a tendance à favoriser l'amorçage du délaminage quel que soit son signe. Cette observation, basée sur des résultats expérimentaux, exclut les formulations de critère ne prenant pas en compte les contraintes normales interlaminaires négatives ou leur conférant un effet retardant vis-à-vis de l'amorçage du délaminage. Une formulation, en accord avec les résultats expérimentaux a alors été proposée. Elle permet, à partir de deux relations différentes, de prendre en compte les phénomènes de traction et de compression d'interface. L'identification des paramètres matériau a montré que les distances caractéristiques sont identiques, pour ce matériau, en arrachement et en compression. Les prédictions obtenues sur l'empilement  $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$  utilisé lors du développement de ce critère reproduisent parfaitement les résultats expérimentaux. Nous émettons néanmoins quelques réserves sur les résultats de cette identification, des fissures intralaminaires dans la couche à  $90^\circ$  ayant toujours

accompagné le délaminage constaté sur les empilements  $[\theta_{2n}/90_n/-\theta_{2n}]_s$ . Un modèle d'endommagement tridimensionnel, prenant en compte les effets de bord, représenterait alors un apport considérable à ce genre d'étude. Même si les prédictions réalisées sur l'empilement  $[30_{2n}/90_n/-30_{2n}]_s$  surestiment la contrainte d'amorçage d'environ 25%, le critère et la méthode proposée semblent néanmoins bien adaptés à la prédiction de l'amorçage du délaminage.

### Bibliographie

- Allix O.**, Modélisation du comportement des composites stratifiés : application à l'analyse du délaminage, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1989.
- Brewer J.C., Lagace P.A.**, « Quadratic stress criterion for initiation of delamination », *Journal of composite materials*, vol. 22, 1988, pp. 1141-1155.
- Corigliano A., Allix O.**, « Some aspects of interlaminar degradation in composites », *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 185, 2000 pp. 203-224.
- Engrand D.**, «A boundary layer approach to the calculation of transverse stresses along the free edges of a symmetrical laminated plate of arbitrary width under inplane loading», Composite structures editions, 1981.
- Harry R., Marion G., Leguillon D.**, « Prediction of onset delamination along free edges in laminates onset », *ICCM 13*, Pékin, 2000, paper 1328.
- Herakovich CT.**, *Free-edge effects in laminated composites*. Handbook of composites, structure and design; vol. 2; Elsevier, 1989.
- Kant T., Swaminathan K.**, «Estimation of transverse/ interlaminar stresses in laminated composites-a selective review and survey of current developments », *Composite structures*, vol. 49, n°1, 2000, pp. 65-75.
- Kim R.Y., Soni S.R.**, « Failure of composite laminates due to combined interlaminar normal and shear stresses », *Japan society for composite materials*, Composites 86, recent advances in Japan and the United-States, 1986.
- Ladevèze P.**, *Les modèles classiques et leurs extensions pour le calcul des plaques*, vol. 2, Calcul des structures et intelligence artificielle, Pluralis , 1988.
- Lagace P.A., Brewer J.C., Kassapoglou C.**, «The effect of thickness on interlaminar stresses and delamination in straight-edged laminates», *Journal of composite technology & research*, vol. 9, n°3, 1987, pp. 81-87.
- Lagunegrand L.** Mise en évidence expérimentale et prise en compte dans la formulation d'un critère d'amorçage du délaminage de l'influence des contraintes normales inter plis au sein d'un matériau composite, Thèse de doctorat , Université Bordeaux 1, 2004.
- Lagunegrand L, Lorriot T., Harry R, Wargnier H.**, « Design of an improved four point bending test on a sandwich beam for free edge delamination studies », *Composites part B*, vol. 37, 2006, pp. 127-136.
- Lecuyer F, Engrand D.**, «A methodology for the identification of a criterion for delamination intitution», *Actes des 8° Journées Nationales des Composites*, JNC8, Nov. 1992, pp 751-762.
- Leguillon D, Sanchez-Palencia E.**, «Computation of singular solutions in elliptic problems and elasticity». John Wiley, New-York, 1987.

- Leguillon D., Marion G., Harry R., Lecuyer F.**, «The onset of delamination at stress-free edges in angle-ply laminates – analysis of two criteria », *Composite Science and technology*, vol. 61, 2001, p. 377-382.
- Lévêque D.**, Analyse de la tenue au délaminage des composites stratifiés : identification d'un modèle d'interface interlaminaire, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1998.
- Lorriot T., Marion G., Harry R., Wargnier H.**, «Onset of free-edge delamination in composite laminates under tensile loading», *Composites part B*, vol. 34, n°5, 2003, pp. 459-471.
- Marion G.**, "Etude expérimentale et théorique de l'amorçage du délaminage au bord libre de matériaux composites stratifiés", Thèse de l'Université Bordeaux I, 2000
- O'Brien T.K.**, «Characterization of delamination onset and growth in a composite Laminate, Damage in composite materials, ASTM STP 775, K.L. Reifsnider, Ed. American Society for Testing and Materials, pp. 140-167 (1982).
- Pagano N.J., Pipes R.B.**, «Global-local laminate variational model», *International journal of mechanical sciences*, vol. 15, n°8, 1973, pp. 679-688.
- Pagano N.J., Soni S.R.**, « Some observations on the interlaminar strength of composites laminates », *International journal of solids & structures*, vol. 19, n°3, 1983, pp. 207-228.
- Pagano NJ, Pipes RJ**, « Global-Local laminate variational model », *Int J Solids Struct.*, vol. 19, n°3, 1983, pp 207-228.
- Pipes R.B., Pagano N.J.**, «Interlaminar Stresses in composite laminates under uniform axial extension», *Journal of composites materials*, vol. 4, 1970, pp. 538-548.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Eurocopter Marignagne pour la fabrication du matériau étudié, Christian Hochard (Uniméca Marseille) pour l'identification du modèle d'endommagement, Frédéric Pinassou, personnel IATOS à l'IUT Bordeaux 1, pour la réalisation du montage de flexion quatre points sur sandwich et la Région AQUITAINE et la CEE pour le financement de la machine d'essai.

## **Comment aider des personnes âgées à sortir de leur isolement social ? Deux recherches de psychologie sociale appliquée<sup>1</sup>.**

*Séverine HALIMI-FALKOWICZ\**

*Marie MARCHAND\*,\*\*\**

*André QUADERI\*\**

*Robert-Vincent JOULE\**

\* Laboratoire de psychologie sociale, Université Aix-Marseille I, 29 avenue Robert Schuman, 13090 Aix-en-Provence

\*\* Laboratoire de psychopathologie clinique et psychanalyse, Université Aix-Marseille I, 29 avenue Robert Schuman, 13090 Aix-en-Provence

\*\*\* Université Toulouse : UTM-IUT ; LRP mip Laboratoire Pluridisciplinaire de Midi Pyrénées, IUT Toulouse 2 Figeac

### **1. De l'idéologie du déficit à la désocialisation des personnes âgées**

Les personnes âgées sont essentiellement perçues sous l'angle du déficit, dans notre société, du fait d'un amalgame entre vieillissement et conséquences potentielles du vieillissement (cf. Coudin et Beaufiles, 1997). Le vieillissement est en effet quasi-systématiquement associé, dans les représentations communes, tant à des déficits d'ordre biologique (cardiopathie, diabète, incontinence...) ou physique (difficulté de la marche, apraxies, akinésies...), qu'à des déficits d'ordre psychique (dépression, anxiété, maladie d'Alzheimer et apparentées...) (cf. Pellissier, 2003). Il est cependant difficile de donner une juste définition de la catégorie sociale que sont censées représenter les personnes âgées (de dire, par exemple, quel âge critique constitue la borne inférieure de cette catégorie). La raison en est simple : du fait de la diversité des histoires personnelles, des expériences de vie, des épreuves, etc., il n'y a pas une vieillesse unique, mais autant de vieillesse que de personnes (cf. Gauntlett Beare et Stanley, 2005). Lorsque l'on stéréotype la vieillesse suivant les énoncés édictés par une idéologie du déficit (cf. Tuckman et Lorge, 1953, pour une « échelle de stéréotypes » à l'égard des personnes âgées), on ne reconnaît donc pas, en définitive, l'expérience unique que la personne est en train de vivre.

Ces stéréotypes négatifs envers les personnes âgées ne sont pas sans conséquences. L'idéologie du déficit aboutit à une stigmatisation sociale des personnes âgées (cf. Nelson, 2002) : celles-ci sont par exemple privées, parfois arbitrairement, de leurs droits les plus fondamentaux – mise sous tutelle, institutionnalisation, etc. (cf. Lefeuvre-Darnajou, 2004) –, ou encore abandonnées à la solitude – proches absents (cf. Routasalo et *al.*, 2006), structures sociales non encore adaptées à la circulation de personnes à mobilité réduite (cf. Pennec et Le Borgne-Uguen, 2005), etc.. La désocialisation qui en découle engendre de

---

<sup>1</sup> Ce texte emprunte l'essentiel à Halimi-Falkowicz, Quaderi & Joule (2007) et à Marchand, Halimi-Falkowicz & Joule (2009).

nombreuses pathologies, tant physiques que psychiques (cf. Berg, Johansson et Malmberg, 1982), pathologies susceptibles d'alimenter, rétroactivement, les stéréotypes sociaux dont les personnes âgées sont la cible. Dans la mesure où les facteurs psychosociaux jouent un rôle déterminant dans le maintien ou dans l'effondrement de l'identité de l'Âgé, il apparaît donc essentiel de les prendre en considération, tant dans une perspective préventive, que dans une perspective curative.

## **2. La désocialisation des personnes âgées en maison de retraite**

La plupart des personnes âgées admises en maison de retraite intègrent l'institution sans en avoir pleinement décidé (sur avis de la famille, du tuteur en charge, ou du médecin traitant). Ces personnes doivent alors s'adapter à un univers nouveau, contraignant<sup>2</sup>, qui leur ôte le plus souvent toute prise directe sur l'environnement. Suite à la perte de contrôle subie (cf., Langer et Rodin, 1976), les résidents, trop souvent infantilisés et en lutte contre les stéréotypes négatifs liés à la vieillesse, ont tendance à s'isoler dans leur chambre et à se détourner de la vie sociale de l'institution (cf. Gognalons, 1979), avec les conséquences négatives que l'on sait, notamment sur la qualité de vie (cf., Schulz, 1976). Pour leur permettre de conserver ou de retrouver un rôle social, les maisons de retraite proposent à leurs résidents de participer à des activités sociales. Cependant, si les personnels de santé s'accordent sur l'intérêt de ces activités, près de 56 % des résidents n'y participent jamais (ou presque jamais), alors que leur état de santé leur permettrait de le faire (Paillat, 1982).

On se trouve donc, ici, en présence d'un paradoxe. Il faut que les résidents « décident », afin de préserver une certaine autonomie décisionnelle dans la gestion de leur quotidien, mais en même temps, idéalement, il faut qu'ils décident de faire « ce qu'on attend d'eux » : en l'occurrence, qu'ils décident de participer aux activités proposées, plutôt que de ne pas y participer. Il faut donc, en somme, que les résidents décident librement de faire (certes dans leur intérêt) ce que les professionnels de soin jugent bon qu'ils fassent.

## **3. Objectif de la recherche**

Notre programme de recherche visait à aider les personnes âgées institutionnalisées en maison de retraite à sortir de leur isolement social. Plus concrètement, il s'agissait

---

<sup>2</sup> Les résidents doivent s'adapter à un rythme de vie différent du leur, aux règles qui régissent l'institution, à l'intrusion des personnels soignants dans leur quotidien, etc..

de les amener à quitter leur chambre afin qu'elles participent à une activité sociale donnée.

L'utilisation de procédures de *soumission librement consentie* –SLC– (Joule, 1986 ; Joule et Beauvois, 1998) nous semblait, ici, particulièrement adaptée –ces procédures, puissant outil de mobilisation comportementale, ayant déjà fait preuve de leur efficacité auprès de publics divers (e.g., Joule et Beauvois, 2002). Deux procédures de SLC ont donc été utilisées : une procédure de « Vous êtes libre de... » (Guéguen et Pascual, 2000, 2005 ; Guéguen, LeGouvello, Pascual, Morineau et Jacob, 2002 ; Guéguen, Pascual et Dagot, 2004 ; Pascual et Guéguen, 2002) et une procédure de toucher (Kleinke, 1977 ; pour synthèse, cf. Guéguen, 2002). La procédure de « Vous êtes libre de... » consiste à déclarer les participants libres d'accepter ou de refuser de satisfaire à une requête. Cette déclaration de liberté permet d'augmenter la probabilité d'acceptation de la requête. La procédure de toucher consiste, quant à elle, à toucher le bras des participants dont on sollicite le concours, durant une à deux secondes. Ce contact physique permet d'augmenter la probabilité que les participants répondent favorablement à la requête qui leur est adressée. Nous nous attendions à ce que l'utilisation d'une procédure de « Vous êtes libre de... » et/ou d'une procédure de toucher en maison de retraite affecte positivement tant les intentions comportementales des résidents (intention de participer aux activités proposées) que leurs comportements effectifs (participation à ces activités). Deux expérimentations ont été menées pour tester ces hypothèses générales.

#### **4. Expérimentation 1**

##### ***4.1. Phase 1 : amener les résidents à participer à l'atelier « lecture du journal »***

Participants. 38 résidents d'une maison de retraite de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur ont pris part à la recherche.

Procédure. La phase 1 se déroulait sur 3 semaines : chaque lundi, le psychologue de l'institution se rendait dans les chambres des résidents (chambres individuelles) et leur proposait de participer à l'atelier « lecture du journal »<sup>3</sup>. La semaine 1, il leur proposait de participer à l'atelier, comme à son habitude (aucune procédure de SLC n'était donc utilisée). La semaine 2, il procédait comme lors de la semaine 1, mais il recourait, cette fois, aux deux procédures de SLC : les résidents étaient déclarés libres de participer ou non à l'atelier (procédure de « vous êtes libre de... »), et ils étaient touchés au bras par le psychologue (procédure de toucher). La

---

<sup>3</sup> Atelier ludique basé sur une évocation, par les résidents eux-mêmes, de l'actualité récente.

semaine 3, il procédait comme lors de la semaine 1. Chaque semaine, étaient mesurées l'intention manifestée par les résidents de participer ou non à l'atelier proposé, et leur participation effective.

Résultats. Comme attendu, le recours aux deux procédures de SLC a permis d'augmenter, la semaine 2, la probabilité que les résidents manifestent l'intention de participer à l'atelier (89% vs 68% la semaine 1,  $\chi^2=5.067$ ,  $p<.03$ ), et qu'ils y participent effectivement (89% vs 45% la semaine 1,  $\chi^2=17.227$ ,  $p<.0001$ ). Ces effets ne se maintinrent cependant pas la semaine 3.

#### **4.2. Phase 2 : amener les résidents à participer à l'atelier « mémoire »**

La phase 2 visait à reproduire les résultats obtenus en phase 1, avec un atelier différent : l'atelier « mémoire »<sup>4</sup>. Elle impliquait par ailleurs un plan contrôle/expérimental (plan inter-participants), et non plus un plan avant/après (plan intra-participants) comme en phase 1.

Participants. Les résidents sollicités étaient les mêmes que ceux sollicités en phase 1. Ils étaient cependant répartis, cette fois, en 2 groupes appariés (expérimental vs contrôle) de 20 résidents chacun, sur la base de leur score au MMSE<sup>5</sup>.

Procédure. La phase 2 se déroulait également sur 3 semaines : chaque jeudi, le psychologue se rendait dans les chambres des résidents et leur proposait de participer à l'atelier « mémoire ». La semaine 1, il proposait à tous les résidents de participer à l'atelier, comme à son habitude (absence de recours aux procédures de SLC). La semaine 2, dans le groupe contrôle, il procédait comme lors de la semaine 1 ; dans le groupe expérimental, il recourait également aux deux procédures de SLC (procédures de « vous êtes libre de... » et de toucher). La semaine 3, il procédait comme lors de la semaine 1. Comme précédemment, chaque semaine, étaient mesurées l'intention manifestée par les résidents de participer ou non à l'atelier proposé, et leur participation effective.

Résultats. Comme attendu, les résidents du groupe expérimental furent plus nombreux, la semaine 2, à manifester l'intention de participer à l'atelier (83% vs 58% dans le groupe contrôle ;  $\chi^2=2.863$ ,  $p<.10$ ), et à y participer effectivement (78% vs 42% dans le groupe contrôle,  $\chi^2=4.88$ ,  $p<.03$  ; 78% vs 47% la semaine 1,  $\chi^2=3.634$ ,  $p<.06$ ). Comme précédemment, ces effets ne se maintinrent pas la semaine 3.

#### **4.3. Bilan de l'expérimentation 1**

---

<sup>4</sup> Atelier ludique permettant de stimuler les capacités mnésiques des résidents.

<sup>5</sup> Mini Mental State Examination, de Folstein, Folstein, et McHugh (1975). Test utilisé pour apprécier le déficit intellectuel des patients.

Dans l'expérimentation 1, l'utilisation conjointe de deux procédures de SLC (procédures de « vous êtes libre de... » et de toucher) a donc permis d'augmenter la probabilité que les résidents manifestent l'intention de participer à un atelier donné (atelier « lecture du journal » ou atelier « mémoire ») et qu'ils y participent effectivement. L'expérimentation 1 ne permettait cependant pas de dissocier les effets que pouvaient avoir, prises isolément, chacune des deux procédures utilisées. Une seconde expérimentation a donc été conduite afin d'étudier ces effets de façon dissociée.

## 5. Expérimentation 2

L'expérimentation 2 faisait appel aux deux mêmes procédures de SLC que l'expérimentation 1, mais de façon disjointe, cette fois.

Participants. 55 résidents d'une autre maison de retraite de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur ont pris part à la recherche. Ils étaient répartis en 3 groupes appariés sur la base de leurs scores au MMSE et au test des 5 mots<sup>6</sup> : un groupe contrôle de 19 résidents et deux groupes expérimentaux de 18 résidents chacun. La procédure de « vous êtes libre de... » était utilisée dans un des groupes expérimentaux, celle de toucher, dans l'autre.

### 5.1. Phase 1 : procédure de « vous êtes libre de... » vs procédure de toucher

Procédure. La phase 1 se déroulait sur 3 semaines : chaque mercredi, le psychologue de l'institution (différent de celui intervenant dans l'expérimentation 1) se rendait dans les chambres des résidents (chambres individuelles) et leur proposait de participer à l'atelier « remue-méninges »<sup>7</sup>. La semaine 1, il proposait à tous les résidents de participer à l'atelier, comme à son habitude (absence de recours aux procédures de SLC). La semaine 2, dans le groupe contrôle, il procédait comme lors de la semaine 1 ; dans le premier groupe expérimental, il recourait à une procédure de « vous êtes libre de... », dans le second, à une procédure de toucher. La semaine 3, il procédait comme lors de la semaine 1. Comme dans l'expérimentation 1, chaque semaine, étaient mesurées l'intention manifestée par les résidents, de participer ou non à l'atelier proposé, et leur participation effective.

Résultats. Comme attendu la semaine 2, les résidents furent plus nombreux, suite à l'utilisation d'une procédure de toucher, à manifester l'intention de participer à l'atelier (77% vs 53% dans le groupe contrôle,  $\chi^2=2.565$ ,  $p=.10$  ; 77% vs 50% la semaine 1,  $\chi^2=3.01$ ,  $p=.08$ ), et à y participer effectivement (72% vs 37% dans le

<sup>6</sup>Test de Cowppli-Bony, Fabrigoule, Letenneur, Ritchie, Alperovitch, Dartigues, et Dubois (2005). Le test permet une exploration de la mémoire immédiate et de la mémoire de rappel.

<sup>7</sup> Atelier ludique basé sur des exercices mobilisant l'attention, le raisonnement et la mémorisation.

groupe contrôle,  $\chi^2=4.659$ ,  $p=.03$  ; 72% vs 39% la semaine 1,  $\chi^2=4.05$ ,  $p=.04$ ). Ici encore, les effets ne se maintinrent pas, la semaine 3. Contrairement à nos attentes, l'utilisation d'une procédure de « vous êtes libre de... » s'avéra inefficace. A notre connaissance, c'est la première fois que cette procédure était utilisée avec des personnes âgées, qui plus est, « institutionnalisées ». Sans doute l'âge des résidents et leur perte d'autonomie en maison de retraite, rendent ces derniers peu sensibles à une injonction de liberté.

### ***5.2. Phase 2 : une réactivation des effets dus à la procédure de toucher, via l'utilisation d'une nouvelle procédure de soumission librement consentie***

Une phase 2 prolongeait la phase 1 de deux semaines : elle visait à étudier s'il était possible de réactiver les effets du toucher (observés la semaine 2, mais plus la semaine 3 ; phase 1) en recourant, la semaine 4 (phase 2), à une nouvelle procédure de SLC : la procédure de pied-dans-la-porte (Freedman et Fraser, 1966). Cette procédure consiste à formuler une requête peu coûteuse, avant de formuler la requête qui porte sur le comportement attendu. L'acceptation de la première requête (acte préparatoire) permet d'augmenter la probabilité d'acceptation de la seconde.

Procédure. La semaine 4, le psychologue n'utilisait aucune procédure de SLC, dans le groupe contrôle ; dans les groupes expérimentaux il utilisait une procédure de pied-dans-la-porte dont l'acte préparatoire consistait à signer une pétition en faveur du maintien de l'atelier « remue-méninges ». La semaine 5, il n'utilisait aucune procédure de SLC, quel que soit le groupe. Chaque semaine, étaient mesurées l'intention manifestée par les résidents de participer ou non à l'atelier proposé, et leur participation effective.

Résultats. Comme attendu la semaine 4, les résidents du groupe expérimental dans lequel on recourait à une procédure de toucher, la semaine 2, furent plus nombreux, suite à l'utilisation d'une procédure de pied-dans-la-porte, à manifester l'intention de participer à l'atelier (100% vs 71% dans le groupe contrôle,  $\chi^2=5.229$ ,  $p=.02$  ; 100% vs 67% la semaine 3,  $\chi^2=6$ ,  $p=.01$ ), et à y participer effectivement (87% vs 59% dans le groupe contrôle,  $\chi^2=3.056$ ,  $p=.08$  ; 87% vs 53% la semaine 3,  $\chi^2=3.968$ ,  $p=.04$ ). Ces effets ne se maintinrent cependant pas, la semaine 5.

### ***5.3. Bilan de l'expérimentation 2***

Le recours à une procédure de pied-dans-la-porte a donc permis de réactiver, la semaine 4 (phase 2), les effets observés la semaine 2 suite à l'utilisation d'une procédure de toucher (phase 1).

## 6. Conclusion

Les deux expérimentations réalisées visaient à étudier si le recours à certaines procédures de SLC pouvait s'avérer utile pour aider les personnes âgées institutionnalisées à sortir de leur isolement social, en les amenant à prendre part aux ateliers proposés par l'institution. Dans l'expérimentation 1, l'utilisation conjointe de procédures de « vous êtes libre de... » et de toucher a permis d'augmenter significativement la probabilité que des résidents 1/ manifestent l'intention de participer à un atelier, 2/ y participent effectivement. L'expérimentation 2 semble montrer que cette efficacité est imputable à la seule procédure de toucher. En effet, lorsque la procédure de « vous êtes libre de... » et celle de toucher sont utilisées séparément, seule la seconde s'avère efficace, tant sur les intentions de participation, que sur les participations effectives.

Par ailleurs, dans les deux expérimentations, dès que le psychologue n'utilise plus de procédures de SLC, les résidents retrouvent leurs habitudes d'isolement. L'expérimentation 1 montre, toutefois, que les mêmes procédures peuvent être utilisées au moins deux fois avec efficacité. L'expérimentation 2 montre, quant à elle, que la procédure de toucher peut retrouver son efficacité, quinze jours après avoir été utilisée, lorsque le psychologue utilise une procédure de pied-dans-la-porte.

Si les résultats obtenus ponctuellement sont globalement conformes à nos attentes, ces derniers ne sont malheureusement pas pérennes. Toute la question est de savoir si –et à quelles conditions– les procédures de SLC peuvent, par une utilisation répétée, conduire les résidents d'une maison de retraite à participer régulièrement aux ateliers qui leur sont proposés. Nous espérons que les recherches à venir nous permettront d'avancer dans le traitement de cette question.

## Bibliographie

- Berg, S.; Johansson, B.; Malmberg, B. N** (1982). Loneliness. *Nordisk Psykologi*, 34(3), 303-311.
- Coudin, G. & Beaufils B.** (1997). Les représentations relatives aux personnes âgées. *Actualité et dossier en santé publique*, 21, 12-14.
- Cowppli-Bony, P.; Fabrigoule, C.; Letenneur, L.; Ritchie, K., Alperovitch, A., Dartigues, J. F., & Dubois, B.** (2005). Le test des 5 mots: Validité dans la détection de la maladie d'Alzheimer dans la population générale. *Revue Neurologique*, 161(12), 1205-1212.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E. & McHugh, P.R.** (1975). Mini-Mental State: A practical method for grading the state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 189-198.
- Freedman, J. & Fraser, S.** (1966). Compliance without pressure: The foot-in-the-door technique. *Journal of Personality and Social Psychology*, 4, 195-202.

- Gauntlett Beare, P., Stanley, M.** (2005). *Soins infirmiers en gériatrie. Vieillesse normale et pathologique*. De Boeck Université.
- Gognalons, M.** (1979). Le rôle de malade lors de la vieillesse : résignation, refus ou normalisation ? *L'information psychiatrique*, 55, 647-656.
- Guéguen, N.** (2002). *Psychologie de la manipulation et de la soumission*. Paris : Dunod.
- Guéguen, N., LeGouvello, J., Pascual, A., Morineau, T. & Jacob, C.** (2002). Request solicitation and semantic evocation of freedom: An evaluation in a computer-mediated communication context, *Perceptual and Motor Skills*, 95, 208-212.
- Guéguen, N. & Pascual, A.** (2000). Evocation of freedom and compliance: The "but you are free of..." technique. *Current Research in Social Psychology*, 5 (18), 264-270.
- Guéguen, N., & Pascual, A.** (2005). Improving the response rate to a street survey: an evaluation of the "But you are free to accept or to refuse" technique. *The Psychological Record*, 55, 297-303.
- Guéguen N., Pascual A. & Dagot L.** (2004), Soumission et liberté : la technique du "vous êtes libre de...". In Beauvois J.L, Joule R.V. & Monteil J.-M. (Eds.) *Perspectives Cognitives et Conduites Sociales (IX)*, pp. 365-384. Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- Halimi-Falkowicz, S., Quaderi, A. & Joule, R.V.** (2007). La soumission librement consentie au service de la socialisation de l'Âgé. *Pratiques Psychologiques*, 13(2), 213-225.
- Joule, R.-V.** (1986). Rationalisation et Engagement dans la Soumission Librement Consentie. Thèse pour le Doctorat d'Etat des Lettres et Sciences Humaines. Université des Sciences Sociales de Grenoble.
- Joule, R.-V. & Beauvois, J.-L.** (1998). *La soumission librement consentie*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Joule, R.-V. & Beauvois, J.-L.** (2002). *Petit Traité de Manipulation à l'Usage des Honnêtes Gens*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Kleinke, C.** (1977). Compliance to requests made by gazing and touching experimenters in field settings. *Journal of Experimental Social Psychology*, 13, 218-223.
- Langer, E. J., et Rodin, J.** (1976). The effects of Choice and Enhanced Personal Responsibility for the Aged: A Field Experiment in an Institutional Setting. *Journal of Personality and Social Psychology*, 34(2), 191-198.
- Lefevre-Darnajou, K.** (2004). La violence en milieu hospitalier : de la prévention à la sanction de la violence par le droit. *Médecine & Droit*, 54-66.
- Marchand, M., Halimi-Falkowicz, S. & Joule, R.V.** (2009). Comment aider les résidents d'une maison de retraite à librement décider de participer à une activité sociale? Toucher, "vous êtes libre de..." et pied-dans-la-porte. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/ European Review of Applied Psychology*, 59, 153-161.
- Nelson, T.D.** (2002). *Ageism: Stereotyping and Prejudice against Older Persons*. Cambridge: MIT Press.
- Paillat, P.** (1982). *Vieillesse et vieillesse*. Paris : Presses universitaires de France.
- Pascual, A., & Guéguen, N.** (2002). La technique du «vous êtes libre...» : induction d'un sentiment de liberté et soumission à une requête ou le paradoxe

d'une liberté manipulatrice. *Revue Internationale de la Psychologie Sociale*, 15, 51-77.

**Pellissier, J.** (2003). *La nuit, tous les vieux sont gris. La société contre la vieillesse*. Paris : Bibliophane-Daniel Radford.

**Pennec, S., Le Borgne-Uguen, F.** (2005). *Technologies urbaines, vieillissement et handicaps*. Éditions de l'École Nationale de la Santé Publique.

**Routasalo, P.E.; Savikko, N.; Tilvis, R.S.; Strandberg, T.E., Pitkälä, K.H.** (2006). Social Contacts and Their Relationship to Loneliness among Aged People. A Population-Based Study. *Gerontology*, 52(3), 181-187.

**Schulz, R.** (1976). Effects of Control and Predictability on the Physical and Psychological Well-Being of the Institutionalised Aged. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1976, 33(5), 563-573.

**Tuckman, J., & Lorge, I.** (1953). Attitudes toward old people. *Journal of Social Psychology*, 37, 249-260.



Séverine Halimi-Falkowicz a réalisé sa thèse sous la direction de Robert-Vincent Joule et elle est actuellement membre du laboratoire de psychologie sociale de l'Université de Provence (EA894), et chargée de cours à l'Université de Provence et à l'IUT d'Aix-en-Provence. Ses intérêts de recherche portent pour la plupart sur des problématiques communicationnelles et sur l'influence sociale (communication engageante, nouveaux médias et usages sociaux des TIC, etc.).

Séverine Halimi-Falkowicz

<http://severinehalimi.free.fr/>

## **Allocation de la fiabilité par algorithme génétique : application à la conception d'un Système Instrumenté de Sécurité**

---

**Frédérique BICKING**

IUT Nancy-Brabois, Nancy Université

Le Montet, F-54600, Villers les Nancy

courriel : frederique.bicking@iutnb.uhp-nancy.fr

**Résumé** - *Cet article est consacré au problème d'allocation de fiabilité en conception d'un système instrumenté de sécurité. Le problème de conception est défini comme un problème d'optimisation et résolu par une méthode génétique avec une stratégie élitiste. La performance de cette méthode est montrée à travers plusieurs problèmes d'optimisation de fiabilité référencés dans la littérature. Puis, la méthode génétique est appliquée dans le cadre de l'aide à la conception de systèmes instrumentés de sécurité (SIS). L'approche présentée offre la possibilité de définir une structure complexe de SIS avec redondance diversifiée, ce qui n'est pas le cas dans l'approche classique d'allocation de redondance. Pour ce faire, les réseaux de fiabilité de Kaufmann basés sur des multi-graphes sont utilisés. Quelques exemples de mise en œuvre sont donnés sur un problème d'allocation de redondance diversifiée et sur la recherche de structures de connexion des composants intégrant la réduction des coûts de connexion pour obtenir des SIS qui satisfont aux niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) cibles.*

**Mots-clés** : *Fiabilité, réseaux de fiabilité de Kaufmann, optimisation, méthode génétique, système instrumenté de sécurité.*

### **Introduction**

La conception de systèmes comporte le choix des composants et des configurations pour satisfaire les caractéristiques fonctionnelles mentionnées dans le cahier des charges. La conception de systèmes à partir de composants disponibles sur le marché, dont le coût, la fiabilité, le poids et d'autres attributs sont connus, peut être formulée comme un problème d'optimisation combinatoire. En outre, une des étapes indéniables dans la conception de systèmes à plusieurs éléments est le problème d'employer les ressources disponibles de manière la plus efficace afin de maximiser la fiabilité du système global et/ou de réduire au minimum la consommation des ressources tout en réalisant les objectifs de fiabilité. De ce fait, la conception fiable de système peut être adressée comme un problème d'optimisation de fiabilité de systèmes.

L'optimisation de fiabilité est d'un grand intérêt de par l'importance critique de la fiabilité dans divers secteurs industriels. Le but principal, qui est toujours celui

d'améliorer la fiabilité du système, peut être atteint en réduisant la complexité en augmentant la fiabilité des composants (allocation de fiabilité) ou par redondance matérielle (allocation de redondance) ou une combinaison de ces deux approches.

Quelques méthodes existantes emploient des techniques d'optimisation pour résoudre des problèmes de minimisation du coût du système sous contrainte de fiabilité, de maximisation de la fiabilité du système sous la contrainte de coût, d'allocation de redondance et plus généralement des problèmes d'optimisation de fiabilité des systèmes. Tillman *et al.* (Tillman *et al.*, 1980) et Kuo *et al.* (Kuo *et al.*, 2000) ont passé en revue les techniques d'optimisation développées pour résoudre divers problèmes de fiabilité en conception de systèmes. Nakagawa *et al.* (Nakagawa *et al.*, 1981) ont présenté et comparé leurs méthodes heuristiques pour un problème d'allocation de redondance avec contraintes non linéaires. Kuo *et al.* (Kuo *et al.*, 2001) ont présenté une méthode de recherche (PK-Alg) basée sur l'ordre lexicographique pour maximiser la fiabilité d'un système cohérent avec un choix de composants fini et des options de redondance. Yalaoui *et al.* (Yalaoui *et al.*, 2001) ont proposé une méthode de programmation dynamique (YCC) basée sur l'analogie entre le problème d'allocation de fiabilité et de redondance dans les systèmes série-parallèles et le problème unidimensionnel du sac à dos.

C'est une approche génétique qui a été employée dans ce travail. Les algorithmes génétiques font partie des méta-heuristiques, techniques qui incluent, entre autres, le recuit simulé, la recherche tabou et les stratégies évolutionnaires. Coit *et al.* (Coit *et al.*, 1996) ont présenté une technique d'optimisation en utilisant un algorithme génétique avec un réseau de neurones pour déterminer une configuration optimale quand il y a plusieurs alternatives au choix des composants disponibles et identifier de ce fait, les composants et la configuration d'un système série-parallèle. Plusieurs papiers concernant l'optimisation de la fiabilité des systèmes employant des algorithmes génétiques ont été édités ces dernières années comme (Tillman *et al.*, 1977 ; Tzafestas, 2002 ; Misra, 1986 ; Painton *et al.*, 1995 ; Vidyarthi *et al.*, 2001 ; Dhillon, 1999 ; Yang *et al.*, 1999 ; Coit *et al.*, 1996). Gen *et al.* présentent dans (Gen *et al.*, 2006) un bref aperçu d'approches basées sur les algorithmes génétiques pour divers problèmes d'optimisation de la fiabilité et introduisent également certaines approches hybrides combinant les algorithmes génétiques avec la logique floue, les réseaux de neurones et d'autres techniques de recherche conventionnelles.

L'approche génétique a été choisie parce qu'elle peut être facilement appliquée aux divers problèmes exposés dans cet article. Le but est de présenter une procédure de détermination de la structure optimale de systèmes sous contrainte de coût et de disponibilité commerciale des composants. En outre, c'est à la conception de systèmes particuliers tels les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) que nous nous intéressons. Dans la section 2, la méthode génétique utilisée est présentée. Dans la

section 3, quatre problèmes référencés dans la littérature sont exposés, ce qui permet de juger de l'efficacité de la méthode utilisée. La section 4 présente un problème bien plus complexe qui est la détermination de la structure optimale d'un système instrumenté de sécurité. Ce problème est formulé en tant qu'allocation de fiabilité soumise à une contrainte de niveau de fiabilité exprimée par le niveau exigé d'intégrité de sécurité (SIL).

### **Description de la méthode génétique**

Les algorithmes génétiques (AG) sont utilisés comme une technique d'optimisation efficace pour la recherche de l'optimum global d'une fonction. Les AGs ont été mis au point par J. Holland (Holland, 1975) et décrits plus en détail par D.E. Goldberg (Goldberg, 1989). Leur mise en œuvre consiste à créer une population initiale puis, par un processus itératif de sélection -recombinaison, à faire évoluer cette population en fonction d'un critère d'adaptation. Cette adaptation représente la qualité de la solution potentielle. Le passage d'une population à l'autre est appelé une génération. La stratégie étant globalement élitiste, seuls les individus ayant la meilleure adaptation (meilleure solution) seront conservés de génération en génération.

### **Description du formalisme génétique utilisé**

La convergence des algorithmes génétiques a été démontrée pour de nombreux problèmes, bien que l'optimalité ne puisse pas être garantie. La capacité d'une approche génétique à trouver la bonne solution dépend souvent de l'adéquation du codage, des opérateurs d'évolution et des mesures de l'adaptation au problème traité. La méthode proposée ici est basée sur les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989) et des stratégies d'évolution (Schewefel, 1981). Elle combine le principe de la survie des individus les plus aptes et les combinaisons génétiques pour un mécanisme de recherche élitiste. La méthode génétique produit de nouvelles solutions (enfants) en combinant les solutions existantes (parents) sélectionnés dans la population, ou par mutation. L'idée centrale est que les solutions parents auront tendance à produire des solutions enfants supérieures en terme d'adaptation, de sorte que finalement une solution obtenue soit optimale. Dans cette étude, nous avons utilisé une méthode génétique précédemment définie dans (Bicking *et al.*, 1994) avec une définition du chromosome et des opérateurs de sélection, combinaison et mutation appropriés. Contrairement aux algorithmes génétiques, la méthode génétique utilisée est conçue pour minimiser et non maximiser. Cette méthode, comme les algorithmes génétiques, n'est pas limitée par des hypothèses sur la fonction objectif et l'espace de recherche, tels que la continuité ou la dérivabilité. Elle utilise une population de points en simultané par contraste avec des méthodes habituelles n'utilisant qu'un seul point. Les opérateurs génétiques améliorent le processus de recherche de

manière élitiste afin de trouver l'optimum global. Il existe des opérateurs génétiques plus compliqués, mais les opérateurs de base ainsi que leurs diverses modifications peuvent généralement être appliqués. Le choix de ces opérateurs dépend de la nature du problème et des exigences de performance. Le mécanisme global peut être esquissé comme suit :

- 1) *Création de la population initiale*
- 2) *Evaluation de l'adaptation de tous les individus de la population*
- 3) *Test du critère d'arrêt. Si non rempli :*
- 4) *Sélection d'une proportion des meilleurs individus (parents pour la production de nouveaux individus)*
- 5) *Choix de deux parents et combinaison de leur matériel génétique*
- 6) *Test de l'adaptation de cet enfant. Si elle est bonne, cet enfant intègre la population sinon retour à l'étape 5*
- 7) *Itération des étapes 4 à 6 jusqu'à reconstruction de la population*
- 8) *Retour à l'étape 2*

Le critère d'arrêt peut être un nombre de cycles de l'algorithme (nombre de générations), la moyenne des adaptations des individus, un facteur de convergence, etc. Un individu représente un vecteur de variables de décision (paramètres) et son adaptation est mesurée par la fonction objectif. Le formalisme et les opérateurs génétiques sont détaillés ci-après.

1) Chromosome, individu, population initiale :

Chaque chromosome est le résultat potentiel du problème d'optimisation. Nous avons défini un chromosome comme une chaîne, composée de  $m$  gènes qui sont les paramètres (variables de décision) à trouver. La valeur d'un gène est appelée un allèle. La valeur possible d'un allèle est un entier ou une valeur réelle. Chaque gène est créé au hasard, selon 1 :

$$a_j = (a_j)_l + ((a_j)_u - (a_j)_l) \times \gamma_j \quad (1)$$

où

- $\gamma_j \in [0,1]$  est choisi aléatoirement
- $(a_j)_l, (a_j)_u$  les bornes min et max de l'allèle  $a_j$ . Elles sont choisies en fonction du problème à traiter.

Chaque chromosome, appelé un individu dans une représentation haploïde, peut s'écrire :

$$I(k) = [a_1, \dots, a_j, \dots, a_m]$$

avec :

- $m$  le nombre de gènes
- $k = 1, \dots, N$  et  $N$  est la taille de la population (nombre d'individus).

Toutes les contraintes sont prises en compte dans la phase initiale de création de la population. Quand un individu est créé, si les contraintes sont respectées, cet individu est intégré dans la population initiale sinon il ne l'est pas. Au début de

l'algorithme, la population initiale contient  $N$  individus. La longueur du chromosome  $m$  et la taille de la population  $N$  sont deux des quatre paramètres de réglage de la méthode génétique.

2) Fonction objectif et adaptation :

L'adaptation représente la qualité de l'individu et, est évaluée par le biais de la fonction objectif. La fonction objectif est généralement la fonction à minimiser. Une fois la fonction objectif définie, l'adaptation de chaque individu de la population initiale est calculée et les opérateurs génétiques peuvent être appliqués.

3) Reproduction et opérateurs génétiques :

L'objectif de la reproduction est de mettre l'accent sur la survie des individus les plus aptes. Dans notre méthode, une proportion d'individus ayant la meilleure adaptation (la valeur la plus faible de la fonction objectif), est sélectionnée pour la combinaison génétique.

- Sélection des individus les plus aptes :

Lorsque l'ensemble de la population est évaluée à la génération  $t$ , les individus sont classés par ordre croissant de la fonction objectif. Ensuite, la sélection est effectuée. Les  $N \times G$  premiers individus (les  $N \times G$  meilleurs) sont sélectionnés pour être des parents.  $G$  est le troisième paramètre de réglage de la méthode génétique.  $G$  est appelé le fossé entre les générations.  $G$  permet de sélectionner une partie de la population afin de fournir suffisamment de matériel génétique sans diminuer la vitesse de convergence (Goldberg, 1989).

- Combinaison : Deux parents  $P_1$  et  $P_2$  sont choisis aléatoirement parmi les parents potentiels et leurs gènes sont combinés selon 2 :

$$a_j(k) = a_j(P_1) + (a_j(P_2) - a_j(P_1))\gamma_j \quad (2)$$

où

- $\gamma_j$  est un nombre aléatoire uniforme
- $k=N \times G + 1, \dots, N$ , le  $k^{\text{ième}}$  individu
- $j=1, \dots, m$ .

Le nouvel individu créé est ensuite évalué. Si son adaptation est meilleure que celle du pire des parents, il est intégré dans la population pour former la prochaine génération. Si ce n'est pas le cas, on réitère la combinaison.

- Mutation :

La mutation se produit avec une probabilité  $pm$ .  $pm$  est le 4<sup>ème</sup> paramètre de réglage. La mutation consiste à modifier au hasard un ou plusieurs gènes de l'individu. L'individu muté est ensuite évalué. Si son adaptation est meilleure que celle du pire des parents, il intègre la nouvelle génération. Si ce n'est pas le cas, l'étape de combinaison est reprise. Ce type de modification permet de gagner du temps dans le

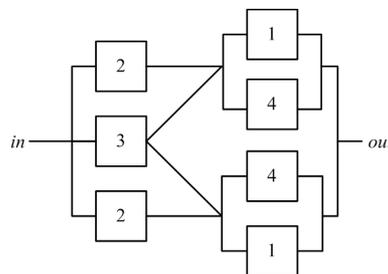
processus de reproduction par la modification des individus. La probabilité de mutation est fixée à  $pm=0.1$ .

Ce schéma de reproduction est répété jusqu'à ce que l'ensemble de la population soit reconstruite ( $k = N$ ). La nouvelle génération devient la population actuelle à la génération  $t+1$ .

#### 4) Critère d'arrêt :

Le critère d'arrêt est évalué sur la population en cours. S'il est rempli, l'ensemble de la population a convergé sur la solution sinon le schéma de reproduction est répété. Le critère d'arrêt utilisé dans cette méthode, exprime que tous les individus ont convergé vers la même solution et suppose que l'évolution n'est plus possible c'est-à-dire qu'aucune meilleure solution ne peut être trouvée.

L'ensemble de la stratégie est élitiste parce que seuls les meilleurs individus sont sélectionnés pour la survie d'une génération à la suivante et peuvent être les parents de nouveaux et meilleurs individus. Pour assurer la convergence de l'algorithme, le réglage des paramètres  $N$  et  $G$  doit être réalisé avec soin. La taille de la population  $N$  affecte à la fois la performance et l'efficacité de l'algorithme (Bicking *et al.*, 1994). L'algorithme est moins performant avec de très petites tailles de population. Une grande taille de la population peut contenir plus de solutions intéressantes et décourage la convergence prématurée vers des solutions sous-optimales, mais requiert davantage d'évaluations par génération, pouvant conduire à un faible taux de convergence. Le fossé entre générations  $G$  permet de déterminer la proportion de la population qui reste inchangée entre deux générations. Il est choisi de manière à sélectionner les individus aussi sévèrement que possible, sans trop détruire la diversité de la population. La stratégie globale utilisée suppose que tous les individus qui composent la population, de génération en génération, satisfont toutes les contraintes. La meilleure solution de la dernière génération représente la solution du problème en accord avec les critères définis.



**Figure 1.** Exemple de système complexe (problème 1)

### Application à l'allocation de fiabilité

La diversité des structures des systèmes, des contraintes sur les ressources, et autres options pour l'amélioration de la fiabilité a conduit à la définition de plusieurs techniques d'optimisation. En ingénierie de la fiabilité, des approches génétiques ont été utilisées pour résoudre des problèmes complexes et sont particulièrement efficaces pour les problèmes d'optimisation combinatoire avec de larges espaces de recherche. Afin d'illustrer la performance de la méthode proposée, deux systèmes complexes et deux systèmes mixtes multi-étages sont étudiés. Ces types de problèmes comportent de l'optimisation des coûts sous contrainte de fiabilité dans un système complexe (problème 1), de l'optimisation de la fiabilité sous contraintes de coûts (problème 2), l'allocation optimale de la redondance pour un système mixte multi-étage (problème 3) et l'optimisation de fiabilité avec deux critères (problème 4).

#### Problème 1 : Système complexe (Tillman *et al.*, 1980)

L'objectif est de minimiser le coût du système sous contrainte de fiabilité. Ce système est présenté sur la figure 1.  $r_i$  représente la fiabilité du  $i^{\text{ème}}$  composant. La fiabilité du système est donnée par :

$$R_S = 1 - r_3 \left[ (1 - r_1)(1 - r_4) \right]^2 - (1 - r_3) \left[ 1 - r_2 (1 - (1 - r_1)(1 - r_4)) \right]^2$$

Le coût du système  $C_S$  à minimiser est soumis aux contraintes :

$$r_{i,\min} \leq r_i \leq 1.0, \quad i = 1 \dots 4$$

$$R_{S,\min} \leq R_S \leq 1.0$$

où  $r_{i,\min}$  et  $R_{S,\min}$  sont respectivement les bornes minimales de la fiabilité du  $i^{\text{ème}}$  composant et du système. La fonction coût du système est donnée par :

$$C_S = \sum_{i=1}^4 K_i \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} r_i\right) \right]^{\alpha_i}$$

où  $K_1 = 25; K_2 = 25; K_3 = 50; K_4 = 37.5; r_{i,\min} = 0.5; R_{S,\min} = 0.99$  et  $\alpha_i = 1.0$  pour  $i = 1, 2, 3, 4$ . Le minimum global du coût du système est 390.57 (Ravi *et al.*, 1997).

La formulation du problème pour la méthode génétique est :

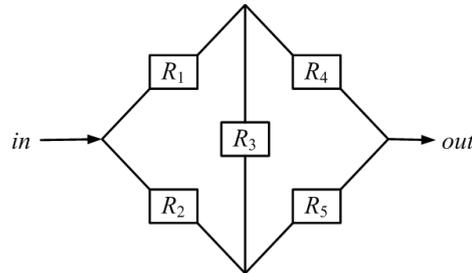
- l'individu est composé de 4 gènes, le  $i^{\text{ème}}$  gène est la fiabilité du  $i^{\text{ème}}$  composant. Les bornes minimales et maximales pour chaque gène sont fixées  $r_{i,\min} = 0.5$  et 1 respectivement
- chaque individu  $I(k)$  vérifie  $R_{S,\min} \leq R_S(I(k)) \leq 1.0$
- la fonction objectif est définie par  $Fit(k) = C_S(k)$  ce qui représente le coût du système à minimiser pour la solution potentielle  $I(k)$

Les essais ont été faits avec 100 simulations de l'algorithme. La méthode génétique proposée a été testée avec la taille de la population  $N=500$  et le paramètre fossé entre générations  $G=0.2$  (ce réglage est appelé GM1). D'autres tests ont été réalisés avec différentes valeurs de  $N=1000$  et  $G=0.5$  nomme GM2. Les résultats obtenus (valeurs

moyennes sur les 100 essais consécutifs) sont résumés dans le tableau I et comparés à ceux obtenus avec le recuit simulé (SA) et une variante de l'algorithme de recuit simulé (I-NESA), les deux sont reportés dans (Ravi *et al.* 1997).

	SA	I - NESA	GM1	GM2
$r_1$	0.82529	0.82516	0.8235	0.8229
$r_2$	0.89169	0.89013	0.8895	0.8891
$r_3$	0.62161	0.62825	0.6325	0.6367
$r_4$	0.72791	0.72917	0.7305	0.7295
$R_S$	0.99	0.99	0.99	0.99
$C_S$	390.6327	390.572	390.8442	390.7984
Temps CPU	30.59	22.57	1.68	9.33

**Table I :** Résultats comparés pour le problème 1



**Figure 2.** Système complexe en pont (problème 2)

**Problème 2 : Système en pont (Mohan *et al.*, 1988)**

On considère le réseau en pont (fig. 2) avec les fiabilités  $r_i$ ,  $i = 1 \dots 5$ . La fiabilité du système  $R_S$ , est donnée par (Ravi *et al.*, 1997) :

$$R_S = r_1 r_4 + r_2 r_5 + r_2 r_3 r_4 + r_1 r_3 r_5 + 2r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_4 - r_1 r_3 r_4 r_5 - r_2 r_3 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_5$$

L'objectif est de déterminer les  $r_i$ ,  $i = 1 \dots 5$  qui minimisent :

$$C_S = \sum_{i=1}^5 a_i \exp\left(\frac{b_i}{1-r_i}\right)$$

avec les contraintes :

$$0 \leq r_i \leq 1$$

$$0.99 \leq R_S \leq 1$$

$$a_i = 1, b_i = 0.0003 \forall i$$

La formulation du problème pour la méthode génétique est :

- l'individu est composé de 5 gènes, le  $i^{\text{ème}}$  gène est la fiabilité du  $i^{\text{ème}}$  composant. Les bornes minimales et maximales de chaque gène sont fixées à 0 et 1 respectivement
- chaque individu vérifie  $0.99 \leq R_S(I(k)) \leq 1$
- la fonction objectif est donnée par :

$$Fit(k) = C_S(I(k)) = \sum_{i=1}^5 a_i \exp\left(\frac{b_i}{1-r_i}\right)$$

100 simulations de l'algorithme ont été faites. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II. Ils sont comparés à ceux obtenus avec le recuit simulé (SA), une variante du recuit simulé (I-NESA) (Ravi *et al.*, 1997) et une méthode floue d'optimisation globale (FGO) (Ravi *et al.*, 2000). Le meilleur résultat obtenu avec GM1 est  $C_S=5.01993$  pour 39.51 unités de temps CPU et pour GM2,  $C_S=5.01992$  à 98.36 unités de temps CPU. Nous avons obtenu une même qualité de solutions que les autres méthodes.

### Problème 3 : Redondance optimale dans un système série (Prasad *et al.*, 2001)

L'exemple 3 est un problème MIP (Mixed Integer Programming) non linéaire pour un système série-parallèle avec  $n$  étages (fig. 3) (Tillman *et al.* 1980 ; Prasad *et al.* 2000).

	SA	I - NESA	FGO	GM1	GM2
$r_1$	0.93566	0.93747	0.93337	0.93638	0.93514
$r_2$	0.93674	0.93291	0.93454	0.93410	0.93537
$r_3$	0.79299	0.78485	0.77910	0.76828	0.76543
$r_4$	0.93873	0.93641	0.93769	0.93691	0.93572
$r_5$	0.92816	0.933342	0.93547	0.93478	0.93567
$R_S$	0.99001	0.99000	0.99002	0.99001	0.99000
$C_S$	5.01997	5.01993	5.01995	5.0201	5.01997
Temps CPU	195.40	27.36	149.00	42.45	94.05

Table II : Résultats comparés du problème 2

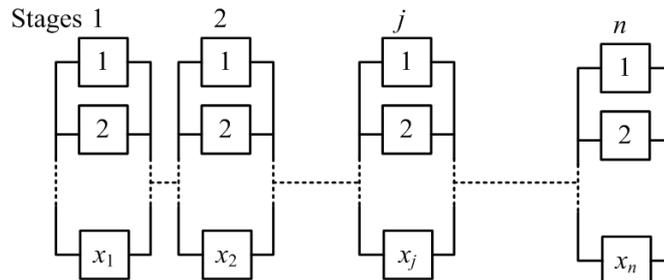


Figure 3. Système série-parallèle à  $n$  étages (problème 3)

L'objectif est de maximiser la fiabilité du système série par sélection des niveaux de redondance sous la contrainte de ressources, c'est-à-dire de trouver le nombre optimal de composants  $x_i \geq 1, (i = 1 \dots n)$  qui maximise la fiabilité du système :

$$R_S(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - r_i)^{x_i}]$$

soumis aux contraintes :

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, j = 1, \dots, q$$

avec  $q$  le nombre de contraintes.

1) Cas  $i, n=5$  : système à 5 étages:

$$g_1 = \sum_{i=1}^5 P_i \cdot x_i^2$$

$$g_2 = \sum_{i=1}^5 C_i \cdot [x_i + \exp(0.25x_i)] \leq 175$$

$$g_3 = \sum_{i=1}^5 W_i \cdot [x_i \cdot \exp(0.25x_i)] \leq 200$$

$$l_i \leq x_i \leq u_i$$

Les constantes  $r_i, P_i, C_i, W_i$  et les bornes  $l_i, u_i$  sont données dans la table III.

$i$	1	2	3	4	5
$r_i$	0.80	0.85	0.90	0.65	0.75
$P_i$	1	2	3	4	2
$C_i$	7	7	5	9	4
$W_i$	7	8	8	6	9
$l_i$	1	1	1	1	1
$u_i$	5	5	5	5	5

**Table III** : Coefficients et bornes pour le problème 3 cas  $i$

	SA	I - NESA	GM1	GM2
$x_1$	3	3	3	3
$x_2$	2	2	2	2
$x_3$	2	2	2	2
$x_4$	3	3	3	3
$x_5$	3	3	3	3
$R_S$	0.9045	0.9045	0.9045	0.9045
Temps CPU	37.46	15.55	7.42	28.14

**Table IV** : Résultats comparés du problème 3 cas  $i$

$i$	$r_i$	$C_i$	$W_i$	$i$	$r_i$	$C_i$	$W_i$
1	0.90	5	8	9	0.78	4	7
2	0.75	4	9	10	0.91	5	8
3	0.65	9	6	11	0.79	6	9
4	0.80	7	7	12	0.77	7	7
5	0.85	7	8	13	0.67	9	6
6	0.93	5	8	14	0.79	8	5
7	0.78	6	9	15	0.67	6	7
8	0.66	9	6				

**Table V** : Coefficients et bornes du problème 3 cas  $ii$

La formulation du problème est :

- l'individu est fait de 5 gènes, le  $i^{\text{ème}}$  gène est le nombre de composants pour le  $i^{\text{ème}}$  étage. Les bornes inférieures et supérieures de chacun des gènes sont indiquées dans le tableau III
- chaque individu vérifie les 3 contraintes  $g_1$ ,  $g_2$  et  $g_3$
- la fonction objectif est définie par  $Fit(k) = 1/R_S(x_1, x_2, \dots, x_5)$  qui exprime la fiabilité du système à maximiser.

100 simulations de l'algorithme ont été faites. Les meilleurs résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV. Ils sont comparés à ceux obtenus avec le recuit simulé (SA), une variante du recuit simulé (I-NESA) (Ravi *et al.*, 1997).

Les résultats obtenus avec la méthode génétique sont similaires à ceux rapportés dans (Ravi *et al.*, 1997). Prasad *et al.* dans (Prasad *et al.*, 2001) ont obtenu les mêmes résultats, mais les bornes supérieures des  $x_i$  étaient plus petites. Si la méthode génétique est testée avec les mêmes limites que Prasad,  $u_i = [55443]$ , les résultats sont obtenus plus rapidement.

2) Cas ii,  $n=15$  : système à 15 étages (Luus, 1975) :

$$R_S = \prod_{i=1}^{15} [1 - (1 - r_i)^{x_i}]$$

soumis à :

$$g_1 = \sum_{i=1}^{15} C_i \cdot x_i \leq 400$$

$$g_2 = \sum_{i=1}^{15} W_i \cdot x_i \leq 414$$

$$1 \leq x_i \leq 5$$

Les constantes  $r_i$ ,  $C_i$ ,  $W_i$  sont données dans la table V et les bornes  $l_i$ ,  $u_i$  sont 1 et 5 respectivement. La solution référencée  $x=[345442453244555]$  avec  $R_S=0.9456$  a été trouvée par toutes les méthodes.

#### Problème 4 : Optimisation à deux objectifs

L'exemple 4 est le même que celui du problème 3 cas *i*. La fiabilité du système est :

$$R_S(x_1, \dots, x_5) = \prod_{i=1}^5 [1 - (1 - r_i)^{x_i}]$$

Le problème est de trouver les  $x_i, (i = 1 \dots n)$  qui maximise  $R_S$  et minimise la fonction coût exprimée par :

$$C_S = \sum_{i=1}^5 C_i \cdot [x_i + \exp(0.25x_i)]$$

$$g_1 = \sum_{i=1}^5 P_i \cdot x_i^2 \leq 110$$

$$g_3 = \sum_{i=1}^5 W_i \cdot [x_i \cdot \exp(0.25x_i)] \leq 200$$

$$1 \leq x_i \leq 5$$

La table III montre les données pour cet exemple. La solution optimale  $x=[32233]$  avec  $R_s=0.9046$  et le coût  $C_s=146.125$  est donnée par (Salazar *et al.*, 2006). Comme il y a deux objectifs, la fonction d'adaptation est définie par :

$$Fit(k) = C_s(k)(1 - R_s(k))$$

où  $k$  est l'indice du  $k^{\text{ième}}$  individu de la population. Les résultats obtenus par les méthodes génétiques sont similaires à ceux de Ravi *et al.* (Ravi *et al.*, 1997) et Rocco *et al.* (Rocco *et al.*, 2000) reportés pour la formulation avec un seul objectif et en posant  $C_s=175$ . Cet exemple montre à la fois l'efficacité et la flexibilité de la méthode pour une formulation avec deux objectifs de fiabilité. Les résultats de tous les tests montrent que la méthode génétique donne des résultats satisfaisants. La diversité des exemples choisis montrent la capacité de la méthode à traiter différents problèmes. La méthode génétique apparaît comme une bonne alternative aux méthodes existantes dans la résolution de certains problèmes d'ingénierie en fiabilité.

### **Application à l'optimisation de la structure d'un système instrumenté de sécurité**

L'industrie de process devient techniquement de plus en plus complexe et le potentiel de danger s'accroît en conséquence si les flux de danger ne sont pas convenablement contrôlés. Ainsi, lorsque les installations industrielles présentent des risques potentiels pour les personnes, l'environnement ou les biens, diverses sécurités sont à mettre en œuvre. Celles-ci participent soit à la prévention en minimisant la probabilité d'apparition du risque, soit à la protection pour limiter les conséquences d'un dysfonctionnement. Les Systèmes Instrumentés de Sécurité sont utilisés pour assurer la sécurité fonctionnelle des installations, *i.e.* la réduction des risques à un niveau inférieur ou égal au risque tolérable. Pour concevoir les SIS, deux normes de sécurité sont utilisées : l'IEC 61508 (IEC61508, 1998) et l'IEC 61511 (IEC 61511, 2000).

La mise en œuvre des prescriptions de ces deux normes est assez difficile et les méthodes proposées dans les annexes doivent être utilisées avec précaution (Innal *et al.*, 2006). Toutefois, un élément clairement établi dans le processus de conception d'un SIS est qu'il doit aboutir à la satisfaction d'un niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL, Safety Integrity Level) alloué (Sallak *et al.*, 2007). Le SIL exprime ainsi la réduction de risque que doit apporter un SIS au système qu'il surveille. La contrainte d'une conception de SIS est donc de satisfaire au niveau de SIL requis tout en minimisant les coûts de conception, d'exploitation... Il s'agit donc d'un problème d'optimisation où le coût doit être minimisé sous des contraintes de sûreté de fonctionnement.

Comme nous l'avons mentionné à la section précédente, toutes les méthodes proposées approchent le problème d'optimisation pour des systèmes dont la

structure est de type parallèle-série. Dans l'industrie de process, une part non négligeable des coûts est portée par les connexions. Par ailleurs, l'introduction des réseaux de communication dans les dispositifs de sécurité permet de s'échapper des approches de conception de systèmes de type parallèle-série. Or, aucune des méthodes présentées à la section précédente n'est capable d'adresser ce problème de recherche de structure à coût minimal sous contrainte de performance. C'est ce que nous traitons dans la suite de cette section.

#### Éléments de normalisation

La norme IEC 61508 (IEC61508, 1998) est une norme internationale qui porte plus particulièrement sur les systèmes E/E/PE, c'est-à-dire les systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables de sécurité. La norme propose une approche opérationnelle pour mettre en place un système de sécurité E/E/PE, en partant de l'étude des exigences de sécurité (avec une définition du périmètre couvert, une analyse et une évaluation du risque) et en prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie du système E/E/PE. Un des intérêts de cette norme est d'être générique et donc d'être applicable dans tous les secteurs où la sécurité peut être traitée avec des systèmes E/E/PE : industries manufacturières, industries des process continus, pharmaceutiques, nucléaires, ferroviaires...

La norme IEC 61508 (IEC61508, 1998) fixe le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) qui doit être atteint par un SIS qui réalise la Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) dès lors qu'une réduction de risque est nécessaire. La norme fixe le SIL en fonction de la probabilité de défaillance moyenne sur demande ( $PF_{D_{avg}}$ ) pour les SIS faiblement sollicités (moins d'une sollicitation par an) ou en fonction de la probabilité de défaillance par heure ( $PFH$ ) pour les SIS fortement sollicités ou agissant en mode continu (cf. tableau VI). L'allocation du SIL se fait par des méthodes qualitatives ou semi-quantitatives, alors que l'évaluation du  $PF_{D_{avg}}$  des SIS qui doivent satisfaire au SIL exigé se fait par des méthodes quantitatives. Les méthodes usuelles de calcul du  $PF_{D_{avg}}$  des SIS sont des méthodes probabilistes (IEC 61508, 1998 ; IEC61511, 2000 ; Goble, 2006). Elles sont issues des études traditionnelles de sûreté de fonctionnement où les données de fiabilité relatives aux composants (taux de défaillance, taux de réparation ...) peuvent être connues avec plus ou moins de précision et sont validées par le retour d'expérience.

SIL	Probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation ( $PF_{D_{avg}}$ )	Fréquence des défaillances dangereuses par heure ( $PFH$ )
1	$[10^2, 10^1[$	$[10^6, 10^5[$
2	$[10^3, 10^2[$	$[10^7, 10^6[$
3	$[10^4, 10^3[$	$[10^8, 10^7[$
4	$[10^5, 10^4[$	$[10^9, 10^8[$

**Table VI** : Niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) : Sollicitation faible (IEC61508, 1998)

Pour mettre en œuvre un E/E/PE, il faut s'appuyer sur un ensemble de composants disponibles dans les catalogues des distributeurs. Un SIS peut être considéré comme un système d'automatique à 3 couches. L'architecture en couches est usuelle mais il s'agit d'une vision plus large que celle des systèmes série-parallèles présentés précédemment. La première couche concerne la partie capteur. Elle est constituée d'un ensemble d'éléments d'entrée qui mesurent l'évolution des paramètres physico-chimiques caractéristiques de l'EUC (Entity Under Control). Cette évolution vers une situation dangereuse constitue la sollicitation du SIS. La seconde couche concerne la partie unité logique. Sur la base de l'évolution des paramètres physico-chimiques, la ou les unités logiques élaborent une décision de mise en sécurité. La troisième couche concerne les actionneurs ou éléments finaux dont l'objectif est d'agir sur l'EUC directement ou indirectement pour neutraliser sa dérive en la plaçant dans une situation de repli, un état sûr. Evidemment, la mise en sécurité influe directement sur la disponibilité de l'EUC avec d'éventuelles conséquences en termes de pertes de production. Il peut être envisagé de tenir compte de ces pertes essentiellement économiques dans la définition des SIS (Houtermans *et al.*, 2005). L'architecture solution est contrainte par la tolérance aux défaillances matérielles (cf. tableau VII) et la performance du SIS est obtenue grâce à de la redondance de composants, de canaux. Un canal représente une architecture série permettant d'assurer la fonction désirée. Ainsi, les architectures les plus connues (1oo1, 1oo2, 1oo3, 2oo3...) sont des combinaisons de canaux largement étudiés par Innal (Innal *et al.*, 2008).

Proportion de défaillances en sécurité	Tolérance aux anomalies matérielles		
	0	1	2
< 60%	Non Autorisé	SIL 1	SIL 2
60% = - < 90%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90% = - < 99%	SIL 2	SIL 3	SIL 4
≥99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Table VII Exemple de contraintes architecturales sur les E/E/PE

### Réseaux de fiabilité de Kaufman

Les réseaux de fiabilité sont une méthode très efficace pour calculer la disponibilité ou la fiabilité instantanée des systèmes (Misra, 1970 ; Kim, 1972), c'est-à-dire la valeur (1-PFD). Ils sont très utilisés dans l'étude des réseaux de communications ou de distribution d'énergie (Rocco, 2002) car ils permettent de représenter sous forme d'un graphe la structure et les connexions d'un ensemble complexe en exprimant les relations entre ses éléments. Les graphes constituent un outil de modélisation pour de nombreux problèmes en se ramenant à l'étude des sommets et des arcs (Colbourn, 1996 ; Satyanarayana *et al.*, 1983). Ainsi, ils offrent un moyen simple pour traiter du problème de structure des systèmes dans le cadre d'une optimisation

de la fiabilité ou la disponibilité sans restriction structurelle comme dans les systèmes série-parallèles.

Comme l'a défini Kaufmann (Kaufmann *et al.*, 1975), un réseau de fiabilité est un multi-graphe  $G = \langle N, A, U \rangle$  avec un ensemble  $N$  de  $n$  nœuds et un ensemble  $A$  d'arcs nommés  $a_{ij}$ . L'ensemble des arcs est défini comme  $A \subseteq N \times N$ .  $U : A \mapsto e$  lie chaque arc  $a_{ij}$  à un composant dans l'ensemble des composants  $e = \{e_1, e_2, \dots, e_r\}$  (Innal *et al.*, 2008 ; Kaufmann *et al.*, 1975). D'après  $U$ , plus d'un arc peut être associé à un composant. Comme le but des arcs est de représenter les composants, les nœuds représentent les connexions, ce qui fixe la structure. Un réseau de fiabilité  $G$  est acyclique et contient un nœud source  $S \in N$  sans arc entrant et un nœud terminaison  $T \in N$  sans arc sortant. Dans un réseau de fiabilité, il est fait l'hypothèse d'états binaires des composants et du système. Kaufmann a ainsi montré qu'un réseau de fiabilité est une représentation graphique de la fonction de structure Kaufmann *et al.*, 1975, p.79). La fonction de structure d'un système est définie comme  $\phi(x_1, x_2, \dots, x_r)$  où les  $x_i$  représentent les états des composants. Du réseau de fiabilité, nous pouvons énumérer l'ensemble des coupes minimales et l'ensemble des liens minimaux. Le multi-graphe représentant le réseau de fiabilité du système peut alors être réécrit comme un 1-graphe composé de l'ensemble des liens minimaux (Kaufmann *et al.*, 1975, p.78). Le 1-graphe où chaque arc est associé à un composant du système est une nouvelle représentation de la fonction de structure. La fiabilité ou disponibilité du système peut alors être calculée par la méthode d'inclusion-exclusion (Misra, 1970) ou la somme des produits disjoints (Veeraraghavan *et al.*, 1991). Ainsi, si nous sommes capable d'exprimer la fonction de structure par un réseau de fiabilité de type 1-graphe, alors nous sommes capable de concevoir une structure de systèmes répondant à des objectifs de coûts sous contrainte de fiabilité ou de disponibilité, de tolérance aux défaillances matérielles...

#### **Application à la conception d'un SIS**

L'étape de conception d'un SIS n'est pas particulièrement aisée à réaliser pour l'ingénieur fiabiliste. Il s'agit de choisir des composants du marché susceptible de répondre à la problématique de sécurité selon le type de process physico-chimique, le niveau de performance de réduction de risque, de contrainte architecturale liée à la norme, de coûts de conception et d'opération, éventuellement de poids et de volume. Il est possible de formaliser ce problème comme la recherche d'un réseau de fiabilité sous forme d'un 1-graphe assurant la minimisation des coûts sous différentes contraintes en puisant dans un lot de composants disponibles sur le marché. Ce type de problème est connu pour être NP-difficile et peut être résolu efficacement par des méta-heuristiques (Siarry *et al.*, 2008). De nombreuses méta-heuristiques voire des combinaisons de méthodes (Yang *et al.*, 2000 ; Gen *et al.*, 1996 ; Kuo *et al.* 1978;

Coit *et al.*, 1996) comme les algorithmes génétiques (Castro *et al.*, 2003), les colonies de fourmis, les essais particuliers... peuvent être utilisées. Nous avons choisi d'exploiter l'algorithme génétique présenté précédemment.

Toutes les contraintes relatives à la définition d'un SIS comme par exemple son SIL, sont prises en compte lors de la création des individus. Un individu est représenté par une chaîne de gènes représentant les paramètres du problème (les composants à connecter et leur connexion d'une couche à l'autre). Une interprétation de cette chaîne est réalisée pour construire le réseau de fiabilité constituant une représentation d'une solution du problème. On détermine, pour ce réseau, les chemins de succès ou les coupes minimales et on vérifie la contrainte de tolérance aux anomalies matérielles. La disponibilité (ou fiabilité) du système est ensuite calculée et on vérifie la contrainte de SIL. L'opportunité de choisir individuellement chaque composant dans un catalogue permet de poser le problème comme une allocation de redondance diversifiée qui est plus compliquée. Notre approche s'avère efficace à traiter ce problème. L'intérêt de rechercher ce type de redondance repose sur la réduction implicite du facteur de causes communes de défaillance (Torres-Echevarria *et al.*, 2009).

A titre d'exemple, nous utilisons une application concernant un réservoir sous pression définie dans le document technique ISA-TR84.00.02-2002 (ISA, 2002). Notre objectif est de concevoir un SIS pour le réservoir. Le SIL est imposé au concepteur et la demande est formulée avec un coût total minimal. En conséquence, il faut déterminer la structure du SIS, choisir les composants et leur type pour chaque sous système du SIS, ainsi que les connexions entre ces composants qui permettent d'obtenir le SIL exigé. La contrainte sur le SIL exigé est transformée en une contrainte sur la disponibilité moyenne du SIS selon le tableau VI. Le problème peut être ramené à un problème de minimisation du coût global du SIS sous une contrainte de disponibilité moyenne. La disponibilité moyenne du SIS représenté par un réseau de fiabilité est calculée à partir des liens  $l_i$  minimaux du réseau de fiabilité. La disponibilité instantanée est définie par 3 :

$$A(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (3)$$

où  $P_i(t)$  est la disponibilité instantanée du lien minimal  $i$  et  $n$  est le nombre de liens minimaux du réseau de fiabilité. Cette équation est calculée par disjonction des termes pour tenir compte de la répétition des événements dans les liens minimaux. La disponibilité moyenne est obtenue par intégration sur le temps de fonctionnement ou le temps entre instants d'inspection ou de test.

Le coût global du SIS est la somme des coûts de ses composants intégrant les coûts d'achat et opérationnels (exploitation, maintenance, logistique ...). Les coûts opérationnels sont évalués *a priori* par l'ingénieur fiabiliste à partir du retour

d'expérience. En outre, nous supposons qu'il y a 6 types de composants disponibles sur le marché pour chaque sous-système du SIS. Les fiabilités aux temps d'inspection et les coûts des composants du SIS sont donnés dans le tableau VIII.

Par la somme des produits disjoints (SDP) (Rai *et al.*, 1995; Veeraraghavan *et al.*, 1991; Luo *et al.*, 1998; Soh *et al.*, 1991), la fiabilité du SIS est obtenue par :

$$R_{SIS} = 1 - PFD_{avg}.$$

#### Allocation de redondance diversifiée pour un SIS à structure série-parallèle

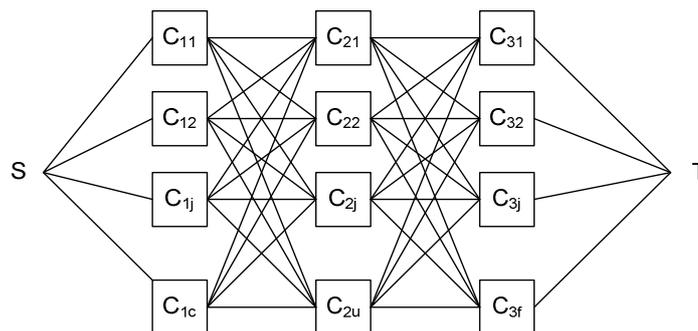
Dans cette partie, nous définissons l'architecture du SIS comme un système parallèle-série dont chaque couche peut contenir de 1 à 6 composants. Les caractéristiques des composants disponibles sont définies dans le tableau VIII. Le SIS est représenté comme sur la figure 4. Le problème est ici assez simple, il s'agit de choisir le ou les composants à placer dans chaque sous-système de manière à minimiser le coût global du système sous la contrainte de fiabilité exprimée par le niveau de SIL.

Le codage utilisé est une chaîne de 18 paramètres représentant les type des composants :

$$c_{11} \dots c_{1j} \dots c_{1c} c_{21} \dots c_{2u} c_{31} \dots c_{3j} \dots c_{3f}$$

avec la convention suivante :

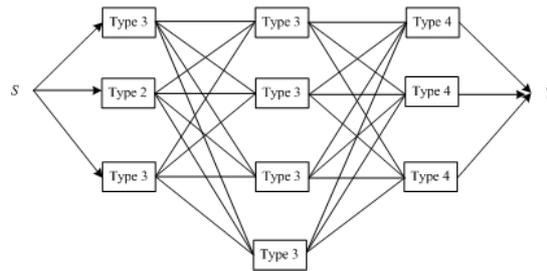
$$\begin{cases} 0, & \text{si il n'y a pas de composant;} \\ 1, & \text{si le composant est de type 1;} \\ 2, & \text{si le composant est de type 2;} \\ 3, & \text{si le composant est de type 3.} \end{cases}$$



**Figure 4.** Schéma général d'un SIS à structure parallèle-série

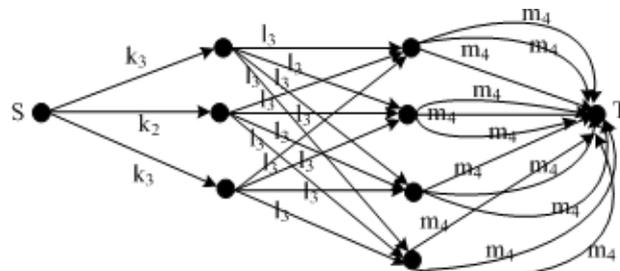
Les résultats obtenus lors d'essais pour un SIS de SIL 4 exigé conduit au SIS présenté figure 5 et son réseau de fiabilité associé en 6. Le coût obtenu est de 184 unités pour une disponibilité moyenne de  $A_{avg}=0.99990499$ . Cette structure de SIS présente une structure codée par [032030330330400404] composée de :

- 3 capteurs (types 2 et 3)
- 4 unités logiques (type 3)
- 3 éléments finaux (type 4)



**Figure 5.** Schéma de connexion du SIS de SIL4 ( $A_{avg}=0.99990499$ ;  $C = 184$ )

Grâce à la méthode génétique, nous obtenons également d'autres configurations avec une fiabilité et un coût légèrement plus élevés. Un exemple de l'une de ces configurations est défini par le SIS codé par [002043333100400404] qui signifie composé de 3 capteurs (types 2,3 et 4), 4 unités logiques (types 1 et 3) et 3 éléments finaux de type 4. Le coût de ce SIS est  $C = 191$  unités et sa disponibilité moyenne est  $A_{avg}=0.99992123$ . Les autres configurations obtenues sont résumées dans le tableau IX.



**Figure 6.** Réseau de fiabilité du SIS de SIL4 ( $A_{avg}=0.99990499$ ;  $C = 184$ )

SIL	code du SIS	coût	$A_{avg}$
4	[202022 330013 400041]	189	0.999905123
4	[020033 330103 604004]	190	0.999902132
4	[230003 031303 400056]	191	0.999900132
4	[002043 333100 400404]	191	0.999921232

**Table IX :** Disponibilité moyenne et coût pour d'autres SIS de SIL 4

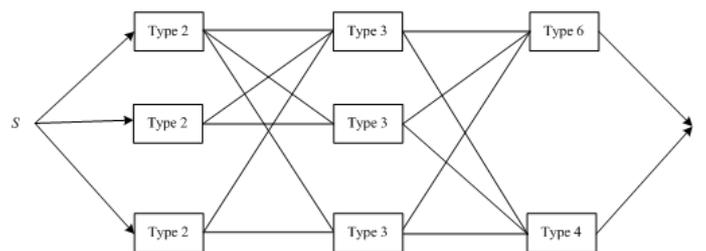
### Recherche de l'architecture du SIS

Le problème que nous traitons ici est la recherche simultanée des composants et de la structure de leurs connexions dans le respect de l'architecture des SIS pour satisfaire la performance de réduction de risque à coût minimal sous contrainte de redondance matérielle minimale. Le coût des connexions fait sens au regard du coût induit par les connectiques dans l'industrie de process, le coût opérationnel étant répercuté sur les composants.

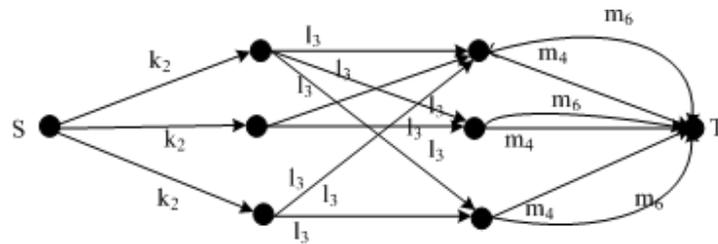
Nous utilisons l'application concernant un réservoir sous pression définie dans le document technique ISA-TR84.00.022002 (ISA, 2002). Comme dans le cas précédent, notre objectif est de concevoir un SIS pour le réservoir avec un SIL imposé. En conséquence, il faut déterminer la structure du SIS, choisir les composants et leur type pour chaque sous système du SIS, ainsi que les connexions entre ces composants qui permettent d'obtenir le SIL exigé avec un coût minimal. La contrainte sur le SIL exigé est transformée en une contrainte sur la disponibilité moyenne du SIS selon le tableau VI. Le problème peut être ramené à un problème de minimisation du coût global du SIS sous une contrainte de disponibilité moyenne du SIS calculée à partir de l'équation 3. Le coût global du SIS est la somme des coûts de ses composants intégrant les coûts opérationnels et le coût d'achat et des connexions entre les composants à raison d'une unité par connexion. Les caractéristiques des composants utilisables sont données dans le tableau VIII. Le codage utilisé est une chaîne de 102 paramètres représentant les types des composants et leurs connexions d'un sous-système à un autre avec :

$$c_{11} \dots c_{1j} \dots c_{1c} c_{21} \dots c_{2j} \dots c_{2u} c_{31} \dots c_{3j} \dots c_{3f} l_1 \dots l_6 l_7 \dots l_{42} l_{43} \dots l_{78} l_{79} \dots l_{84}$$

où les  $c_{ij}$  sont comme précédemment le type des composants (valeurs entières),  $l_1 \dots l_6$  codent de manière binaire les liens entre la source  $S$  et les composants de la couche capteurs et  $l_{79} \dots l_{84}$  codent ceux des composants de la couche finale au terminal  $T$ . Les valeurs  $l_7 \dots l_{42} l_{43} \dots l_{78}$  codent l'existence des liens entre un composant d'une couche et les composants de la couche successive. Ainsi, si toutes les valeurs des  $l_i$  sont égales à un, la structure du SIS est entièrement connectée et on se ramène à un système série-parallèle. Des recherches de structure ont été menées avec cette nouvelle définition du codage de la structure du SIS. La solution trouvée lors d'essais pour un SIS de SIL 3 exigé conduit au SIS présente figure 7 et son réseau de fiabilité associé en 8. La structure de ce SIS n'est plus un système série-parallèle. Le coût est  $C=139+13=152$  unités et la disponibilité moyenne est  $A_{avg}=0.999033$ . En réduisant le nombre de connexions, on aboutit à une disponibilité moyenne légèrement plus faible que dans le cas d'une allocation de fiabilité pour un système série-parallèle pour lequel on trouvait  $A_{avg}=0.999114$ .



**Figure 7.** Schéma de connexion du SIS de SIL3 ( $A_{avg}=0.999033$ ;  $C=152$ )



**Figure 8.** Réseau de fiabilité du SIS de SIL3 ( $A_{avg}=0.999033$ ;  $C=152$ )

## Conclusion

Nous avons présenté une méthode génétique qui imitent le processus d'évolution naturelle qui semble utile pour résoudre les problèmes d'optimisation complexe et ne nécessitent pas de traitement mathématique sophistiqué. Comme nous l'avons montré au travers d'exemples reconnus, la méthode génétique utilisée apporte une efficacité et une flexibilité à la résolution des problèmes d'optimisation de fiabilité. En outre, les résultats obtenus sont tout à fait comparables à ceux d'autres heuristiques, tout en consommant moins de temps d'exécution.

Dans ce travail, nous avons également proposé une méthodologie d'aide à la conception de SIS qui permet l'allocation simultanée de fiabilité et de redondance diversifiée des composants tout en satisfaisant au niveau d'intégrité de sécurité (SIL) exigé par les normes de sécurité IEC 61508 et IEC 61511. Un premier intérêt de la méthodologie est d'aboutir à des structures où la redondance est non homogène ce qui réduit intuitivement l'importance des risques de défaillance de causes communes même si ce n'est pas l'objet direct de ce travail. Le second intérêt est d'obtenir des configurations qui ne sont pas de classiques architectures série-parallèle grâce à l'utilisation des réseaux de fiabilité pour la modélisation et le calcul de la fiabilité. Un troisième intérêt de la méthodologie est le fait de présenter plusieurs architectures possibles et donc d'offrir plus de choix aux concepteurs selon d'autres critères non spécifiés dans le cahier des charges. Enfin, nous pouvons préciser que la modélisation proposée reste ouverte à l'intégration d'éléments qui n'ont pas été modélisés ici comme le taux de défaillances de causes communes, le taux de couverture de diagnostic, l'intervalle de test, les coûts opératoires et de maintenance, la fiabilité des voteurs ...

## Bibliographie

**D.E. Goldberg**, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, 1989.

- H.P. Schewefel**, Numerical Optimization of computer models, Editions Wiley, 1981.
- F. Bicking, C. Fonteix, J-P. Corriou, and I. Marc**, Global optimization by artificial life : a new technique using genetic population evolution. RAIRO-Operations Research, vol. 28(1), 23-36, 1994.
- V. Ravi, B.S.N. Murty, and P.J. Reddy**, Nonequilibrium simulated annealing-algorithm applied to reliability optimization of complex systems. IEEE Transactions on Reliability, vol. 46(2), pp. 233-239, 1997.
- V. Ravi, P.J. Reddy, and Hans-Jürgen Zimmermann**, Fuzzy global optimization of complex system reliability. IEEE Transactions on fuzzy systems, vol. 8(3), pp. 241-248, 2000.
- F.A. Tillman, C-L. Hwang, and W. Kuo**, Optimization of system reliability, Marcel Dekker, 1980.
- F.A. Tillman, C-L. Hwang, and W. Kuo**, Optimization techniques for system reliability with redundancy -a review, IEEE Transactions on Reliability, vol. 26, pp. 148-155, 1977.
- C. Mohan, K. Shanker, and W. Kuo**, Reliability Optimization of complex systems using random search techniques, Microelectronics and Reliability, vol. 28, pp. 513-518, 1988.
- W. Kuo, V. R. Prasad, F.A. Tillman, and C-L. Hwang**, Optimal Reliability Design : Fundamentals and applications. Cambridge University Press, 2001.
- V. R. Prasad, and W. Kuo**, Reliability Optimization of coherent systems. IEEE Transactions on Reliability, vol. 49(3), pp. 323-330, 2000.
- W. Kuo, and V. R Prasad**, An annotated overview of system reliability optimization. IEEE Transactions on Reliability, vol. 49(2), pp. 176-187, 2000.
- Y. Nakagawa, and S. Miyazaki**, Surrogate constraints algorithm for reliability optimization problem with two constraints, IEEE Transactions on Reliability, vol. 30, pp. 175-180, 1981.
- D. Salazar, C.M. Rocco and BJ Galvan**, Optimization of constrained multiple-objective reliability problems using evolutionary algorithms, Reliability Engineering and System Safety, Vol .91, pp. 1057-1070, 2006.
- C.M. Rocco, AJ Miller, JA Moreno, and N. Carrasquero**, A cellular evolutionary approach applied to reliability optimization of complex systems, In Proceedings of annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles, pp. 210-215, 2000.
- D.W. Coit, A.E. Smith**, Penalty guided genetic search for reliability design optimization, Computers and industrial engineering, Vol. 30(4), pp. 895-904, 1996.
- L. Painton and J. Campbell**, Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability, IEEE Transactions on Reliability, vol. 44, pp. 172-178, 1995.
- S. G. Tzafestas**, Optimization of system reliability : A survey of problems and techniques. International Journal System Science, vol. 11, pp. 455-486, 2002.
- K. Misra**, On optimal reliability design : a review, System Science, vol. 12, pp. 5-30, 1986.
- D.P. Vidyarthi and A.K. Tripathi**, Maximizing reliability of distributed computing system with task allocation using simple genetic algorithm, Journal of Systems Architecture, vol. 47, pp. 549-554, 2001.
- A. Yalaoui, E. Chatelet and C. Chu**, A new dynamic programming method for reliability and redundancy allocation in a parallel-series system. IEEE Transactions on Reliability, vol. 54, pp. 254-261, 2005.

- B.S. Dhillon**, Design reliability : Fundamentals and applications, CRC Press, 1999
- E.J. Yang, M.J. Hwang, T.Y. Sung and Y. Jin**, Application of genetic algorithm for reliability allocation in nuclear power plant, Reliability Engineering and System Safety, vol. 65(3), pp. 229-238, 1999.
- R. Luus**, Optimization of system reliability by a new nonlinear integer programming procedure, IEEE Transactions on Reliability, vol. 24, pp. 44-16, 1975.
- H.P. Castro and K.L. Cavalca**, Availability optimization with genetic algorithm, International Journal of Quality and Reliability Management, vol. 20, pp. 847-863, 2003.
- IEC61508**, Functional safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety related systems, International Electrotechnical Commission (IEC), 1998.
- IEC61511**, Functional safety : Safety Instrumented Systems for the process industry sector, International Electrotechnical Commission (IEC), 2000.
- ISA-TR84.00.02-2002**, Safety Instrumented Fonctions (SIF), Safety Integrity Level (SIL), Evaluation Techniques, Instrumentation Society of America (ISA), 2002.
- D.W. Coit, A.E. Smith**, Solving the redundancy allocation problem using a combined neural network/genetic algorithm approach, Computers & Operations Research, vol. 23(6), pp. 515-526, 1996.
- S. Rai, M. Veeraraghavan, and K.S.Trivedi**, A survey of efficient reliability computation using disjoint products approach, IEEE Networks, vol. 25, pp. 147-163, 1995.
- M. Veeraraghavan and K.S. Trivedi**, An improved algorithm for symbolic reliability analysis, IEEE Transactions on Reliability, vol. 40, pp. 347-358, 1991.
- T. Luo and K.S. Trivedi**, An improved algorithm for coherent system reliability, IEEE Transactions on Reliability, vol. 47(1), pp. 73-78, 1998.
- S. Soh and S. Rai**, Computer aided reliability evaluator for distributed computing networks, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 2(2), pp. 199-213, 1991.
- J.H. Holland**, Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan Press, 1975.
- M Gen. and Y.S. Yun**, Soft computing approach for reliability optimization: State-of-the-art survey. Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, pp. 1008-1026, 2006.
- F. Innal, Y. Dutuit, and A. Rauzy**, Some interrogations and remarks about CEI 61508, in Proceedings of the Lambda Mu 2006 Conference, Lille, France, 2006.
- A. Torres-Echeverria, S. Martorell, and H.A. Thompson**, Design optimization of a safety-instrumented system based on RAMS+C addressing IEC 61508 requirements and diverse redundancy, Reliability Engineering and System Safety, vol. 94(2), pp. 162-179, 2009.
- W. Goble and H. Cheddie**, Safety Instrumented Systems Verification-Practical Probabilistic Calculations, ISA, 2006.
- M. Sallak, C. Simon and J.F. Aubry**, Optimal design of safety instrumented systems : A graph reliability approach, in Proceedings of 7ème edition du congrès international pluridisciplinaire, Qualita2007, Tanger, Maroc, 2007.
- M. Houtermans and J. Rouvroye**, The influence of design parameters on the probability of Fail-Safe (PFS) performance of Safety Instrumented Systems (SIS), version électronique, Safety Users Group, 2005.

- F. Innal, Y. Dutuit, A. Rauzy, and J.P. Signoret**, New insight into PFDavg and PFH, version électronique, Safety Users Group, 2008.
- K. Misra**, An algorithm for the reliability of redundant networks, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 19, pp.146-151, 1970.
- Y. Kim**, A method for computing complex system reliability, *IEEE Transactions on Reliability*, vol.21, pp.215-219, 1972.
- C. Rocco, and J. Moreno**, Network reliability assessment using cellular automata approach, *Reliability Engineering & System Safety*, vol.78, pp.289-295, 2002.
- A. Kaufmann, D. Grouchko, and R. Cruon**, Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes, Masson et Cie, France, 1975.
- P. Siarry and Z. Michalewicz**, Eds., *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization*, ser. Natural Computing Series. Springer, 2008.
- W. Kuo, C. Hwang, and F. Tillman**, A note on heuristic methods in optimal system reliability, *IEEE Transactions on Reliability*, vol.27, pp.320-324, 1978.
- M. Gen and R. Cheng**, Optimal design of system reliability using interval programming and genetic algorithms, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 31, pp. 237{240, 1996.
- J.-E. Yang, M.-J. Hwang, T.-Y. Sung, and Y. Jin**, Application of genetic algorithm for reliability allocation in nuclear power plants, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 65, pp. 229-238, 2000.
- C. Colbourn**, *The combinatorics of networks reliability*. Oxford University Press, 1996.
- A. Satyanarayana and M. K. Chang**, Network reliability and the factoring theorem, *Networks*, vol. 13, pp. 107-120, 1983.



Frédérique Bicking

Frédérique BICKING a obtenu un doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine pour des travaux sur la spécialisation des algorithmes génétiques et leur application à la commande de procédés. Depuis 1997, elle est Maître de Conférences à l'Institut Universitaire de Technologie de Nancy-Brabois dans le département Métrologie Contrôle Qualité à Lunéville. Elle enseigne notamment dans le DUT Qualité Logistique Industrielle et Organisation les statistiques et leurs applications. Ses centres d'intérêts en recherche concerne l'optimisation par les algorithmes génétiques et autres méta-heuristiques et leurs application à la conception des systèmes sûrs de fonctionnement.

## **Les organisations « non orientées vers le profit » : un nouveau champ d'application des outils de la gouvernance**

---

Patricia Gontier, MCF  
Université Toulouse : UTM-IUT ;  
LRP mip Laboratoire Pluridisciplinaire de Midi Pyrénées  
IUT Toulouse 2 Figeac

**Résumé** – *La nouvelle réalité économique est multipolaire Elle intègre des aspects longtemps évincés de l'analyse, en particulier au niveau social, politique et environnemental. Ce constat a conduit au développement parallèle de deux types d'approches, sur la gouvernance des organisations d'une part diversité des sources de pouvoir dans les organisations) et sur la nouvelle place des organisations non orientées vers le profit d'autre part (entités se superposant à la dichotomie traditionnelle entre Etat et entreprises capitalistes marchandes). Il s'agit ici de tenter de montrer comment ces deux approches sont susceptibles de s'enrichir mutuellement pour permettre une meilleure compréhension de la profonde mutation économique en cours sur laquelle le ralentissement économique généralisé actuel a un effet accélérateur.*

La multipolarisation croissante des réalités économiques, sociales et politiques<sup>8</sup>, l'essor parallèle des nouvelles technologies de l'information et de la communication, la crise d'efficacité/légitimité que traversent l'Etat (fin de l'Etat providence) comme le Marché (crise économique et financière internationale) et la profonde remise en cause de la gouvernance financière internationale semblent les marques d'un changement en cours d'une ampleur équivalente à celle des 2 révolutions industrielles (mutation globale) et concourent à accroître le rôle des organisations non orientées vers le profit (ONOP), posant ainsi en termes nouveaux les questions de la création et du partage de la valeur.

Ces mouvements conjugués conduisent alors à rejeter l'analyse classique des rapports de pouvoir conçus sur le mode de la verticalité entre des autorités organisées de manière hiérarchique pour privilégier, plutôt, le recours à des analyses en réseau et s'intéresser aux conditions d'intelligibilité du fonctionnement des organisations « non orientées vers la réalisation du profit ».

Il s'agit donc, dans un premier temps, de clarifier cet objet d'études au sein de la nébuleuse de termes non stabilisés utilisés pour traiter de cette réalité.

---

<sup>8</sup> Divers exemples peuvent être donnés de ces nouvelles réalités comme le mouvement de décentralisation lancée initialement en France en 1981, les avancées dans la construction européenne, le rôle important joué par les nouveaux acteurs de la scène internationale, en particulier les ONG.

*1°) Au niveau factuel : le halo des organisations « non orientées vers le profit »*

Ce secteur est parfois également qualifié de quaternaire (Sue, 1997). Il s'agit alors de différencier les organisations privées non marchandes des organisations marchandes (entreprises privées comme publiques) et des organisations publiques non marchandes (redistribution). Ces **organisations à but non lucratif** ont connu un développement important<sup>9</sup> en termes de part des emplois rémunérés, de pourcentage de la population impliqué dans le bénévolat et de secteurs d'intervention concernés avec 5 principaux domaines d'intervention (les services sociaux, l'éducation et la recherche, la santé, la culture les sports et les loisirs) avec une très large prépondérance du financement public (58% des ressources) et une faiblesse des dons privés (7,5%), la différence étant constituée par les ressources propres en forte croissance (E. Archambault, 1998 et V. Tchernonog, 2007).

Mais ce secteur a été peu exploré par les économistes et les outils d'analyse utilisés diffèrent de ceux appliqués aux entreprises, conduisant ainsi au développement parallèle d'analyses ne reflétant pas les imbrications observées dans la réalité entre les différents types de structures avec des distributions très variables en fonction de l'âge de l'organisation, de son secteur d'intervention, de sa localisation géographique, .... Cela parce qu'il existerait une « loi naturelle » selon laquelle ce serait les **entreprises qui produiraient de la richesse tandis que les services publics et sociaux ne feraient que la ponctionner.**

Il n'existe donc pas de modèle de représentation de l'économie qui permette la prise en compte des richesses sociales produites par les organisations « non orientées vers le profit » et qui débouche sur la prise en compte d'une alternative à la double dichotomie classique entre marché et Etat comme mode de régulation et entre marché et hiérarchie comme mode de coordination.

Pour travailler sur ce type d'organisations il est nécessaire de commencer par définir leurs frontières pour ensuite chercher à formaliser leur fonctionnement en tenant compte de ce que les motivations des dirigeants peuvent être multiples et aller bien au-delà des éléments habituellement retenus qui restent centrés sur un intérêt strictement individuel de manière directe ou non, tel que la recherche du profit ou la création de son propre emploi ou l'obtention d'un enrichissement personnel.

---

<sup>9</sup> Alors que tous les ans se créaient moins de 20000 associations en France avant 1970 il s'en crée actuellement plus de 60000 par an. Il y aurait ainsi entre 700000 et 800000 associations vivantes en France dont 250000 répertoriées dans le fichier SIRENE (associations-employeurs et/ou celles qui paient des impôts).



Identifié de cette manière le tiers secteur peut donc être à la fois marchand et lucratif à condition cependant que la rémunération ainsi possible des ses fonds propres et de ses dirigeants soit encadrée et limitée.

*ii) L'économie sociale : un statut organisationnel spécifique*

Ce terme englobe l'ensemble des activités productives menées au sein de trois types de personnalités morales : les mutuelles, les coopératives et les associations. Au-delà de leurs différences ces trois types de structures sont en effet définies par des règles formelles identiques :

- les questions de pouvoir sont réglées par l'adhésion des personnes et non par l'apport en capital (« une personne, une voix »)
- une partie au moins du produit réalisé ne peut pas faire l'objet d'une appropriation ou d'une rétrocession aux associés (principe d'indivisibilité des réserves)
- la gestion doit être « désintéressée » et donc la lucrativité possible mais limitée.

L'économie sociale est donc totalement intégrée à l'économie marchande et peut de manière marginale dégager des profits, la différence essentielle par rapport au secteur marchand traditionnel réside dans le statut des organisations et la manière de répartir le surplus.

*iii) L'économie solidaire : la valorisation de l'utilité collective*

Initialement qualifiée d'économie alternative dans le souci d'effacer l'image négative portée par l'économie sociale du fait de son implication dans la mise en œuvre de l'Etat Providence, le terme d'**économie solidaire** est employé pour désigner des activités relevant principalement des services de proximité et des initiatives locales ayant pour objectif le renforcement de la cohésion sociale et la création d'emplois. L'économie sociale et solidaire peut être définie comme « *toute organisation économique agissant volontairement en fonction d'une utilité sociale* » Viveret, 2001 et donc par les motivations à l'origine de son action et non par ses actions elles-mêmes (tiers secteur) ou le statut des organisations (économie sociale). « *L'économie solidaire se définit par le sens prêté à l'activité économique, sa logique, le système de valeurs de ses acteurs et donc les critères de gestion de leurs institutions* » Lipietz, 1998

Les expériences d'économie solidaire cherchent généralement à répondre à deux types de problèmes :

- la création de nouveaux services en réponse à une demande qui n'est satisfaite ni par le secteur privé ni par le secteur public
- l'intégration économique de populations et territoires défavorisés

L'économie solidaire peut servir de palliatif à un engagement marchand insuffisant. Ainsi, le secteur des services relationnels qui concernent entre autres, l'éducation, les services sociaux, la santé, les loisirs, suppose l'interaction directe d'un prestataire et d'un usager permettant ainsi peu de gains de productivité alors que la demande pour ce type de services augmente (ne serait-ce que du fait du vieillissement de la population) et que la réponse marchande à ces besoins néglige la demande non solvable (*Laville, 1995*). Il peut alors y avoir ce que ce dernier qualifie de construction conjointe de l'offre et de la demande par les usagers et les professionnels directement impliqués. L'économie solidaire a ainsi pour particularité d'associer dans le cadre d'un projet collectif, prestataires, usagers, citoyens (partenaires). Elle permet ainsi une hybridation entre économie marchande, non marchande (redistribution) et non monétaire (réciprocité et administration domestique), réalisant ainsi une articulation nouvelle entre le politique et l'économie.

Il découle des définitions précédentes, différentes figures possibles du dirigeant qui peut être le gestionnaire, l'Etat, un administrateur, ...et différentes catégories d'objectifs qui peuvent être poursuivis au-delà du profit et dont il apparaît clairement que la compréhension passe par l'élaboration d'une conception renouvelée de la rationalité et de l'utilité (sociale)

Au-delà de l'espèce de « mimétisme organisationnel des grandes associations avec les entreprises traditionnelles » (*Rousseau, 2006*) et de la transformation des acteurs en agents (*Laville, 2006*) qui justifient d'analyser ces organisations par le recours aux outils classiques de la corporate governance, les nombreux points de convergence entre le secteur capitaliste marchand et les ONOP définies donc au croisement des typologies usuelles des organisations (environnement marchand et concurrentiel, énormes enjeux en termes de budget, d'investissement, entreprises complexes, enjeux de pouvoirs et de personnes, besoins croissants de professionnalisation, responsabilité accrue des administrateurs, ...) rendent nécessaire le recours à une analyse permettant comme pour les entreprises capitalistes marchandes d'évaluer les conditions d'efficacité des ONOP dans la mise en oeuvre de leurs missions et l'atteinte de leurs objectifs.

2°) *Au niveau théorique : L'approche en termes de gouvernance*

La gouvernance dans sa forme moderne est l'art et la manière de gouverner en favorisant un mode de gestion des affaires original dans un environnement marqué par une pluralité d'acteurs, disposant chacun de façon plus ou moins formelle d'un pouvoir de décision

Dans la mesure où les problèmes de **coordination entre acteurs** se déclinent à de nombreux niveaux on trouve le terme de gouvernance appliqué à des réalités différentes (gouvernance de l'emploi) et à des niveaux différents (gouvernance d'entreprise, locale, urbaine, européenne, mondiale, ..). De manière synthétique 2 niveaux de gouvernance peuvent être distingués : la **gouvernance politique** et la **gouvernance économique**.

1/ La **gouvernance politique** concerne la gouvernance des institutions politiques complexes (caractérisées par une multiplicité de paliers de gouvernement et de lieux de pouvoirs tels les états fédéraux, décentralisés ou l'Union européenne). C'est donc une théorie de la régulation sociale qui peut être déclinée à toutes les échelles de gouvernement. On parle ainsi de gouvernance locale, gouvernance urbaine, gouvernance territoriale, gouvernance européenne ou encore gouvernance mondiale. Pour les organisations internationales qui souffrent de déficit démocratique et sont souvent taxées de technocratiques<sup>10</sup>, la gouvernance apparaît comme une nouvelle source de légitimité grâce à :

- la perte de centralité de la régulation étatique
- la négociation ouverte avec les multiples acteurs économiques et sociaux<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> A partir de 1986, la Banque Mondiale cherche à comprendre les causes de la plus ou moins grande réussite de ses plans d'ajustement structurel. Pour elle, la gouvernance recouvre les normes, traditions et institutions à travers lesquelles un pays exerce son autorité sur le bien commun. La bonne gouvernance recouvre aussi bien la capacité du gouvernement à gérer efficacement ses ressources, à mettre en œuvre des politiques pertinentes, que le respect des citoyens et de l'Etat pour les institutions, ainsi que l'existence d'un contrôle démocratique sur les agents chargés de l'autorité (*Rapports de la Banque Mondiale, 1989, 1992, 1994*). Progressivement, à partir de 1995, les autres agences internationales onusiennes (CNUCED, UNESCO, OCDE, OMC, FMI) vont recourir elles aussi à ce concept de gouvernance.

<sup>11</sup> La gouvernance devient ainsi le symbole de cette démocratie participative elle aussi en vogue, qui permet l'organisation de débats publics permettant une forme de citoyenneté active, au-delà du mandat représentatif donné aux élus. Cette forme de citoyenneté active, de la part de groupes de la société civile, conscients et mobilisés, permettrait ainsi de répondre au déficit de légitimité qui frappe les élites politiques classiques en particulier et la démocratie représentative en général.

« Mais que signifie ce concept de démocratie participative, de négociations horizontales, lorsque les partenaires qui sont amenés à négocier sont d'un poids très inégal ? Face à un secteur privé uni derrière des revendications claires de libéralisation des marchés et de maximisation des profits, mais aussi devant des élites politiques néo-libérales qui sont aux commandes de l'appareil d'Etat, quel pourra être le pouvoir de négociation d'une société civile fragmentée en une multitude de revendications diverses ? Quel sera son impact véritable si ce n'est celui de fournir un semblant de légitimité à une décision qui aura été prise en fonction d'intérêts fort éloignés de l'intérêt général désormais conçu comme un

- le décloisonnement entre les sphères publiques et privées débouchant sur des partenariats<sup>12</sup>.

Deux conceptions s'opposent dans les travaux réalisés sur la gouvernance politique.

- Soit la gouvernance consiste à forger des **outils qui limitent les entraves au bon fonctionnement du marché**<sup>13</sup>

- Soit il s'agit, au contraire, de contrecarrer **les effets négatifs d'une marchandisation croissante** en se posant la question de l'existence de formes alternatives à la coordination marchande comme cela a été fait, en particulier, avec les travaux des institutionnalistes<sup>14</sup>.

Dans le 1<sup>er</sup> cas on présuppose une hiérarchisation entre les 3 pôles que sont l'Etat, la société civile et le marché afin d'élaborer des critères de « bonne gouvernance ».

Dans le 2<sup>nd</sup> cas on tente de voir comment réaliser une véritable articulation entre ces 3 pôles.

2/ La **gouvernance économique** également appelée gouvernance d'entreprise (mais dont les outils peuvent être appliqués à toute autre organisation) est constituée de l'ensemble des organes et règles de décision, d'information (transparence) et de surveillance permettant aux ayant-droits et partenaires d'une institution, de voir leurs intérêts respectés et leurs voix entendues. Cette approche s'est développée principalement aux USA et se situe dans le prolongement des modifications structurelles de l'économie qui ont conduit à la remise en cause du modèle fordiste (développement systématique de la sous-traitance, autonomisation des centres de responsabilité, gestion en flux tendus, ...). Le nouveau mode de gestion de la corporate governance explore ainsi la voie d'un fonctionnement moins hiérarchique

---

anachronisme ? ... L'avènement de ce nouveau mode de gestion de la chose publique va-t-il permettre un approfondissement réel de la démocratie ?...

<sup>12</sup> La gouvernance correspond à des modes de coordination associant aux acteurs publics (Etat, collectivités territoriales) des acteurs privés (entreprises ou organes de la société civile) pour faire face à un problème complexe caractérisé par une multiplicité d'acteurs et d'échelles d'intervention. « *Dans un contexte de néo-libéralisme triomphant qui prône la réforme de l'Etat, alors que tendent à se multiplier les niveaux de responsabilité partagée et que la frontière entre secteur privé et domaine public, entre intérêt général et intérêt particulier, s'efface progressivement, le concept de gouvernance suppose l'instauration de nouveaux modes d'élaboration des politiques publiques, centrés sur la négociation, tout comme de nouvelles manières de les mettre en œuvre, notamment par le biais de partenariats* » (Raphaël Canet, 2004)

<sup>13</sup> Les détracteurs de la gouvernance y voient une idéologie du désengagement de l'Etat-Providence depuis le courant néo-libéral des années 1980

Progressivement, à partir de 1995, les autres agences internationales onusiennes (CNUCED, UNESCO, OCDE, OMC, FMI) vont recourir elles aussi à ce concept de gouvernance.

<sup>14</sup> On peut d'ailleurs établir un parallèle entre le regain d'intérêt porté dans les années 80 à la fois à la gouvernance et à l'économie institutionnaliste. Dans les 2 cas, l'accent est mis sur le rôle des institutions comme mode de coordination proposant une alternative au marché.

de l'entreprise, en se fondant sur le postulat du choix rationnel dans un contexte de libre circulation de l'information et de collaboration.

Le raisonnement demeure habituellement au niveau « classique » de l'économie avec une notion d'entrepreneur mû par son seul **intérêt personnel** et dont le motif central de l'action réside dans la **recherche du profit maximal**. En effet, initialement, dans les **théories microéconomiques**, la firme n'est appréhendée que comme une **fonction de production** et la figure retenue de l'entrepreneur découle des conceptions imbriquées de la **rationalité** et de **l'utilité** même si la théorie des coûts de transaction a permis d'ouvrir cette boîte noire pour regarder ce qui se passe à l'intérieur, en termes de gestion et de direction en considérant que **marché et organisation hiérarchique constituent deux structures de coordination (gouvernance) alternatives** sur la base d'un arbitrage entre les coûts d'une transaction marchande et les coûts liés aux contrats en interne (*Williamson, 1989*). Par rapport aux travaux initiaux de Coase ou de Williamson, la gouvernance permet ainsi d'explorer une 3<sup>ème</sup> voie et de passer outre la dichotomie entre d'un côté une coordination marchande dans laquelle l'élément central est le système de prix et, de l'autre côté, un principe de coordination qui repose sur une relation d'autorité régissant une structure hiérarchique de gouvernement.

L'approche en termes de gouvernance permet de s'intéresser aux logiques générant des formes organisationnelles originales comme les réseaux et/ou les ONOP et d'insister sur le rôle d'acteurs hétérogènes tant du point de vue de leurs modes de fonctionnement que de leurs objectifs, de leurs sources de légitimité et de leurs relations au politique.

En effet, ces coûts de transaction habituellement considérés uniquement dans leur dimension monétaire peuvent également se concrétiser sous d'autres formes comme, par exemple, en termes de pouvoir et se retrouver alors dans tout type d'organisation (orientée ou non vers le profit).

Le mode de gouvernance dépend alors du modèle de création et de répartition de la valeur lui-même en étroite interaction avec la conception de l'organisation retenue.

En effet, toute organisation est censée avoir pour but, grâce à la coopération, de **produire un surplus** par rapport aux ressources consommées et de le maintenir de manière à assurer sa pérennité. Ce schéma peut s'appliquer quelle que soit la nature de l'organisation, à but lucratif ou non, entreprise, institution religieuse, académique, .... Les problèmes de gouvernance concernent donc tout autant les entreprises capitalistes marchandes (les propriétaires ne sont pas là seulement pour apporter de

l'argent) que les institutions publiques telles que l'Etat et les collectivités territoriales (respect des droits des citoyens) ou les ONOP (respect des membres et des bénéficiaires).

Les prolongements de cette approche vont alors avoir pour objectif de déterminer si l'individu étudié est régi uniquement à l'aune de son intérêt particulier (théories de l'agence) ou s'il est mu en priorité par l'intérêt général de son organisation, et au-delà, par celui de la société toute entière (théorie de l'intendance et théorie partenariale) c'est-à-dire quelle est la définition pertinente de l'utilité.

#### I. – **Vision contractuelle** de la firme et ONOP : un problème de définition de la valeur

La firme est appréhendée comme un nœud de contrats (ensemble des contrats nécessaires à la production). La firme existe alors car elle permet de réduire les pertes d'efficience dues aux conflits d'intérêt et donc de se rapprocher de l'optimum parétien de 1<sup>er</sup> rang de la théorie néo-classique.

##### *1°) Le modèle financier de la gouvernance (ou modèle actionnarial)*

Le système de gouvernance selon cette approche est constitué par l'ensemble des mécanismes permettant de sécuriser l'investissement financier (*Charreaux, 2002*). Il est issu de l'analyse de *Berle et Means en 1932* et fait suite à la crise de 29. Pour eux, le problème de la gouvernance résulte du démembrement de la fonction de propriété qui est intervenu dans les grandes entreprises US au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les faisant évoluer de firme patrimoniale à des firmes manageriales. Ce qu'on appelle aujourd'hui le « problème Berle-Means » ou encore « la théorie de l'agence » renvoie à cette séparation des intérêts et des tâches entre actionnaires et gestionnaires<sup>15</sup> :

- d'un côté, la fonction de contrôle est censée être assumée par les actionnaires, à travers les systèmes d'incitation et de surveillance
- de l'autre côté, la fonction décisionnelle est dans les mains des dirigeants.

Ce modèle trouve une forme d'aboutissement dans la théorie de l'agence développée initialement par Jensen et Meckling (1976) avec pour objectif d'expliquer la structure financière des entreprises<sup>16</sup>. Le système de gouvernement est composé de

---

<sup>15</sup> La gouvernance d'entreprise faisait déjà problème au 18<sup>ème</sup> siècle. Ainsi A Smith a été le premier, dès 1776 dans la Richesse des Nations, à poser le problème de la séparation des intérêts entre dirigeants et propriétaires dans les compagnies par actions.

<sup>16</sup> Cet objectif les conduit à retenir un modèle simplifié réduit à 2 relations d'agence (entre les dirigeants et les actionnaires et entre la firme représentée par les dirigeants et les actionnaires et les créanciers)

mécanismes « internes » à la firme mis en place intentionnellement par les parties et/ou le législateur (droit de vote des actionnaires, conseil d'administration, système de rémunération, audits, ...) et « externes » issus du fonctionnement spontané des marchés (marché des dirigeants, marché des prises de contrôle, ...) qui réduisent les coûts d'agence nés des conflits entre dirigeants et actionnaires. Les variations des coûts d'agence dépendent des divergences d'intérêt et d'utilité entre le principal et l'agent, et du coût du contrôle de l'information. Les bénéfices tirés des réductions des coûts d'agence étant partagés entre le principal et l'agent, les deux contractants ont donc un intérêt commun à définir une structure de contrôle et d'incitation qui puisse garantir des résultats supérieurs à ceux qui auraient été obtenus sans la mise en œuvre de cette structure (*Pratt et Zecklhauser, 1985*).

Certaines modélisations prennent en compte la possibilité d'un comportement actif, sous forme **d'enracinement du dirigeant** (*Sleifer et Vishny, 1989*). Celui-ci chercherait à rendre son remplacement plus coûteux pour les actionnaires en investissant de préférence dans des projets dont la rentabilité est liée à sa présence à la tête de l'entreprise (**investissement idiosyncratiques** qui conduisent à perdre une partie de la rente organisationnelle en cas de licenciement du dirigeant) ou dont la performance est moins facilement observable (la difficulté à évaluer l'intérêt d'un remplacement étant plus grande, la pression du marché des dirigeants est moins forte).

Cette prise en compte du comportement d'enracinement du dirigeant ne contredit pas la perspective de l'efficacité. L'enracinement ne fait que renforcer les coûts d'agence. Les systèmes de gouvernement étant censés s'adapter on devrait observer, dans les contextes institutionnels et organisationnels qui facilitent ce comportement, l'apparition de mécanismes permettant de réduire les pertes de valeur. Cependant un mécanisme ne sera viable que si le gain qu'il permet est supérieur au coût qu'il induit. Ainsi dans une firme managériale, un conseil d'administration plus actif et plus indépendant ne se justifiera que si les gains qui en découlent sont supérieurs aux coûts d'opportunité liés à une moins grande latitude décisionnelle du dirigeant. Ces stratégies d'enracinement n'apparaissent pas nécessairement destructrices de valeur (*Garvey et Swan, 1994*). En réduisant le risque d'éviction, l'enracinement incite le dirigeant à accroître son investissement en capital humain spécifique à la firme ce qui peut avoir des effets favorables sur la rente organisationnelle.

---

financiers) dans lequel il y a supériorité des dirigeants sur les actionnaires en matière d'information sur l'entreprise.

Mais ce modèle semble peu réaliste avec un pouvoir explicatif limité du fait de la structure et du fonctionnement des systèmes non anglo-saxons, du rôle minime joué par les actionnaires dans le financement des entreprises de la relation ambiguë qui lie les systèmes disciplinaires des dirigeants et la performance actionnariale.

## 2°) *Le modèle contractuel partenarial*

Selon cette approche, un système de gouvernance est constitué d'un ensemble des mécanismes permettant de **pérenniser le nœud de contrats ou d'optimiser la latitude managériale** (Charreaux, 2002) dans ses deux dimensions de production et de répartition.

Comme dans le modèle actionnarial, la création de valeur, la rente organisationnelle est due aux synergies entre les différents facteurs de production. Le changement intervient au niveau de la répartition avec la levée de l'hypothèse selon laquelle les actionnaires sont les seuls créanciers résiduels. Les autres facteurs de production ne sont ainsi incités à contribuer à la création de valeur que s'ils perçoivent une partie de la **rente organisationnelle**. Cette vision trouve son origine dans la redéfinition de la notion de propriété due à la théorie des contrats incomplets. Selon cette dernière, la propriété se définit tant par les droits de décision résiduels que par l'appropriation des gains résiduels. Il est ainsi possible d'étendre le statut de propriétaire à l'ensemble des participants au nœud de contrats productif. Ainsi un salarié à qui on attribue un pouvoir de décision résiduel, de façon notamment à mieux exploiter ses connaissances personnelles, devient partiellement propriétaire. Cette extension de l'analyse aux différents partenaires conduit ainsi à accorder une place centrale aux ressources humaines, en particulier aux dirigeants et aux salariés dont l'incitation à produire de la rente est liée à leur capacité à s'approprier cette dernière.

Le problème principal reste une répartition de la rente suffisamment incitative pour maximiser la création de valeur et l'aboutissement de la démarche partenariale réside dans sa généralisation à l'ensemble des parties prenantes contribuant à la création de valeur.

Mais la théorie de l'agence bute sur plusieurs limites. En effet dans un modèle multi-périodique, les effets de réputation pourront venir réduire les tentations d'un usage malhonnête de l'information et donc limiter l'intérêt de la mise en place de mécanismes de contrôle reposant sur les conséquences d'une asymétrie informationnelle. Mais surtout :

**- La progression des problématiques associées à la responsabilité sociale et sociétale des entreprises n'est pas intégrée dans cette approche.**

**- Les théoriciens de l'agence ont délaissé l'influence des comportements de groupe ou encore l'influence des institutions or ces éléments sont centraux dans l'analyse d'organisations non « verticalisées ».**

II. – Le modèle cognitif de la gouvernance et les organisations non marchandes : une nécessaire révision des concepts d'utilité et de rationalité

Selon cette approche, un système de gouvernance est constitué par l'ensemble des mécanismes permettant d'avoir le meilleur **potentiel de création de valeur par l'apprentissage et l'innovation** (Charreaux, 2002)

*1°) Les théories cognitives et la dimension sociale de l'utilité*

Si la notion d'information, confondue avec celle de connaissance/savoir, occupe une place centrale dans les théories contractuelles, les problèmes organisationnels trouvant leur origine dans l'asymétrie d'information, les « théories cognitives » distinguent ces 2 notions et privilégient celle de connaissance. Alors que la notion d'information s'appréhende par rapport à un ensemble fermé, objectif c'est-à-dire potentiellement connaissable par tous les individus, de données relatives aux conséquences des événements possibles, la connaissance représente, au contraire, un ensemble ouvert, subjectif, résultant de l'interprétation de l'information par les individus, en fonction de leurs modèles cognitifs. Si le rôle de la firme se réduit à la résolution des conflits d'intérêt dans la perspective contractuelle, il prend plus d'ampleur dans les théories cognitives dans lesquelles **la firme acquière la faculté d'apprendre et de créer de la connaissance** mettant ainsi au centre de l'analyse les notions d'apprentissage et d'innovation.

Les logiques des différents acteurs sont alors analysées à travers leurs objectifs, leurs processus décisionnels et leurs capacités cognitives. Les théories cognitives de la firme abordent le processus dynamique de création de richesse proprement dit. On met ainsi l'accent sur les processus de négociation et de coordination, d'où le recours au concept de rationalité procédurale (efficacité mesurée non pas à partir d'un calcul optimal dans l'allocation des ressources mais sur la base de critères de satisfaction, existence de plusieurs niveaux d'efficacité et efficacité comme résultat de la dimension collective de comportements individuels rationnels) et le rejet de l'hypothèse de rationalité calculatoire (limitée ou non !). La rationalité s'apprécie ainsi sur la base des processus décisionnels et non plus des conséquences des décisions. Dans ces approches, la clé de la performance se trouve plus dans la capacité du management à imaginer, percevoir, construire de nouvelles opportunités que dans la restructuration ou la reconfiguration des portefeuilles d'activités en

réponse aux évolutions de l'environnement (*Lazonick et O'Sullivan, 2000*) tentant ainsi de concilier les aspects conflictuels et les aspects cognitifs.

**Les ONOP, considérées comme des formes organisées de production de services aux personnes contribuent à la production de richesse sociale tout comme au développement personnel de ses membres mais ce n'est alors plus une notion d'utilité individuelle mais d'utilité sociale qui est au centre de l'analyse.**

**Or Gianfaldoni, (2002) a montré que différents types de rationalité peuvent être appliqué à l'entrepreneuriat en réseau dans le champ de l'économie solidaire faisant ainsi « voler en éclat une stricte rationalité de l'agent, tout en ne réfutant pas la dimension économique que revêt l'utilité ».**

*2°) L'approche éthique de l'entrepreneuriat : distinction entre valeur d'échange et valeur d'usage*

A partir de la remise en cause des relations entre **utilité et bien-être personnel**, et entre bien-être personnel et valorisation individuelle, la notion de « *capabilité* » développée par Sen permet de fournir une grille du comportement réel de l'entrepreneur et de prendre en compte les médiations sociales dans l'analyse de l'utilité. Sen s'interroge, en particulier, sur les relations causales apparemment évidentes entre l'utilité et le bien-être personnel, et sur le bien-être comme seul stade possible de valorisation des individus et montre qu' « *un individu a des objectifs et des valeurs autres que la recherche de son confort personnel* ». <sup>17</sup>

Ce n'est plus la **valeur d'échange** (la valeur à proprement parler pour les grands économistes classiques comme Smith, Ricardo ou Marx) qui est pertinente mais la **valeur d'usage** (richesse, d'après les mêmes économistes). En effet, si on assimile valeur d'échange (sous-entendu marchande) et richesse, il n'y a plus de place pour les services publics, le travail bénévole et associatif.

*Conclusion : Le secteur des ONOP comme une forme complémentaire de coordination*

L'objectif de ce premier travail sur le sujet est de montrer qu'il n'y a pas incompatibilité entre les approches formelles des organisations centrées sur la notion de gouvernance et les spécificités des ONOP. Le recours à ce type d'analyse semble prometteur car susceptible de fournir des avancées substantielles dans la

---

<sup>17</sup> Cette approche lui permet ainsi de ré-introduire dans l'analyse les valeurs de justice et de liberté et de renouer ainsi avec l'économie politique permettant de donner matière à réflexion dans le champ de l'économie dite solidaire.

compréhension du fonctionnement et des raisons du développement de ce secteur « non orienté vers le profit ».

En permettant une forme de coordination complémentaire qui ne se situe pas dans la dichotomie entre Marché et Etat ou encore entre le marché et l'entreprise capitaliste marchande, les ONOP ont un rôle fondamental à jouer, comme les prochains travaux auront pour objectif de le montrer, à la fois en termes de

- dynamique économique (test de la pertinence de la mise à disposition d'un nouveau produit avant de créer une entreprise) ;
- développement de l'innovation (limitation et répartition de la prise de risque initiale)
- développement social (prise en charge de la satisfaction de besoins seulement partiellement pris en compte par la puissance publique et/ou le marché)
- régulation internationale (le besoin d'instances de surveillance, de contrôle et de coordination au niveau mondial est de la responsabilité de tous)

La prise en compte de ces formes alternatives d'organisation et de coordination pourrait peut-être contribuer à terme à « *la promotion de contre-modèles réalistes et efficaces* » *Gadrey, 2001* mais surtout montrer le rôle joué aujourd'hui par les ONOP dans le maintien d'un système économique largement dominé par la sphère du profit et du marchand justifiant ainsi le besoin pour une meilleure compréhension des raisons de leur existence et de leur fonctionnement.

### **Bibliographie**

- Archambault**, 1996, Le secteur sans but lucratif en France et dans le monde, Associations et Fondations en France, Economica, 21 pages
- Baron Catherine**, 2003, La gouvernance : débats autour d'un concept polysémique, Droit et Société N°54, PP329-351
- Charreaux**, 2002, Quelle théorie pour la gouvernance ? De la gouvernance actionnariale à la gouvernance cognitive, En cours de publication dans l'ouvrage coordonné par J Allouche, Encyclopédie des ressources humaines, Economica, 16 pages
- Coase**, 1987, La nature de la firme, Revue française d'économie, 2 (1), PP386-405, Traduction de « The nature of the firm », Economica N°4, 1937
- Garvey et Swan**, 1994, The economics of corporate governance, beyond the marshallian firm, Journal of corporate finance, Vol1, N°2, PP139-174
- Gianfaldoni**, 2002, Rationalité économique et entrepreneuriat. Quelles leçons pour l'économie solidaire, 22 pages
- Jensen et Meckling**, 1976, Theory of the firm : managerial behavior, agency costs and ownership structure, Journal of financial economics, N°3
- Lipietz Alain**, 1998, L'opportunité d'un nouveau type de société à vocation sociale, Rapport au Ministre de l'emploi et de la solidarité

- Pratt et Zecklhauser**, 1985, Principals and agents : the structure of business, Harvard Business School - Research College
- Rousseau François**, 2005, Le dynamisme associatif : les vraies raisons d'un secret bien gardé, CRG Ecole polytechnique, décembre 2005
- Rousseau François**, 2006, L'organisation militante, à paraître, 20 pages
- Sen**, 1999, L'économie est une science morale, Ed La découverte, PUF, 124 pages
- Sen**, 2000, Repenser l'inégalité, Seuil
- Sleifer et Vishny**, 1997, A survey of corporate governance, Journal of finance, Vol 52, PP737-783
- Sue Roger**, 1997, La richesse des hommes, Odile Jacob, Paris
- Tchernonog Viviane**, 2007 « Ressources, financements publics et logiques d'action des associations », XVIème colloque de l'ADDES
- Trébuçq S**, 2003, La gouvernance d'entreprise héritière des conflits idéologiques et philosophiques, Communication aux 9èmes journées d'histoire de la comptabilité et du management, 22 pages
- Viveret**, 2001, Reconsidérer la richesse, Rapport d'étape de la mission « nouveaux facteurs de richesse », Secrétariat d'Etat à l'Economie Solidaire
- Williamson**, 1989, Transaction costs economics, Handbook of industrial Organization, Vol 1, IR Smalensee et RD Willig (Ed) Elsevier Science Publisher, PP136-182
- Gilly Jean-Pierre**, Leroux Isabelle, Wallet, Frédéric, 2003, « Gouvernance et proximité » dans « Economie de proximités, Paris, La découverte, 2003