

N° d'ordre : 3118

# THÈSE

présentée à

## L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par Jean-François CHARLOT

POUR OBTENIR LE GRADE DE

### DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : ELECTRONIQUE

\*\*\*\*\*

#### LOGISTIQUE DE LA MODELISATION EN CONCEPTION DE SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES.

\*\*\*\*\*

Soutenue le : 19 décembre 2005

Après avis de :

<b>MM. J. BOUCHER</b>	Professeur Emérite	INP-ENSEEIH, Toulouse	<b>Rapporteur</b>
<b>A. NAPIERALSKI</b>	Professeur	Université de Lodz	<b>Rapporteur</b>

Devant la commission d'examen formée de :

<b>MM. A. TOUBOUL</b>	Professeur	Laboratoire IXL, Bordeaux	<b>Président du jury</b>
<b>J. BOUCHER</b>	Professeur Emérite	INP-ENSEEIH, Toulouse	<b>Rapporteur</b>
<b>A. NAPIERALSKI</b>	Professeur	Université de Lodz	<b>Rapporteur</b>
<b>H. LÉVI</b>	Professeur	Laboratoire IXL, Bordeaux	<b>Directeur de thèse</b>
<b>JL. SALAUN</b>	Ingénieur Officier	Marine nationale	<b>Examineur</b>
<b>A. VLADIMIRESCU</b>	Visiting professor	Université de Berkeley	<b>Examineur</b>
<b>D. MIDON</b>	Ingénieur Officier	Marine nationale	<b>Invité</b>



## Avant-propos

*La logistique de la modélisation consiste à déterminer une démarche rationnelle de gestion de l'information et de coordination d'activités pour la conception de systèmes multi-technologiques.*

*Les modèles renferment en partie cette information qui doit être organisée, structurée et intégrée à toutes les étapes de la conception de systèmes alliant plusieurs technologies (mécanique, électrique, magnétique, électronique, thermique, fluidique, chimique...).*

*En première approche, il est plus simple de définir une thèse sur la logistique de la modélisation par ce qu'elle n'est pas, à savoir un traité sur la « création » de modèles a proprement parlé.*

*Ainsi, le métier de « logisticien des modèles » diffère donc de celui de « créateur de modèles ». En effet, le « logisticien de la modélisation » est un utilisateur de modèles existants ou de modèles pour lesquels il participe à la spécification, et ce afin de définir et de mettre en œuvre les méthodes les plus efficaces mais aussi les plus économiques, en un mot les plus « rationnelles », pour assurer la conception de systèmes multi-technologiques.*

*Une manière efficace et économique de concevoir un système multi-technologique est de faire appel à la modélisation car elle permet de retarder le plus possible le choix des technologies et donc de lutter contre l'obsolescence des composants induite par les délais souvent très longs de la phase de conception - développement.*

*Mais l'activité du « logisticien de la modélisation » ne s'arrête pas uniquement à une participation dans la phase de conception du système... Il a aussi pour mission de mettre en place une démarche d'amélioration, voire d'optimisation du fonctionnement des systèmes multi-technologiques pendant toute leur durée de vie. Le « logisticien » fait donc de la modélisation un outil concourant au maintien en condition opérationnelle et à la ré-ingénierie des systèmes.*

*La « logistique de la modélisation en conception de systèmes multi-technologiques » est une discipline nouvelle, dans le sens où très peu de références existent.*

*Les travaux de recherche de cette thèse se fondent sur une réflexion de ce qui se fait actuellement dans l'industrie et ont été menés sur la base de plusieurs années d'expérience professionnelle dans des fonctions techniques et logistiques, aussi bien au sein de petites et moyennes entreprises (sous-traitance industrielle, CAO électronique) que de grands groupes multinationaux (électronique, conversion d'énergie pour les télécommunications) et dans le secteur militaire (marine nationale).*



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier madame Nathalie LABAT, directrice de l'École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de l'Université de Bordeaux I, monsieur André TOUBOUL, directeur du Laboratoire IXL, et monsieur Hervé LEVI, professeur au laboratoire IXL, mon directeur de thèse, sans qui cette thèse n'aurait pas pu être possible.

Je souhaite aussi remercier monsieur Andrei VLADIMIRESCU, Visiting professor à l'université de Berkeley, Californie et messieurs les capitaines de corvette Dominique MIDON et Jean-Luc SALAUN de la marine nationale française, pour leur expertise et leur précieuse participation à la soutenance, ainsi que monsieur Jean-Jacques CHARLOT, mon père, pour notre collaboration intellectuelle de ces quelques dix dernières années...

Enfin, j'exprime mes plus vifs remerciements à monsieur Jacques BOUCHER, professeur émérite à l'INP-ENSEEIH de Toulouse et monsieur Andrej NAPIERALSKI, professeur à l'université de Lodz, qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à ces travaux et d'avoir accepté d'en être rapporteurs.



## Résumé

L'objectif de cette thèse est de montrer quels avantages la modélisation pourrait apporter à la gestion du cycle de vie des systèmes multi-technologiques. Pour se faire, la démarche adoptée a été de scinder les travaux en deux parties :

- la première partie traitant de l'adéquation des modèles aux méthodes de conception des systèmes multi-technologiques (Chapitre 1) et de la modélisation comme outil de spécification et de lutte contre l'obsolescence (Chapitre2).

- La seconde partie traite quant à elle du contexte de la modélisation dans la prévention de la défaillance des systèmes multi-technologiques (Chapitre 1) et se veut une application de la logistique de la modélisation comme outil du maintien en condition opérationnelle de ces systèmes (Chapitre 2).

L'analyse de l'adéquation des modèles aux méthodes de conception des systèmes multi-technologiques pose les bases conceptuelles de la logistique de la modélisation. Elle passe par la caractérisation des systèmes multi-technologiques et l'exposé des méthodes de conception et de modélisation, apporte une première définition de ce que sont les modèles fonctionnels, et s'intéresse aux modèles VHDL-AMS multi-technologiques en faisant un rappel sur les modèles de base des systèmes électriques, mécaniques et thermiques. A cet effet, deux exemples de modélisation VHDL-AMS analogique utilisant le compilateur BVHDLA et le simulateur SPICE 3F5 tentent de mettre en évidence l'analogie électrique – mécanique et électrique – thermique qui est à la base de la modélisation multi-technologique.

Nous cherchons ensuite à montrer les avantages de la modélisation pour la spécification des systèmes et la lutte contre l'obsolescence des composants due à la fuite en avant des technologies. En effet, les temps de conception de systèmes complexes étant en général très longs, il y a un risque que les composants et les technologies employées soient complètement obsolètes avant même la mise en service du système chez le client. Afin d'appréhender cet état de chose, l'approche « mécatronique » telle qu'elle est définie dans cette thèse, offre un moyen de retarder au maximum les choix technologiques tout en obtenant des spécifications graphiques simulables permettant de prévoir le comportement du système dès le début de sa conception et, ce par l'intermédiaire de la modélisation multi-technologique. Enfin, la démarche de la logistique de la modélisation en conception de systèmes, pour être un avantage sur l'obsolescence, suggère une méthode de planification des études systèmes amont en proposant une définition des modèles multi-technologiques à employer en fonction de leur nature et des principes de réutilisation, de validation et de certification de modèles (re-use).

Nous présentons ensuite le contexte de la modélisation comme moyen de prévention de la défaillance des systèmes multi-technologiques et cherchons à définir ce qu'est une maintenance modélisable et quels sont les avantages que l'on peut en tirer. A cette occasion nous introduisons la notion de « métrologie fonctionnelle » et indiquons les domaines technologiques pouvant être concernés. Enfin, la nature de certains modèles multi-technologiques pour la surveillance de paramètres électriques (modèles non exclusivement électriques) est présentée avant de s'intéresser à la modélisation dans le cadre du maintien en condition opérationnelle et de la ré-ingénierie des systèmes, à savoir l'utilisation de modèles pour l'exploration conditionnelle de l'état des équipements des systèmes pour leur maintenance voire leur reconstruction.

Enfin, nous concluons cette thèse par un exemple d'application de la logistique de la modélisation au maintien en condition opérationnelle des systèmes multi-technologiques en montrant son implication pour l'amélioration continue de la qualité des programmes de maintenance, le rétablissement de la disponibilité opérationnelle et la maîtrise du coût global de possession des systèmes et leurs équipements.

## **Abstract**

The objective of this thesis is to show which advantages modelling could provide to the multi-domain systems life cycle support management. In this purpose, the approach is to divide works into two parts:

- The first part is about the models adequacy to the multi-domain systems design methods (chapter 1) and modelling as a specification tool and a tool against obsolescence (chapter 2)
- The second part is about the context of modelling in the multi-domain systems failure prevention (chapter 1) and is also an application of modelling logistics as a tool for systems operational condition maintenance (chapter 2)

The article “Logistics of Modelling & Simulation in Development Phase - Strategic & Operational Planning of Feasibility Study”, in the annexe will provide the reader with significant information on the utilised methodology in this thesis.

## SOMMAIRE

<b>Avant-propos</b> .....	<b>P.03</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>P.07</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>P.09</b>
<b>PREMIERE PARTIE</b> .....	<b>P.08</b>

### CHAPITRE 1 : ANALYSE DE L'ADEQUATION DES MODELES AUX METHODES DE CONCEPTION DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES.

<b>1. Bases conceptuelles d'une logistique de la modélisation</b> .....	<b>P.13</b>
1.1. Caractérisation des systèmes multi-technologiques .....	P.13
1.1.1. Définition de référence	
1.1.2. Architecture d'un système multi-technologique	
1.2. Stratégie de conception et de modélisation des systèmes multi-technologiques	P.16
1.2.1. Stratégie de conception	
1.2.2. Méthodologie de modélisation	
1.3. Tentative de caractérisation des modèles fonctionnels .....	P.20
1.3.1. Extraction intuitive du « fonctionnel » dans un modèle « comportemental »	
1.3.2. Du « module fonctionnel » au « modèle fonctionnel »	
<b>2. Modèles multi-technologiques</b> .....	<b>P.27</b>
Rappel sur les modèles électriques de base .....	P.27
2.2. Modèles de base des systèmes mécaniques .....	P.30
2.2.1. Systèmes en translation et en rotation	
2.2.2. Analogie « électromécanique »	
2.3. Modèles de base des systèmes thermiques .....	P.39
2.3.1. Modèles thermiques	
2.3.2. Analogie « thermoélectrique »	
<b>3. Exemples de modélisation multi-technologiques</b> .....	<b>P.41</b>
3.1. Système de positionnement de siège .....	P.41
3.2. Transistor MOS soumis à auto-échauffement .....	P.54

### CHAPITRE 2 : LA MODELISATION COMME OUTIL DE SPECIFICATION ET DE LUTTE CONTRE L'OBSOLESCENCE

<b>1. L'approche « mécatronique »</b> .....	<b>P.59</b>
1.1. Spécifications graphiques simulables .....	P.61
1.1.1. SAO (Spécification Assistée par Ordinateur)	
1.1.2. RSFAO (Représentation Schématique Fonctionnelle Assistée par Ordinateur)	
1.2. Modélisation appliquée à la représentation schématique .....	P.69
1.2.1. Modélisation BVHDLA et la Simulation Flash-Spice	

1.2.2. Implantation d'un modèle VHDL-AMS dans Flash Schématique

<b>2. La logistique de la modélisation : un avantage sur l'obsolescence</b> .....	<b>P.73</b>
Planification stratégique et opérationnelle des études systèmes amont .....	P.74
Typologie des modèles utilisés .....	P.75
Re-use, évaluation, certification et capitalisation des modèles .....	P.76

<b>DEUXIEME PARTIE</b> .....	<b>P.77</b>
------------------------------	-------------

## **CHAPITRE 1 : LA MODELISATION COMME OUTIL DU MAINTIEN EN CONDITION OPERATIONNELLE DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES.**

<b>1. Liminaire à une maintenance modélisable</b> .....	<b>P.77</b>
1.1. Du « mode de défaillance » au « modèle de défaillance » .....	P.77
1.2. Avantages attendus d'une maintenance modélisable .....	P.79
<b>2. Modélisation multi-technologique et maintenance prédictive</b> .....	<b>P.81</b>
2.1. Introduction à la Métrologie Fonctionnelle .....	P.81
2.1.1. Exemple introductif	
2.1.2. Domaines technologiques	
2.2. Les modèles de surveillance des paramètres électriques .....	P.85
2.2.1. Les modèles purement électriques	
2.2.2. Les autres modèles multi-technologiques	
<b>3. Modélisation multi-technologique et maintenance proactive</b> .....	<b>P.93</b>
3.1. Utilisation de modèles pour l'exploration conditionnelle de l'état des systèmes	P.93
3.1.1. Modélisation et contrôle de récurrence des défaillances	
3.1.2. Modélisation et amélioration continue de la fiabilité	
3.2. Utilisation de modèles pour la reconstruction des systèmes .....	P.99

## **CHAPITRE 2 : APPLICATION DE LA LOGISTIQUE DE LA MODELISATION AU MAINTIEN EN CONDITION OPERATIONNELLE DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES**

<b>1. Analyse technico-fonctionnelle</b> .....	<b>P.105</b>
1.1. Place du module dans la chaîne .....	P.106
1.2. Description des fonctions .....	P.107
1.3. Arborescence technico-fonctionnelle .....	P.108
1.3.1. Le concept de maintenance et l'arborescence logistique	
1.3.2. L'exploration conditionnelle	
<b>2. Place de la modélisation dans l'optimisation du compromis « Disponibilité/Coût »</b> .....	<b>P.111</b>
2.1. Modélisation des fonctions élémentaires et « re-use » de modèles .....	P.111
2.2. Modélisation fonctionnelle des contraintes opérationnelles .....	P.114
2.3. Le modèle de contrainte opérationnelle comme modèle fonctionnel d'un dispositif	P.117
2.3.1. Le modèle fonctionnel	

### 2.3.2. Les actions correctives

<b>Conclusion générale et perspective</b>	.....	<b>P.121</b>
<b>Annexe</b>	.....	<b>P.123</b>
<b>Références</b>	.....	<b>P.133</b>
<b>Publications</b>	.....	<b>P.135</b>
<b>Lexique</b>	.....	<b>P.136</b>



## **PREMIERE PARTIE**

### **CHAPITRE 1 : ANALYSE DE L'ADEQUATION DES MODELES AUX METHODES DE CONCEPTION DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES.**

#### **1. Bases conceptuelles d'une logistique de la modélisation**

Notre objectif ici est de poser les bases d'une logistique de la modélisation en conception des systèmes multi-technologiques.

Après présentation des caractéristiques de ces systèmes, nous nous proposerons d'établir un parallèle entre les méthodes de conception et la modélisation afin de déboucher sur une tentative de caractérisation des modèles fonctionnels et de leur utilité dans la stratégie de conception multi-technologique.

##### **1.1. Caractérisation des systèmes multi-technologiques**

###### **1.1.1. Définition de référence**

Selon la norme américaine MIL - M -15071 - H (favorablement accueillie par la Délégation Générale pour l'Armement), un système est un ensemble comportant deux ou plusieurs éléments ayant tous une identité et une définition, assemblés en vue de permettre l'accomplissement d'une fonction particulière [R01].

Un système multi-technologique peut donc se définir comme l'ensemble des éléments (ou composantes opérationnelles) qu'il faut réunir et faire opérer pour obtenir le résultat recherché.

Lorsque l'on cherche à décrire ces éléments, on découvre qu'ils se composent d'une double structure:

- des éléments matériels suivant une arborescence technique,
- des éléments fonctionnels suivant une arborescence fonctionnelle organisée selon le résultat que l'on peut attendre de la fonction.

Le résultat attendu de la combinaison des composantes opérationnelles est appelé mission du système et la logique de combinaison de ces composantes, processus opérationnel.

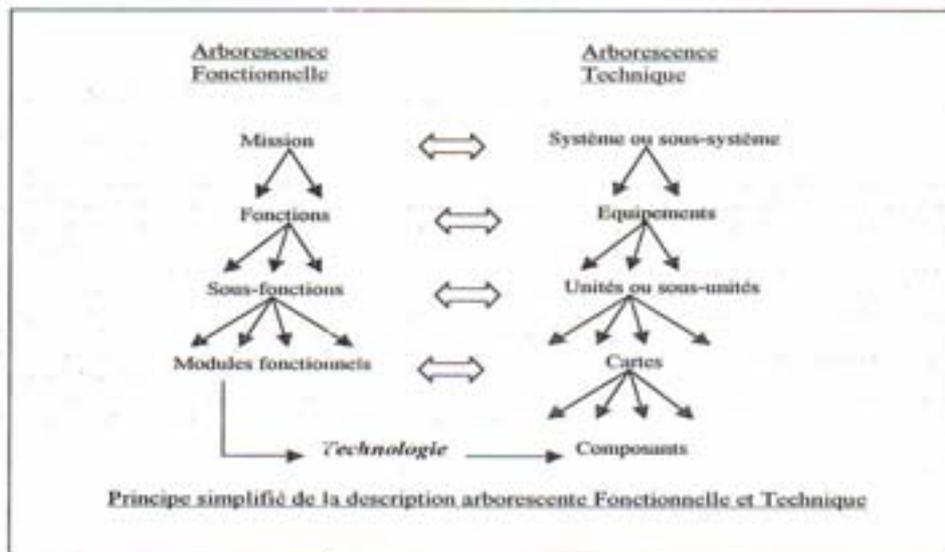


Fig. 1.1.1 : Principe simplifié de la description arborescente fonctionnelle et technique.

La figure 1.1.1 montre la nécessité de l'interpénétration des deux arborescences, fonctionnelles et techniques, et le nécessaire aller-retour entre ces deux arborescences pour la recherche d'un optimum dans la réponse à un besoin dans la conception système.

La mission du système doit être définie avec une précision et une concision extrême. La mission du système est différente des fonctions qui la sous-tendent. Le système peut accepter plusieurs missions (ex: avion militaire faisant de l'attaque au sol et du renseignement), clairement identifiées et hiérarchisées au plus haut niveau.

Les fonctions du système sont les composantes opérationnelles dont le bon fonctionnement, la coordination et la complémentarité permettent l'accomplissement de la mission.

D'un point de vue systémique, les éléments constitutifs du système sont les éléments identifiables (personnes, environnement, matériels, logiciels, interfaces...) sur lesquels repose l'accomplissement correct des fonctions.

### 1.1.2. Architecture d'un système multi-technologique

Elle est décrite par deux arborescences distinctes, l'arborescence fonctionnelle et l'arborescence technique, mais liées et mises en correspondance relationnelle biunivoque.

#### a) L'arborescence fonctionnelle

C'est celle qui est obtenue en plaçant:

- au niveau 0, la mission,
- au niveau 1, les fonctions opérationnelles permettant d'accomplir la mission,
- au niveau 2, les fonctions permettant de réaliser les fonctions de premier rang,

- au niveau 3, les fonctions permettant de réaliser celles de niveau 2, et ainsi de suite...

A partir d'un certain niveau de décomposition, les fonctions identifiées sont de plus en plus techniques. Tout en bas de la décomposition fonctionnelle se trouvent des micros fonctions en dessous desquelles il n'est pas utile de continuer la décomposition; ce sont **des modules fonctionnels**.

### b) L'arborescence technique

Elle décrit le système en ne tenant compte que des éléments matériels (et logiciels) qui entrent dans la composition du système pour que la mission et les fonctions identifiées dans l'arborescence fonctionnelle soient réalisables.

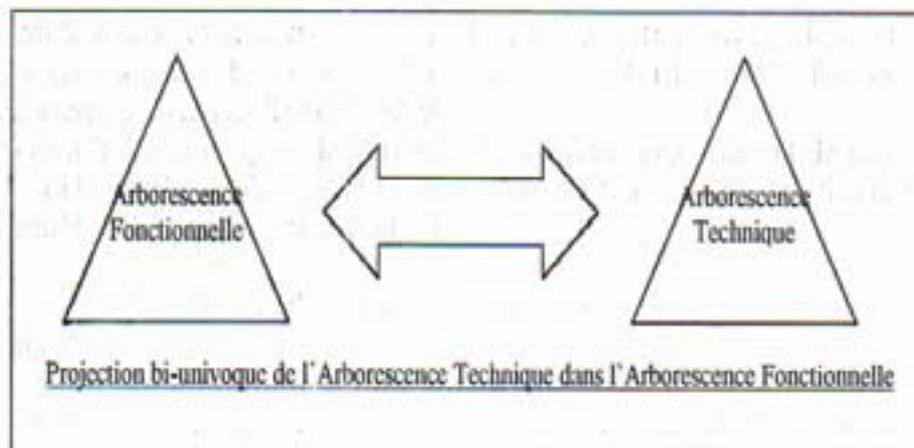
Cette nomenclature se compose de plusieurs phases traitant successivement de tous les macros ensembles identifiables et physiquement isolables, puis de leurs éléments constitutifs (ensembles, sous-ensembles, éléments, boîtiers, composants).

### c) Complémentarité des arborescences fonctionnelles et techniques et notion de projection biunivoque

Tout élément matériel de l'arborescence technique a "un rôle à jouer" dans le système. Ce "rôle à jouer" est une fonction de taille et d'importance variable apparaissant dans l'arborescence fonctionnelle au même niveau de décomposition. L'architecture du système est correctement décrite si:

- l'arborescence fonctionnelle décrit toutes et rien que les fonctions permettant d'accomplir la mission,
- l'arborescence technique ne comporte que et tous les éléments matériels appelés par les besoins fonctionnels explicités dans l'arborescence fonctionnelle.

On parle alors de définition architecturale du système par projection biunivoque de l'arborescence technique dans l'arborescence fonctionnelle.



*Fig. 1.1.2 : Projection biunivoque de l'arborescence technique dans l'arborescence fonctionnelle.*

La figure 1.1.2 symbolise la nécessaire complémentarité des 2 arborescences et la projection biunivoque des éléments matériels dans l'architecture fonctionnelle.

#### **d) Recherche des performances du système en conception**

La réunion d'un certain nombre de composantes opérationnelles ne suffit pas; il faut que le système soit performant et compétitif [R02].

Dans sa phase de conception, la recherche des performances repose sur les tâches d'analyse suivantes:

- identifier et définir les objectifs de la mission,
- identifier et décrire des composantes opérationnelles nécessaires à l'accomplissement de la mission,
- valider un premier processus opérationnel et évaluer les performances et les écarts obtenus,
- redéfinir les composantes en éliminant des fonctions et des éléments matériels inutiles dans l'arborescence fonctionnelle et l'arborescence technique,
- itérer jusqu'à obtenir un **rapport qualité /prix / performances / risques** acceptable.

Une fois le système conçu, la recherche de performances portera sur la maîtrise de son utilisation et son maintien en condition opérationnelle.

### **1.2. Stratégie de conception et Modélisation des systèmes multi-technologiques.**

#### **1.2.1. Stratégie de conception**

D'une façon générale, la stratégie qui se dégage dans la conception de systèmes multi-technologiques est fournie par l'application de deux méthodes, l'une descendante, l'autre ascendante.

Dans la méthode descendante, que l'on qualifie d'approche fonctionnelle, on part de l'indication de ce que l'on recherche ou encore du potentiel de performance du système en conception, pour déterminer des orientations de réalisation.

Dans les méthodes ascendantes, on part des performances du composant pour établir la réponse à la fonction envisagée.

En pratique, le concepteur utilise ces deux méthodes à tour de rôle pour concevoir le système et ses composantes ; ceci d'autant que des impératifs économiques l'obligent parfois à utiliser des composants sur étagères entrant « tout juste » dans les tolérances de spécifications, et parfois même s'en éloignant, au détriment du besoin client, à savoir ce pourquoi le système est créé.

Un parallèle entre les méthodes de modélisation et les méthodes descendantes et ascendantes de la conception peut être effectué, ce que nous verrons par la suite.

Nous avons vu que la caractérisation d'un système multi-technologique se faisait au moyen de deux arborescences, l'une fonctionnelle, l'autre technique, dont la construction suit

respectivement l'approche fonctionnelle (méthode descendante) et l'approche composant (méthode ascendante) avec, à chaque fois, projection biunivoque de l'une dans l'autre. Un petit exemple facilitera la compréhension.

Prenons le cas d'un satellite de communication.

Sa mission est de relayer des communications dans un environnement spatial.

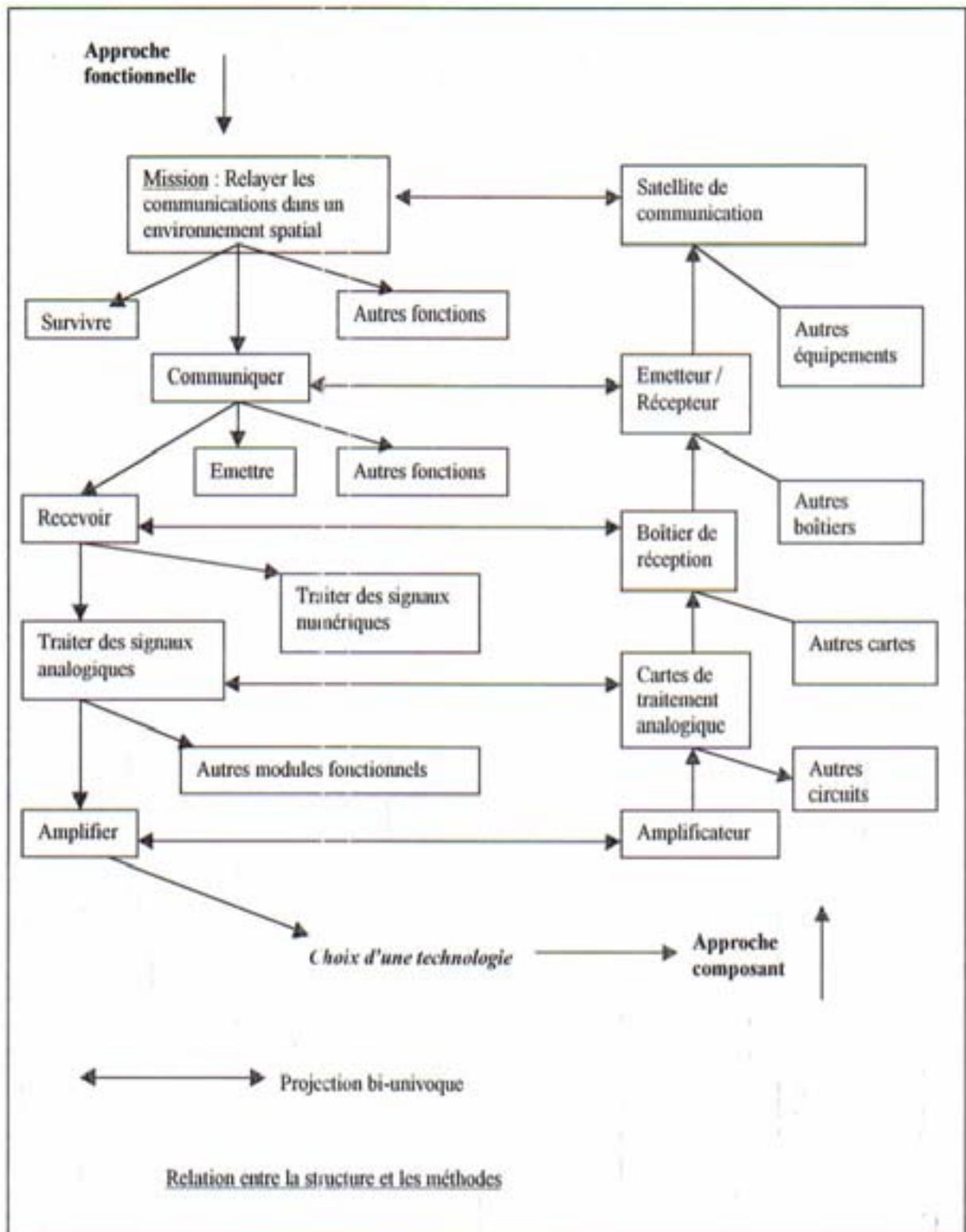
Les principales fonctions de premier rang qui sous-tendent cette mission sont donc de « survivre dans l'environnement » et de « communiquer » (il y en a d'autres bien évidemment).

Les principales fonctions de second rang de la fonction de rang supérieur « communiquer » sont de « recevoir » et « émettre » les communications.

Les fonctions de troisième rang de la fonction « recevoir » peuvent être de « traiter un signal analogique » et « traiter un signal logique ».

En ce qui concerne le traitement d'un signal analogique, **un module fonctionnel**, c'est à dire une fonction au delà de laquelle il n'est plus utile de la décomposer, peut être : « amplifier le signal ».

Ainsi la figure 1.1.3 de la page précédente montre la relation entre les arborescences techniques et fonctionnelles et les méthodes ascendantes et descendantes de la conception système.



*Fig. 1.1.3 : Relation entre la structure et les méthodes.*

## 1.2.2. Méthodologie de modélisation

Nous avons précédemment défini ce qu'étaient les méthodologies descendantes et ascendantes de la conception.

La méthodologie de la modélisation VHDL-AMS [R03] regroupe trois « types » de modélisation : « fonctionnel », « comportemental et structurel », et « physique » [R04].

La modélisation fonctionnelle fera l'objet d'un développement particulier au prochain paragraphe.

La modélisation comportementale et structurelle a pour objectif de décrire des phénomènes de natures diverses ayant de fortes interactions : des interactions numériques - analogiques dans le domaine électronique, des interactions multi-domaine technologique, dont l'étude est basée sur l'analogie avec l'électricité.

La modélisation physique qui se rapproche de la modélisation de dispositifs de type SPICE par exemple, a pour objectif d'étudier le comportement physique du dispositif.

La conjonction des méthodes de modélisation VHDL-AMS [R05] aux méthodes descendantes et ascendantes de la conception permet d'assurer la cohérence des critères de performances physiques et les potentiels de performances fonctionnelles comme le montre la figure 1.1.4. Au niveau des spécifications, les modèles fonctionnels permettent de déterminer un potentiel de performance. La cohérence du potentiel de performance et des critères de performances au niveau système et équipements peuvent être décrits dans des modèles comportementaux et structurels. Enfin, les critères de performances physiques au niveau composant de la méthode de conception ascendante peuvent être décrits par des modèles VHDL-AMS physiques.

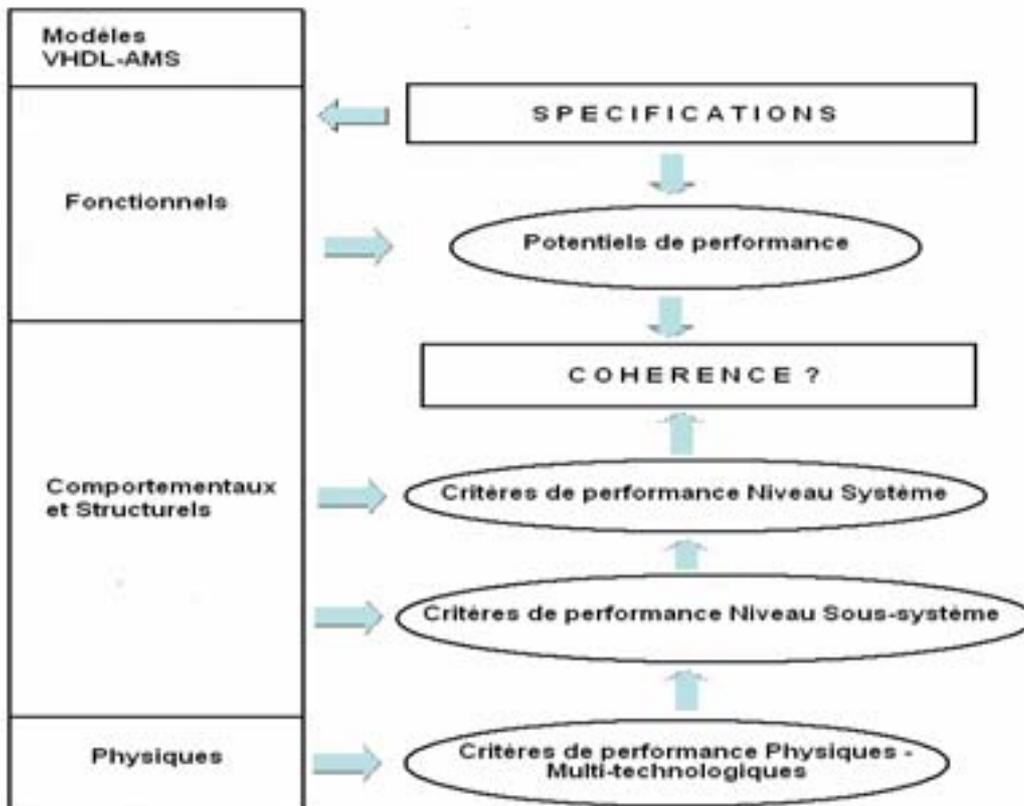


Fig. 1.1.4 : Méthodologie de modélisation VHDL-AMS.

### 1.3. Tentative de caractérisation des modèles fonctionnels.

L'objectif de ce paragraphe est de se faire une idée simple de la notion de modèle fonctionnel. En effet, s'il est assez facile d'appréhender ce que sont des modèles physiques, comportementaux et structurels, il est moins évident de cerner les caractéristiques des modèles fonctionnels. Pour se faire, nous avons utilisé deux axes de caractérisation.

#### 1.3.1. Extraction intuitive du « fonctionnel » dans un modèle « comportemental »

Nous avons dit que la modélisation de type comportemental [R06] permettait de décrire des interactions de différents domaines technologiques. Prenons l'exemple d'un **modèle VHDL-AMS existant** de transistor MOS soumis à radiation et à auto-échauffement [R07]

##### 1) Modèle de transistor MOS soumis à radiation et à auto-échauffement

Cet exemple combine « comportemental » et « physique » et utilise des équations simplifiées. L'effet de la dose accumulée est calculé empiriquement au niveau de la tension de seuil  $v_t$  par la formule suivante :  $V_t = -0,36 \cdot \text{tox}^2 \cdot \text{dose}$  (1) (en volts) où **tox** est l'épaisseur d'oxyde (en Angstrom) et dose (en Krad). L'effet de l'auto-échauffement peut être traduit au niveau du facteur de conductance (mobilité)  $k_{th}$  et au niveau de la tension de seuil  $v_{th}$ .

Le courant de drain est représenté par des équations semblables à celles du modèle MOS1 (MOS niveau 1) en SPICE3F5.

##### a. Schéma de principe

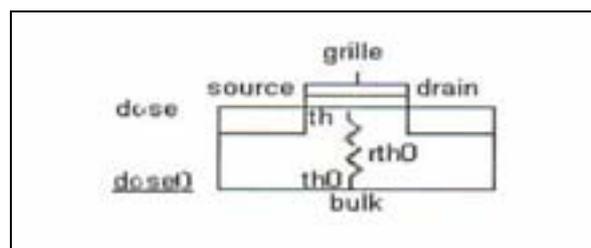


Fig. 1.1.5 : Schéma de principe du transistor MOS soumis à radiation et auto-échauffement.

La figure 1.1.5 présente le principe d'un transistor MOS soumis à auto-échauffement et à une dose de radiation. L'auto-échauffement est « matérialisé » par une résistance thermique ( $r_{th0}$ ) entre la grille et le substrat.

## b. Code VHDL-AMS

```
ENTITY mrte IS
  GENERIC(rth0 : real := 0.01 ; kth0 : real:= 0.1 ; lambda : real := 1.0 e-2 ; tox :
    250.0 ; vt : real := 0.7) ;
  PORT (TERMINAL dose, dose0: radiative; TERMINAL dr, ga, so, bu : electrical ; QUANTITY
    tempe : OUT real) ;
END mrte ;

ARCHITECTURE a OF mrte IS
  QUANTITY tempe, vtt, vth, kth : real ;
  QUANTITY vds across ids through dr to so ;
  QUANTITY vgs across ga to so ;
  QUANTITY dose across dose to dose0 ;

  BEGIN

  vtt = = vt - 0.36 * tox * tox * dose ;
  tempe = = rth0 * vds * ids ;
  vth = = vtt * (1.0 + 0.01 * tempe) ;
  kth = = kth0 * (1.0 + 0.02 * tempe) ;

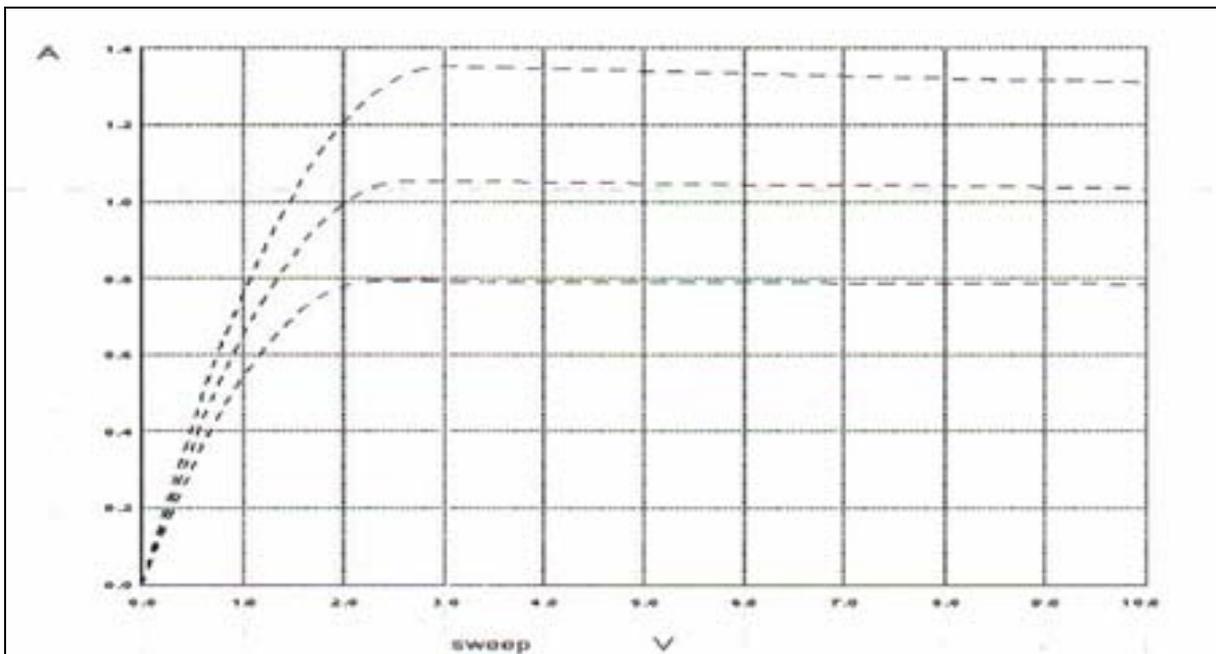
  IF (vgs < = vth) USE ids = = 0.0 ;

  ELSIF (vds < - vgs - vth) USE
  ids = = kth * vds * (vgs - vth - 0.5*vds) ;

  ELSE
  ids = = 0.5 * kth * (vgs - vth) * (vgs - vth) * (1.0 + lambda * vds) ;

  END USE ;
  temper = = tempe ;
END a;
```

## c. Résultat de simulation : détermination du courant de drain



*Fig. 1.1.6 : Résultat de simulation : détermination du courant de drain.*

La figure 1.1.6 montre quel intérêt on peut dégager du modèle de transistor MOS pour la caractérisation d'un modèle fonctionnel portant sur la spécification de tenue en radiation.

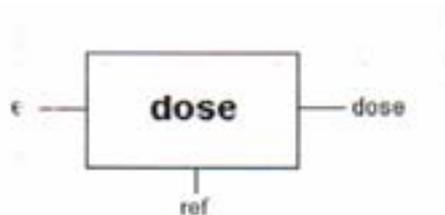
En effet, la partie radiative du modèle montre la sensibilité de la tension de seuil à la dose de radiation.

Il est tout à fait possible d'extraire cette loi et d'en modifier la formule pour créer un modèle qui aura pour objectif de calculer la dose de radiation admissible de plusieurs transistors MOS en fonction de l'épaisseur de leur couche d'oxyde et de leur tension de seuil.

Le modèle VHDL-AMS pourrait donc être le suivant.

## 2) Modèle « dose de radiation en fonction de la tension de seuil »

### a. Schéma de principe



*Fig. 1.1.7 : Modèle dose de radiation en fonction de la tension de seuil.*

Dans la figure 1.1.7, la sortie de la « boîte noire » dose est la dose de radiation en fonction de la tension de seuil provenant du modèle de transistor MOS que nous avons vu précédemment.

### b. Code VHDL-AMS (dose.vhd)

```
ENTITY dose IS
  GENERIC (tox : real := 250 .00 ) ;
  PORT ( TERMINAL e, ref : functional ;
  QUANTITY dose : OUT real)
  END dose ;

  ARCHITECTURE a OF dose IS
  QUANTITY vt across e to ref ;
  BEGIN
  dose == vt / 0.36 * tox * tox ;
  END a;
```

- c. **Résultat de simulation : calcul de la dose de radiation admissible en fonction de la tension de seuil d'un transistor MOS ayant une épaisseur de couche d'oxyde donnée (ici 250 Angstrom)**

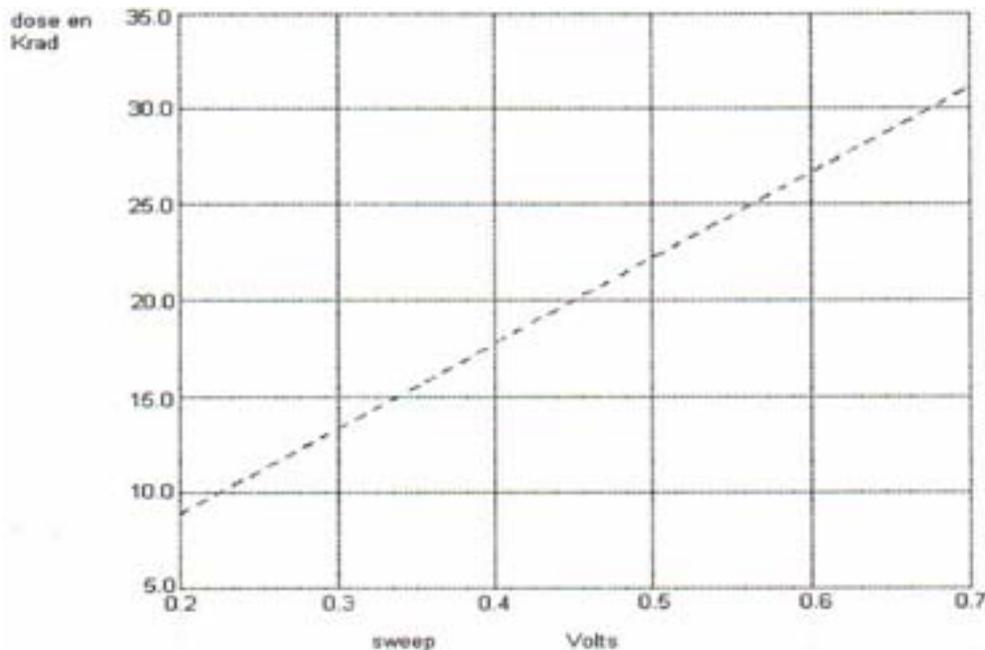


Fig. 1.1.8 : Résultat de simulation : dose admissible en fonction de la tension de seuil.

Avec la figure 1.1.8, nous approchons ainsi de la notion de spécification fonctionnelle, à savoir que celle-ci peut être la tenue des circuits composés de transistors MOS à une dose donnée de radiation en Krad.

**En première approche, on peut dire qu'un modèle fonctionnel peut être caractérisé par une formule mathématique immuable découlant d'une loi physique et s'appliquant à tout objet de même type.**

### 1.3.2. Du « module fonctionnel » au « modèle fonctionnel ».

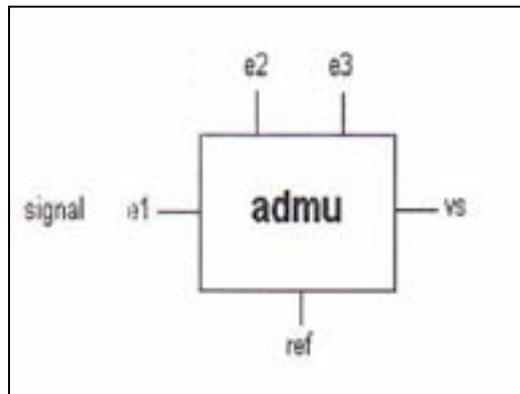
La description en arborescence fonctionnelle d'un système multi-technologique fait ressortir qu'au delà d'un certain stade il n'est plus utile, ou plus possible, de décomposer une fonction du système en d'autres sous fonctions. Cette composante opérationnelle est appelée module fonctionnel. C'est à partir de ce module fonctionnel qu'on dispose du choix d'une technologie pour réaliser la fonction. Le module fonctionnel devient la charnière entre ce qui est du domaine fonctionnel et du domaine technique.

De module à modèle, il n'y a qu'un pas (une lettre plus exactement). En effet, toute fonction peut être décomposée en module fonctionnel aisément modélisable.

A titre d'exemple, reprenons le module fonctionnel « amplifier » de la fonction « traiter les signaux analogiques » de l'arborescence fonctionnelle du satellite de communication. Ce module fonctionnel peut être modélisé par l'additionneur - multiplieur suivant.

## 1) Modèle additionneur – multiplieur

### a. Schéma de principe



*Fig. 1.1.9 : Modèle additionneur – multiplieur.*

Dans la figure 1.1.9 un signal à l'entrée e1 va fournir en sortie un signal (VS) par l'addition et la multiplication de 2 autres signaux aux « bornes » (e2) et (e3) de la manière suivante :

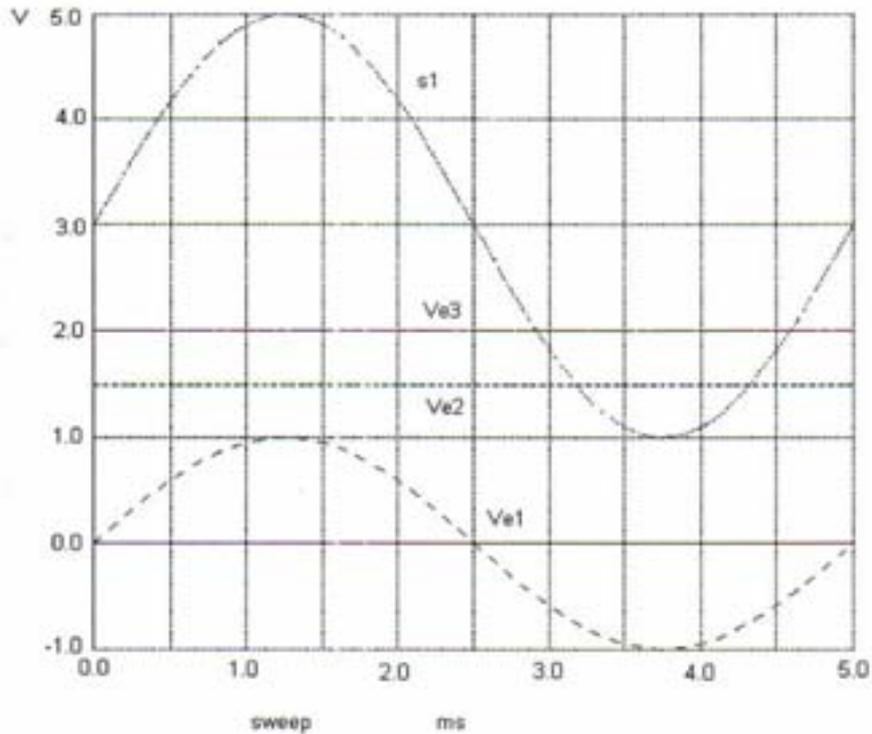
$$VS = (Ve1 + Ve2).Ve3 \quad (2)$$

### b. Code VHDL-AMS (admu.vhd)

```
ENTITY admu IS
PORT (TERMINAL e1, e2, e3, ref : functional ;
QUANTITY vs : OUT real) ;
END admu ;

ARCHITECTURE a OF admu IS
QUANTITY ve1 across e1 to ref ;
QUANTITY ve2 across e2 to ref ;
QUANTITY ve3 across e3 to ref ;
BEGIN
vs = (ve1 + ve2) * ve3 ;
END a;
```

### c. Résultat de simulation : addition et multiplication des signaux



*Fig. 1.1.10 : Résultats de simulation de l'additionneur multiplieur*

Nous constatons qu'à ce stade nous n'avons fait appel à aucune technologie [R08]. On peut donc considérer le modèle fonctionnel comme un utilitaire valable pour toute technologie.

**L'intérêt d'un modèle fonctionnel est sa capacité à traduire ce que l'on souhaite obtenir en quelque chose de simulable.**

La spécification d'un système peut donc s'effectuer à l'aide de modèles fonctionnels, c'est-à-dire d'un ensemble de boîtes noires, dont l'objectif est de réaliser des fonctions de transfert entre des signaux d'entrée et de sortie, tel que nous le montre la figure 1.1.10.

Le potentiel de performance contenu dans un modèle fonctionnel peut provenir d'une loi physique, comme dans le cas d'un système composé de transistors MOS soumis à radiation, ou par l'emploi d'utilitaires tels que l'additionneur - multiplieur.

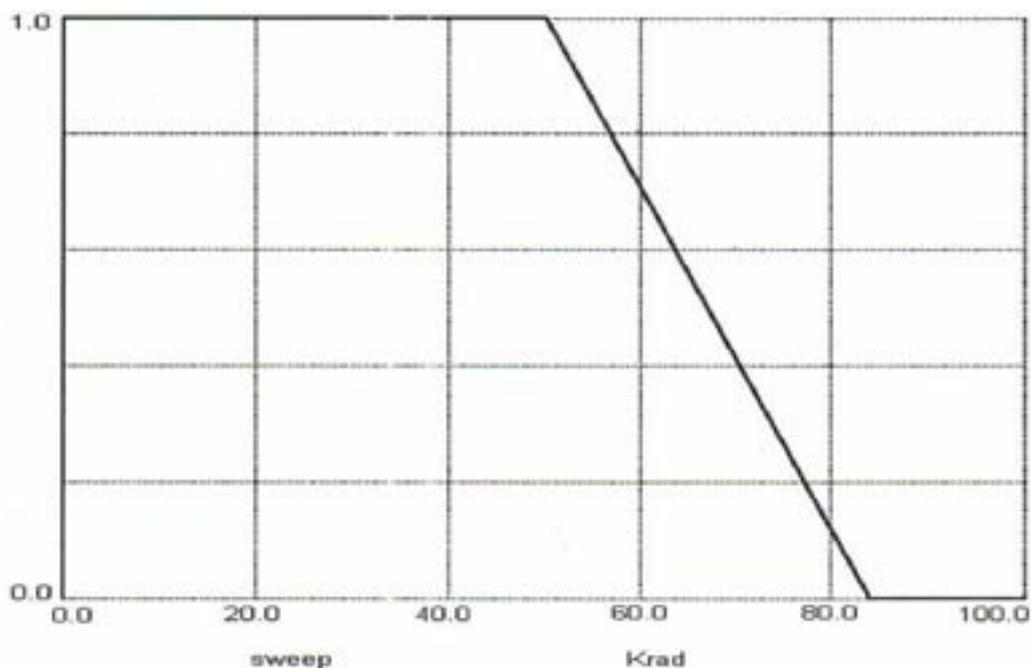
Ainsi, la spécification de la tenue aux radiations d'un cas très simple comme le transistor MOS peut être dans le modèle fonctionnel VHDL-AMS suivant:

#### d. Code VHDL-AMS (spec.vhd)

```
ENTITY spec IS
  GENERIC ( spe : real := 50.0 ; tau : real := 5000.0 ) ;
  PORT (TERMINAL e, ref unctional ;
  QUANTITY vs : OUT real) ;
END spec ;

ARCHITECTURE a OF spec IS
  QUANTITY t, fonct : OUT real ;
  QUANTITY ve across e to ref ;
  BEGIN
    t = = NOW ;
    IF (t < = spe) USE
      fonct = = ve ;
    ELSE
      fonct = = ve * exp( -(t - spe)/tau) ;
    END USE ;
    vs = = fonct ;
  END a;
```

#### e. Résultat de simulation : spécification de la tenue au radiation du MOS



*Fig. 1.1.11 : Résultat de simulation du modèle pour la spécification de tenue en radiation d'un transistor MOS.*

Dans la figure 1.1.11, la courbe de simulation montre que pour une dose supérieure à un niveau spécifié (50 Krad) la tenue au radiation d'un transistor MOS décroît de façon exponentielle.

L'intérêt au niveau composant reste très limité comme nous pouvons le constater, car nous ne nous situons qu'à un seul niveau d'abstraction. **C'est au niveau système où les spécifications se multiplient, que les modèles fonctionnels fournissent toute leur valeur ajoutée comme support à la spécification fonctionnelle [R09].**

## 2. Modèles multi-technologiques

La conception assistée par ordinateur (CAO) électronique utilise couramment la simulation électrique pour prévoir ou vérifier le comportement d'un circuit [R10].

Les simulateurs électriques font appel à des modèles décrivant le comportement électrique des composants utilisés [R11].

Le comportement d'un composant sera simulable dès lors que l'on aura pu établir les relations entre le courant et les différentes tensions aux nœuds du circuit [R12]. Au niveau de la modélisation VHDL-AMS, ces relations sont celles qui existent entre les quantités THROUGH et ACROSS.

Tout modèle de composant électrique utilise les modèles de base que sont la résistance, la self, le condensateur et les sources de tension et de courant.

Par analogie avec l'électricité, il existe des modèles de base pour tout domaine technologique, et, il est possible d'utiliser un simulateur électrique (et plus particulièrement son solveur d'équations algébriques et différentielles) pour simuler le comportement d'un système mécanique et d'autres systèmes analogiques, à savoir thermiques, hydrauliques, radiatifs, magnétiques...

Dans ce chapitre nous nous proposons de présenter, dans un premier temps, les modèles de base des systèmes mécaniques et thermiques en établissant leur analogie avec le domaine électrique, pour aboutir dans un second temps, à deux exemples de modélisation multi-technologique faisant d'une part appel à des interactions électriques et mécaniques, et d'autre part à l'effet interactions électriques et thermiques.

Pour comprendre le comportement d'un système, on a besoin de modèles mathématiques sous forme de fonction de transfert mettant en relation une entrée à une sortie. Ces équations sont basées sur les lois fondamentales de la physique gouvernant le comportement du système.

Un système électrique peut donc être décrit avec les modèles de base que sont l'inductance (L), la résistance (R), la capacité (C) et les sources de tension et de courant.

Ces modèles de base peuvent être représentés comme des blocs fonctionnels (boîtes noires mettant en relation une entrée à une sortie) que l'on fait interagir pour modéliser le comportement d'un système électrique.

Par analogie, la description d'un système mécanique peut aussi se faire par des blocs fonctionnels représentant des modèles de base.

C'est ce que nous proposons de voir dans ce qui suit, en faisant un rappel sur les modèles de base des systèmes électriques, en présentant les modèles de base des systèmes mécaniques et des systèmes thermiques et en établissant l'analogie mécanique – électrique et l'analogie électrique - thermique.

### 2.1. Rappel sur les modèles électriques de base

Les équations définissent les caractéristiques des modèles de base que sont l'inductance (**L**), la capacité (**C**) et la résistance (**R**) quand l'entrée de ces blocs fonctionnels est la différence de

potentiel et la sortie, le courant [R13].

**1) Equation de description de l'inductance :**

$$di = 1/L[u.dt] \quad (3)$$

**2) Equation de description de la capacité :**

$$i = C(du/dt) \quad (4)$$

**3) Equation de description de la résistance :**

$$i = u/R \quad (5)$$

L'inductance et la capacité emmagasinent de l'énergie alors que la résistance la dissipe. On a ainsi :

**4) Energie stockée par l'inductance :**

$$E = \frac{1}{2}.Li^2 \quad (6)$$

**5) Energie stockée par la capacité :**

$$E = \frac{1}{2}.Cu^2 \quad (7)$$

**6) Puissance dissipée par la résistance :**

$$P = u^2/R \quad (8)$$

**7) Génération d'équations à partir d'un circuit RLC**

Les modèles de base présentés nous permettent de générer des équations décrivant le comportement de tout système électrique.

Prenons un exemple très simple, un circuit RLC auquel on applique une tension V (figure 1.1.2).

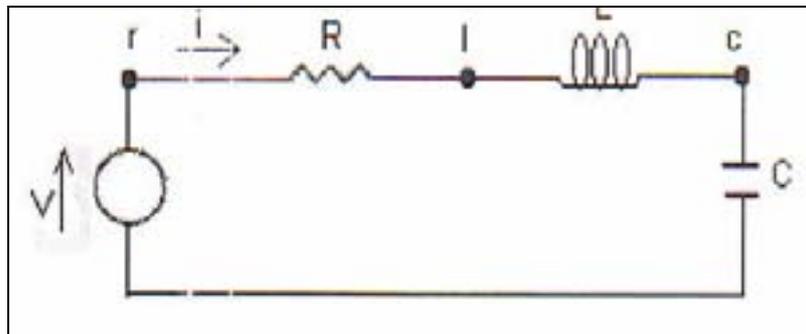


Fig. 1.1.12 : Circuit RLC.

En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff à ce circuit, on obtient :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_C \quad (9)$$

Où  $\mathbf{V}_R$ ,  $\mathbf{V}_L$ ,  $\mathbf{V}_C$  représentent respectivement les tensions aux bornes de la résistance, de la self et du condensateur.

D'une manière fonctionnelle, on peut représenter le circuit RLC comme un système dont l'entrée est la tension appliquée ( $\mathbf{V}$ ) et la sortie la tension aux bornes du condensateur ( $\mathbf{V}_C$ ) (figure 1.1.13).

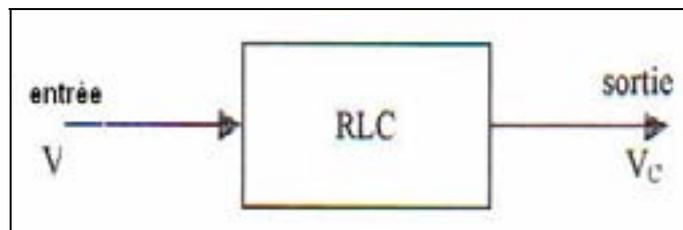


Fig. 1.1.13 : Schéma de principe du circuit RLC.

Sachant que  $V_R = Ri$  et que  $V_L = L(di/dt)$ , on obtient en remplaçant dans l'égalité (9)

$$\mathbf{V} = \mathbf{R.i} + \mathbf{L(di/dt)} + \mathbf{V}_c \quad (10)$$

Sachant d'autre part que

$$\mathbf{i} = \mathbf{C(dV}_c/\mathbf{dt)} \quad (11)$$

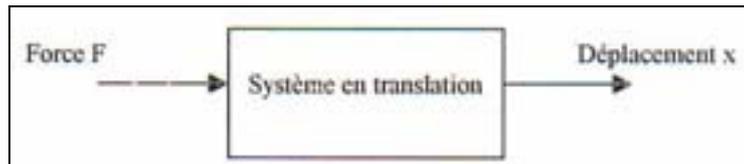
On obtient l'équation différentielle du second ordre régissant le comportement du système RLC suivante :

$$\mathbf{V} = \mathbf{L.C(d^2V}_c/\mathbf{dt^2)} + \mathbf{R.C(dV}_c/\mathbf{dt)} + \mathbf{V}_c \quad (12)$$

Cette équation est intéressante car elle nous permettra d'établir une certaine analogie avec le domaine de la mécanique comme nous le verrons dans ce qui suit.

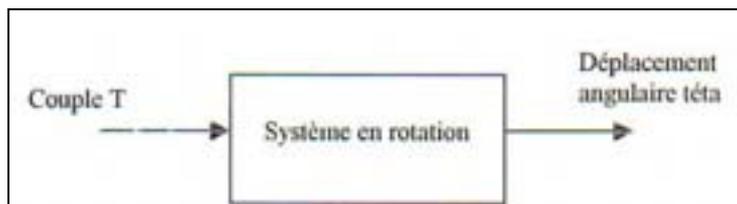
## 2.2. Modèles de base des systèmes mécaniques

Un système mécanique se définit comme un ensemble d'éléments sur lesquels agissent des forces. On peut considérer des systèmes en translation et des systèmes en rotations [R14]. Si l'on représente un système en translation par un bloc fonctionnel, son entrée est une force ( $F$ ) et sa sortie, un déplacement ( $x$ ) (figure 1.1.14).



*Fig. 1.1.14 : Schéma de principe d'un système mécanique en translation.*

Il en est de même pour un système en rotation où l'entrée est un couple ( $T$ ) et la sortie, un déplacement angulaire ( $\theta$ ) (figure 1.1.15).



*Fig. 1.1.15 : Schéma de principe d'un système mécanique en rotation.*

### 2.2.1. Systèmes en translation et en rotation

#### 1) Système en translation

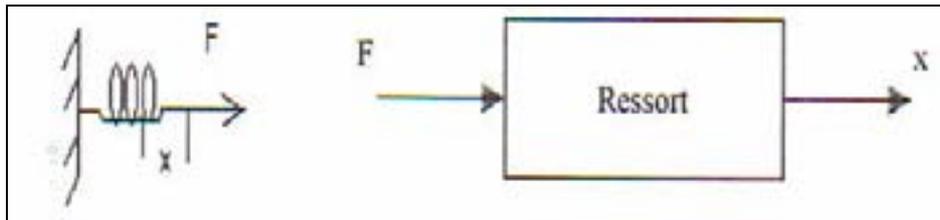
Tout système en translation dispose de propriétés de raideur, d'opposition au mouvement et de résistance à l'accélération.

Ces différents phénomènes peuvent être décrits par des modèles de base tout comme les modèles L, R, C servent de base à la description du comportement de systèmes électriques.

Ainsi, le ressort représente la raideur du système en translation, l'amortisseur à fluide, la force s'opposant au mouvement, et la masse, la résistance qu'oppose le système à l'accélération.

### a. Le ressort linéaire

La raideur du ressort peut se décrire par la relation entre la force ( $F$ ) utilisée pour retendre ou le comprimer et l'extension ou la compression résultante ( $x$ ) (figure 1.1.16) :



*Fig. 1.1.16 : Le ressort linéaire.*

On considère que l'extension (ou la compression) du ressort est proportionnelle à la force appliquée pour retendre (ou le comprimer). Le ressort est donc linéaire, et l'on peut écrire :

$$\mathbf{F} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} \quad (13)$$

Où  $\mathbf{F}$  est la force appliquée,  $\mathbf{x}$ , la résultante, et  $\mathbf{k}$ , la raideur (constante).

Il est à noter que l'objet qui applique la force pour étendre (ou comprimer) le ressort est une force de direction opposée et égale en intensité

### b. L'amortisseur à fluide

Le modèle de l'amortisseur à fluide décrit l'action des forces exercées pour : pousser un objet à travers un fluide, mouvoir cet objet contre les forces de friction.

Plus l'objet est poussé rapidement, plus les forces s'opposant à son mouvement sont importantes.

Prenons le cas d'un dispositif composé d'un piston ajouré relié à une tige, se mouvant dans un cylindre fermé rempli d'un fluide.

Lorsque l'on applique une force sur la tige et dans sa direction, le fluide s'écoulant au travers du piston produit une force résistive.

D'une manière idéale, on peut dire que la force résistive ( $\mathbf{F}$ ), représentant le freinage du piston, est proportionnelle à la vitesse ( $\mathbf{v}$ ) du déplacement ( $\mathbf{x}$ ) du piston (figure 1.1.17).

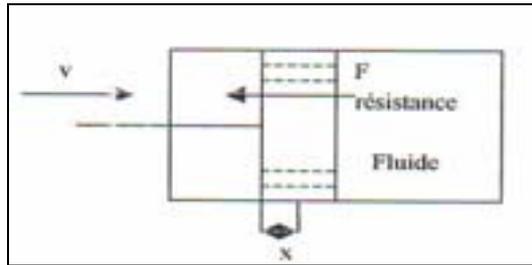


Fig. 1.1.17 : L'amortisseur à fluide.

On peut donc écrire

$$F = b.v \quad (14)$$

Avec **b** le coefficient d'amortissement (constante),

Et  $v = dx / dt$

Soit

$$F = b(dx / dt) \quad (15)$$

### c. La masse

Le modèle représentant la masse illustre la propriété selon laquelle : « plus grande est la masse, plus importante doit être la force nécessaire pour lui donner une accélération spécifique ».

On peut écrire la relation entre la force (**F**) et l'accélération (**a**) avec la formule suivante :

$$F = M.a \quad (16)$$

Où **M** représente la constante de proportionnalité qu'est la masse.

L'accélération (**a**) peut être déterminée en fonction de la vitesse (**v**) :

$$a = dv / dt \quad (17)$$

Et est donc fonction du déplacement (**x**) :

$$a = d(dx/dt) / dt \quad (18)$$

La relation entre la force et le déplacement s'écrit donc :

$$F = M (d^2x / dt^2) \quad (19)$$

## 2) Systèmes en rotation

Les modèles de base que sont les ressorts, amortisseurs à fluide et masses permettent de décrire des systèmes en translation, c'est-à-dire pour lesquels les forces et déplacements sont linéaires [R14].

Pour un système en rotation, les modèles de base deviennent le ressort de torsion, l'amortisseur à fluide rotationnel et le moment d'inertie.

Comme nous l'avons dit précédemment, si l'on représente ces modèles par des blocs fonctionnels, leurs entrées sont des couples alors que leurs sorties sont des déplacements angulaires.

### a. Le ressort de torsion.

Dans ce modèle, l'angle de rotation ( $\tau$ ) est proportionnel au couple ( $T$ ) ; on obtient :

$$T = k \cdot \tau \quad (20)$$

### b. L'amortisseur à fluide rotationnel

On considère dans ce cas un disque tournant dans un fluide avec un couple ( $T$ ) résistif, proportionnel à la vitesse angulaire ( $\omega$ ) :

$$T = c \cdot \omega \quad (21)$$

Avec  $c$  = constante.

La vitesse angulaire ( $\omega$ ) étant le taux de changement de l'angle ( $\tau$ ), l'expression décrivant la relation entre le couple ( $T$ ) et le déplacement angulaire s'écrit :

$$T = c (d(\tau) / dt) \quad (22)$$

### c. Le moment d'inertie.

Le modèle représentant le moment d'inertie illustre la propriété selon laquelle plus grand est le moment d'inertie ( $I$ ), c'est-à-dire la résistance qu'oppose la masse à sa rotation, plus grand est le couple ( $T$ ) nécessaire à l'accélération angulaire ( $\alpha$ ).

On peut écrire :

$$T = I \cdot \alpha \quad (23)$$

Avec

$$\alpha = d\omega / dt = d(d(\tau)/dt) / dt \quad (24)$$

Soit

$$T = I (d^2(\tau) / dt^2) \quad (25)$$

Dans une première approche, nous venons de montrer qu'il y a une certaine similitude entre les modèles de base électriques et mécaniques dans leur expression mathématique. On peut en effet établir une analogie entre l'intensité du courant et la force (le couple) d'une part, et la tension et la vitesse (la vitesse angulaire) d'autre part.

D'un point de vue physique, il faut une certaine énergie pour étendre ou comprimer le ressort, mouvoir le piston de l'amortisseur et accélérer la masse.

Dans le cas du ressort ou de la masse, l'énergie peut être récupérée, ce qui n'est pas le cas de l'amortisseur qui lui dissipe l'énergie.

### d. Energie emmagasinée et Puissance dissipée

Le ressort quand il est étendu emmagasine de l'énergie. Cette énergie est restituée quand le ressort revient à sa longueur initiale.

L'énergie stockée, pour une extension ( $x$ ) donnée, peut s'écrire sous la forme :

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (26)$$

Avec

$$x = F/k \quad (\text{cf. l'amortisseur linéaire}) \quad (27)$$

Soit :

$$E = \frac{1}{2} \cdot F^2 / k \quad (28)$$

Il en est de même pour le ressort de torsion où le couple (**T**) remplace la force (**F**) pour obtenir l'énergie stockée :

$$E = \frac{1}{2} \cdot T^2 / k \quad (29)$$

Lorsque la masse se meut à une vitesse (**v**), l'énergie cinétique est restituée lorsque cette masse s'immobilise. Cette énergie cinétique s'exprime sous la forme :

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \quad (30)$$

De même pour la masse en rotation, on peut écrire :

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (31)$$

Où (**I**) est le moment d'inertie et (**ω**) la vitesse angulaire.

Par analogie entre la tension et la vitesse, il est possible de comparer l'énergie cinétique à l'énergie stockée dans un condensateur :

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2 \quad (32)$$

Et donc de faire un parallèle entre la masse (moment d'inertie) et la capacité.

Le piston de l'amortisseur à fluide ne revient pas quant à lui à sa position initiale lorsque la force qui lui est appliquée n'agit plus. Dans ce cas l'énergie n'est pas stockée mais dissipée. La puissance dissipée dépend donc de la vitesse (**v**) :

$$P = c \cdot v^2 \quad (33)$$

Avec (**c**), le coefficient d'amortissement.

Il en est de même pour la puissance dissipée par l'amortisseur à fluide rotationnel dépendant de la vitesse angulaire ( $\omega$ ) :

$$P = c.\omega^2 \quad (34)$$

Par analogie à l'électricité, on peut constater que ces équations sont de la forme :

$$P = u^2/R \quad (35)$$

Traduisant la puissance dissipée par une résistance ( $R$ ).

On peut donc établir l'analogie entre la résistance ( $R$ ) et l'amortisseur ( $1/c$ ).

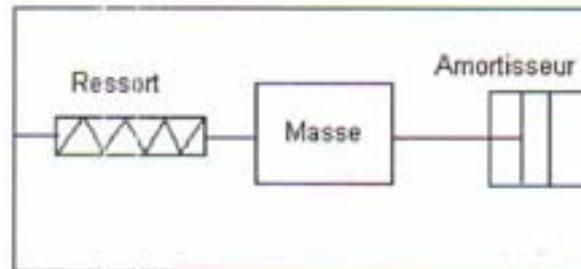
Le tableau suivant a pour objectif de résumer l'analogie qu'il y a entre le domaine électrique et le domaine mécanique.

<b>Electrique</b>	<b>Mécanique linéaire</b>	<b>Mécanique rotative</b>
Courant ( <b>i</b> )	Force ( <b>F</b> )	Couple ( <b>T</b> )
Tension ( <b>u</b> )	Vitesse ( <b>v</b> )	Vitesse angulaire ( <b><math>\omega</math></b> )
Résistance ( <b>R</b> )	Amortisseur ( <b>1/b</b> )	Amortisseur ( <b>1/c</b> )
Inductance ( <b>L</b> )	Raideur ( <b>k</b> )	Raideur ( <b>k</b> )
Capacité ( <b>C</b> )	Masse ( <b>M</b> )	Moment d'inertie ( <b>I</b> )

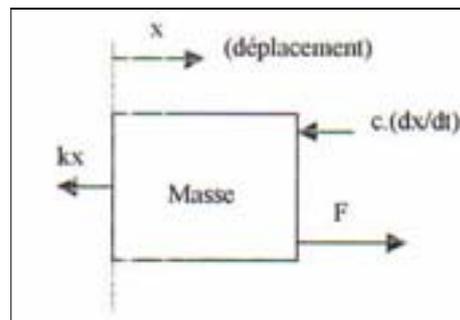
Tableau 1 : analogie mécanique – électrique.

## 2.2.2. Analogie « électromécanique »

Prenons l'exemple d'un accéléromètre composé d'un ressort, d'une masse et d'un amortisseur comme le montre la figure 1.1.18.



*Fig. 1.1.18 : L'accéléromètre.*



*Fig. 1.1.19 : Schéma de principe de l'accéléromètre.*

Ce dispositif nous permet d'établir la relation existante entre une force appliquée en entrée et le déplacement ( $x$ ) obtenu en sortie (figure 1.1.19). La force nette ( $f$ ) appliquée à la masse de l'accéléromètre soumis à un mouvement linéaire est la somme algébrique des forces agissant sur cette masse, d'où l'équation suivante :

$$f = F - k \cdot x - c \left( \frac{dx}{dt} \right) \quad (36)$$

Avec ( $k$ ), la raideur et ( $c$ ), le coefficient d'amortissement, ( $dx / dt$ ) représentant la vitesse. La force ( $f$ ) appliquée à la masse provoque son accélération.

On peut écrire que :

$$f = M \cdot a \quad (37)$$

Avec ( $a$ ) l'accélération égale à ( $d^2x/dt^2$ ),

Soit

$$\mathbf{f} = \mathbf{M} (d^2\mathbf{x}/dt^2) \quad (38)$$

L'égalité entre ces 2 équations donne :

$$\mathbf{F} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{c} (d\mathbf{x}/dt) = \mathbf{M} (d^2\mathbf{x}/dt^2) \quad (39)$$

D'où la relation entre la force ( $\mathbf{F}$ ) et le déplacement ( $\mathbf{x}$ ) décrit par l'équation différentielle du second ordre suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} (d^2\mathbf{x} / dt^2) + \mathbf{c} (d\mathbf{x} / dt) + \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} \quad (40)$$

Il est intéressant de constater que cette équation est de la forme de celle fournie par le circuit RLC, ce qui renforce l'analogie électrique - mécanique.

De nombreux systèmes mécaniques peuvent être construits à partir de la combinaison des modèles de base que sont les ressorts, les amortisseurs et les masses.

Nous avons vu le cas d'un capteur (l'accéléromètre) et il est envisageable de concevoir le train d'atterrissage d'un avion ou la suspension d'une voiture, et bien évidemment d'étendre le principe au domaine rotatif.

Pour évaluer la relation entre le couple et le déplacement angulaire, la procédure à adopter est de ne considérer que la masse en rotation et le couple agissant sur le corps.

Quand plusieurs couples agissent simultanément sur le corps, leur résultante peut être trouvée par la somme algébrique des couples.

Considérons un système comprenant un arbre au bout duquel se trouve une masse mise en rotation ( $\mathbf{I}$ ) par un couple ( $\mathbf{T}$ ). Le modèle équivalent se composera alors d'un ressort de torsion et d'un amortisseur à fluide rotationnel définissant l'arbre.

A partir de l'équation différentielle du second ordre mettant en relation la force ( $\mathbf{F}$ ) et le déplacement ( $\mathbf{x}$ ) d'un système en translation, on peut en déduire la relation du couple ( $\mathbf{T}$ ) au déplacement angulaire ( $\tau$ ), soit :

$$\mathbf{T} = \mathbf{I} (d^2(\tau) / dt^2) + \mathbf{c} (d(\tau) / dt) + \mathbf{k}(\tau) \quad (41)$$

## 2.3. Modèles de base des systèmes thermiques

La chaleur peut être transmise à un corps par les trois mécanismes que sont la conduction, la convection de l'air (naturelle ou forcée) et la radiation thermique [R14].  
Un élément thermique se définit comme un corps disposant de ces trois propriétés de transfert.

### 2.3.1. Modèles thermiques

La première loi de la thermodynamique permet de déterminer le changement de température d'un corps. Celle-ci dispose que la variation de la quantité de chaleur d'un corps (son énergie calorifique) est égale à la quantité de chaleur à l'intérieur de ce corps ( $Q_1$ ) moins celle à l'extérieur ( $Q_0$ ). Cette variation s'exprime par :

$$Q_1 - Q_0 = C (dT / dt) \quad (42)$$

Où ( $C$ ) est la capacité thermique du corps (en J/K) sachant que

$$C = M.c \quad (43)$$

Avec ( $M$ ), la masse du corps (en Kg) et ( $c$ ) la chaleur spécifique du matériau (en J/K.Kg).

La variation ( $Q_1 - Q_0$ ) s'exprime en Watt et la température ( $T$ ) en Kelvin.

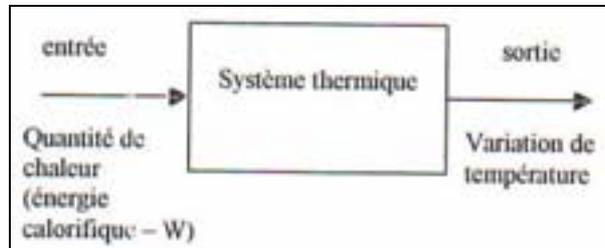
A ce niveau, on constate une certaine analogie entre la tension et la température, d'une part, et entre la capacité thermique et le condensateur, d'autre part. En outre, la variation de la quantité de chaleur d'un corps est fonction de la résistance thermique de ce corps, et s'exprime par :

$$Q_1 - Q_0 = (T_1 - T_2) / R \quad (44)$$

Où ( $R$ ) représente la résistance thermique (en KAV) et ( $T_1 - T_2$ ) le gradient de température à travers le corps où la conduction de chaleur est considérée.

**La résistance thermique et la capacité thermique sont donc les modèles de base de tout système thermique.**

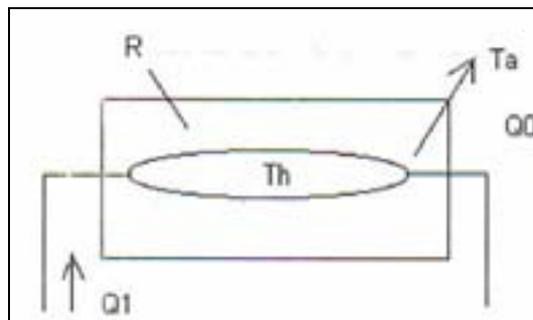
D'une manière fonctionnelle, on peut représenter un système thermique par la mise en relation d'une quantité de chaleur (en entrée) et de la variation de la température (en sortie) (figure 1.1.20).



*Fig. 1.1.20 : Schéma de principe d'un système thermique.*

### 2.3.2. Analogie « thermoélectrique »

Considérons un élément (thermique) ayant une température ( $T_h$ ). Cet élément est recouvert d'un isolant de résistance thermique ( $R$ ). La température de l'air ambiant est ( $T_a$ ). L'énergie calorifique fournie à l'élément est ( $Q_1$ ), la quantité de chaleur perdue est ( $Q_0$ ) (figure 1.1.21).



*Fig. 1.1.21 : Modèle d'un système thermique.*

Conformément à ce qui a été vu précédemment, la variation de la quantité de chaleur en fonction de la capacité thermique s'exprime par :

$$Q_1 - Q_0 = C (dT_h / dt) \quad (45)$$

La quantité de chaleur perdue est quant à elle fonction de la résistance thermique, et s'exprime de la manière suivante :

$$Q_0 = (T_h - T_a) / R \quad (46)$$

En remplaçant ( $Q_0$ ) par sa valeur dans la première équation on obtient l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$Q_1 = C (dTh / dt) - 1 / R(Th - Ta) \quad (47)$$

Cette équation est caractéristique de tout système thermique, et très analogue à celle d'un circuit RC.

En effet, par analogie au temps de charge d'un condensateur ( $t = R.C$ ) la réponse d'un élément thermique peut être caractérisée par une constante de temps qui est le produit de la capacité thermique et de la résistance thermique.

Dans cette section nous avons introduit la notion de modèles multi-technologiques en rappelant les modèles de base électriques et en établissant une analogie électrique – mécanique et électrique – thermique.

Voyons maintenant quelques exemples de modélisation multi-technologique VHDL-AMS.

### 3. Exemples de modélisation multi-technologiques

Les exemples ci-dessous ont pour objectif de présenter des interactions de nature électriques et mécaniques dans le cadre d'un système de positionnement de siège d'une automobile, et des interactions électriques et thermiques présentes dans un transistor MOS soumis à auto-échauffement. Les modèles VHDL-AMS ont été réalisés en utilisant le traducteur compilateur BVHDLA de l'ENST-Paris et la simulation SPICE3F5 [R07].

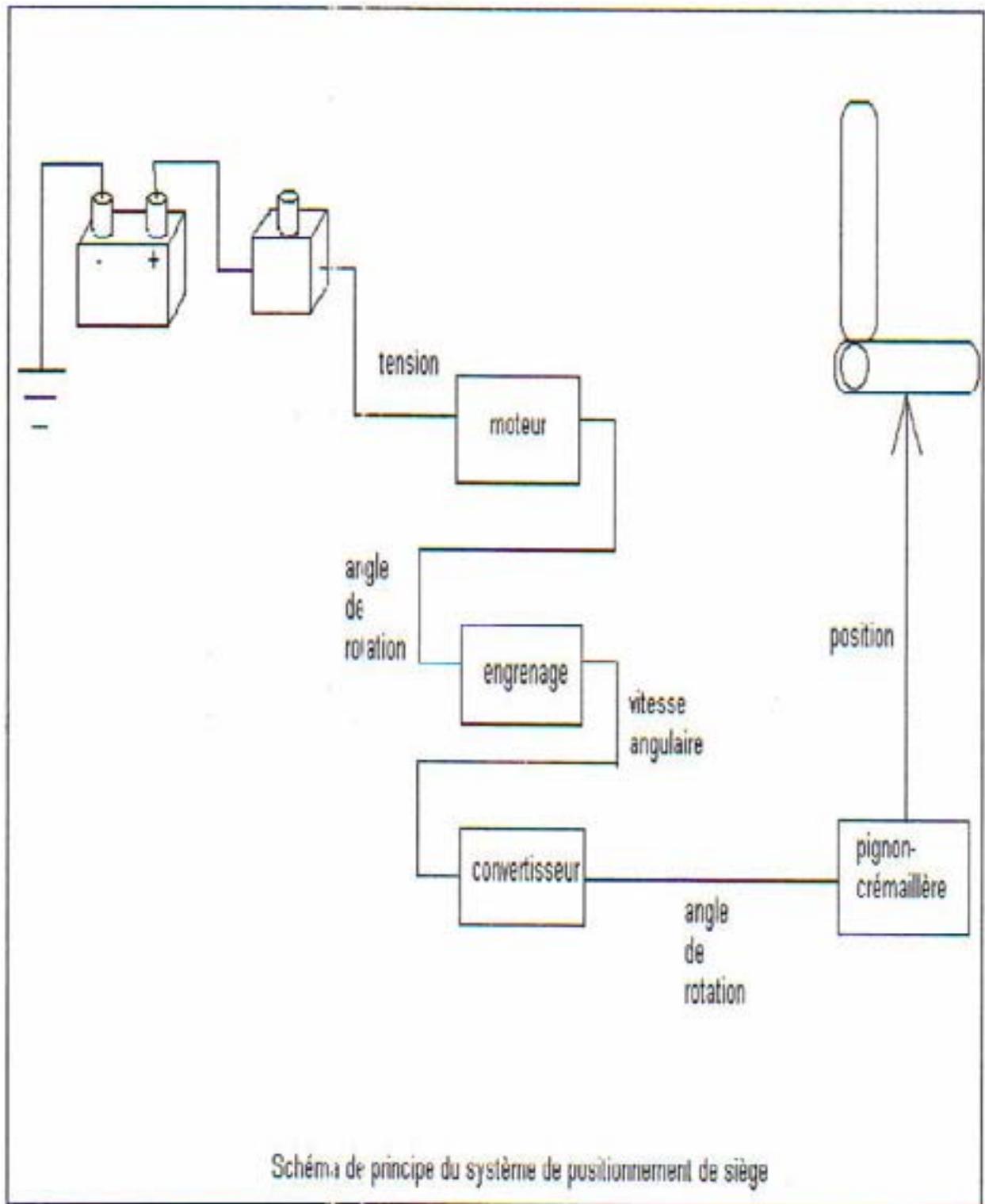
#### 3.1. Système de positionnement de siège

##### 3.1.1. Description

Ce système a pour but de faire varier la position en hauteur d'un siège par l'action sur une commande. Il se compose :

- d'un moteur électrique à courant continu pas - à - pas,
- d'un jeu d'engrenage,
- d'un convertisseur,
- et d'un ensemble pignon - crémaillère permettant de lever ou de descendre le siège.

Chacun de ces éléments peut être considéré comme un bloc fonctionnel disposant d'une entrée et d'une sortie mises en relation comme le montre la figure 1.1.22 de la page précédente.



*Fig. 1.1.22 : Schéma de principe du système de positionnement de siège.*

### 3.1.2. Modélisation et simulation des blocs fonctionnels

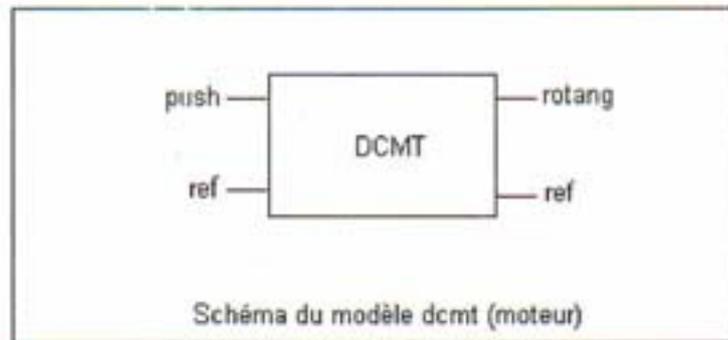
#### 1) Le moteur.

Ce bloc fonctionnel met en relation l'angle de rotation de l'arbre du moteur (sortie) avec une tension (entrée) par l'intermédiaire d'une fonction de transfert disposant que l'angle de rotation soit proportionnel à la puissance du moteur.

Il s'agit d'un moteur à courant continu, pas - à - pas, commandé par un bouton poussoir. Lorsque l'on appuie sur le bouton, la tension d'entrée permet à l'arbre du moteur d'imprimer un angle de rotation.

L'objectif recherché ici est de définir un coefficient de rotation (**krot**) permettant à l'arbre du moteur de faire un tour complet ( $2\pi$ ) sachant que l'angle de rotation (**rotang**) est, comme nous l'avons déjà dit, proportionnel à la puissance (avec une résistance du bobinage du moteur (**re**) de 1 ohm).

#### a. Schéma et code du Modèle VHDL-AMS du moteur.



*Fig. 1.1.23 : Schéma du modèle dcmt (moteur)*

Dans le schéma de la figure 1.1.23, l'entrée « push » matérialise le bouton poussoir sur lequel appuie l'utilisateur afin de faire tourner le moteur électrique.

```
library ieee, std ;
use work.math_real.all ;
--Déclaration d'une NATURE electrical dans un paquetage elec PACKAGE elec IS
subtype voltage IS real ;
subtype current IS real ; NATURE electrical IS
voltage across
current through ;
END elec ;
use work.elec.all ;
```

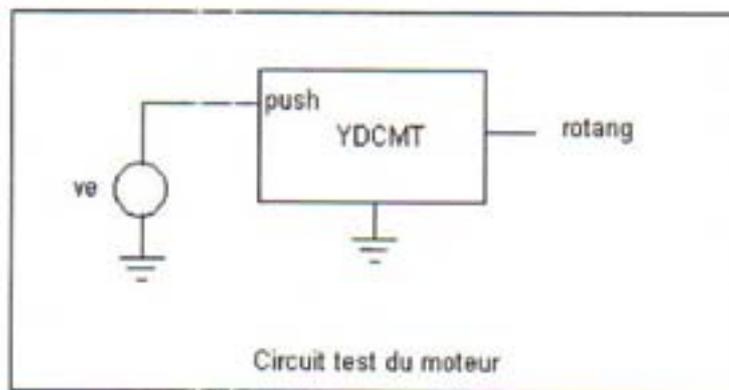
```

ENTITY dcmt IS
GENERIC( re:real:= 1.0; krot:real:= 0.0436361);
PORT( TERMINAL push, gnd : electrical ;
QUANTITY rotant; : OUT real) ;
END dcmt;

ARCHITECTURE a OF dcmt IS
QUANTITY ve across ie through push to gnd
BEGIN
ie = ve / re ;
rotang == krot * ie * ie * rc ;
END a;

```

### b. Schéma et code SPICE [R15] du Circuit test du moteur



*Fig. 1.1.24 : Schéma du circuit test du moteur.*

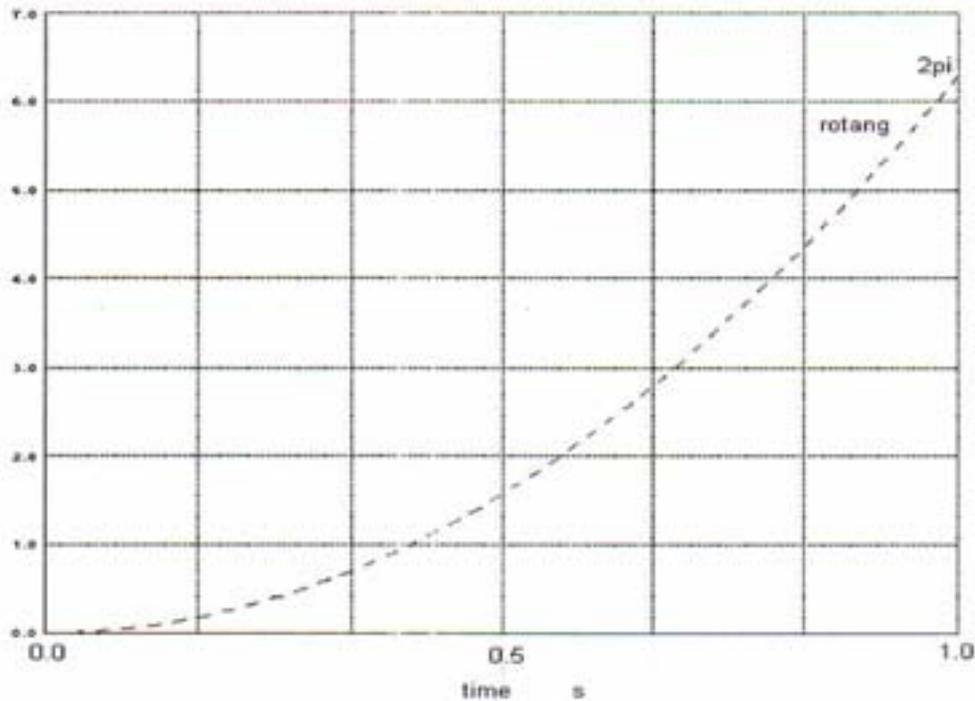
Dans le schéma de la figure 1.1.24, une tension est appliquée à la borne « push ».

```

*Fichier test dcmt.cir
ve push 0 de 0.0 pwl(0.0 0.0 1.0 12.0)
YDCMT push 0 rotang 0 moddcmt .model moddcmt dcmt.dcmt
*dc ve 0.0 12.0
.tran0.01 1.0
.end

```

### c. Résultat de simulation du moteur.



*Fig. 1.1.25 : Résultat de simulation du moteur.*

La courbe de simulation de la figure 1.1.25 montre la rotation angulaire (rotang) de l'arbre du moteur qui entraînera l'engrenage.

### 2) L'engrenage

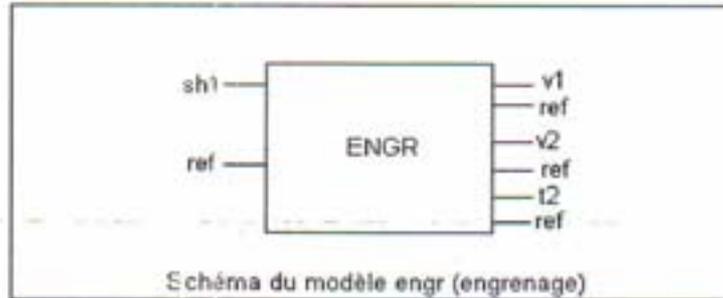
Ce modèle se compose de deux pignons de diamètres différents. La vitesse angulaire de l'axe du second pignon est égale à celle de l'axe du premier pignon (le pignon moteur) multiplié par un coefficient ( $gr$ ) proportionnel aux diamètres des pignons.

La vitesse angulaire ( $v1$ ) de l'axe du premier pignon est la dérivée de l'angle de rotation de l'arbre du moteur.

Le bloc fonctionnel engrenage met donc en relation une vitesse angulaire (sortie -  $v2$ ) avec une angle de rotation (entrée).

Dans ce modèle, on montre aussi que le couple de l'axe du pignon de sortie ( $t2$ ) est l'opposé de celui du pignon moteur multiplié par le ratio ( $gr$ ), étant supposé que la puissance soit conservée et que le coefficient de torsion ( $cr$ ) soit donc égal à 1 (couple = vitesse angulaire \* coefficient de torsion).

### a. Schéma et code VHDL-AMS du Modèle de l'engrenage



*Fig. 1.1.26 : Schéma du modèle engrenage.*

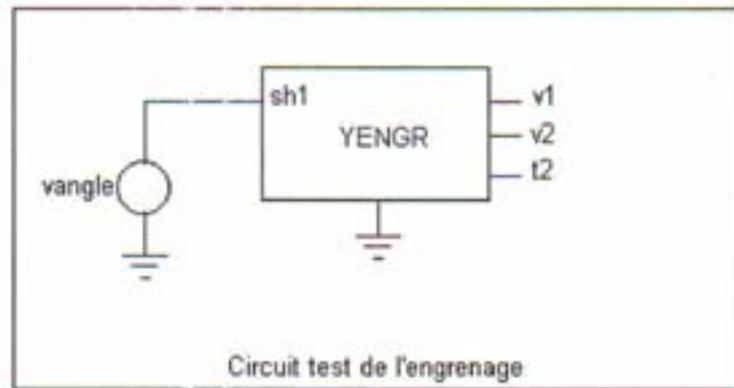
La figure 1.1.26 représentant l'engrenage, montre l'entrée (Sh1) qui est en fait la rotation de l'arbre du moteur et les sorties (v1), (v2) et (t2) correspondant respectivement à la vitesse angulaire du pignon d'entrée, la vitesse angulaire du pignon de sortie et le couple de l'axe de pignon de sortie.

```

library ieee, std ;
use work.math_real.all ;
--Déclaration d'une NATURE mechanical2 (mécanique rotative) dans un paquetage rotm.
PACKAGE rotm IS
subtype vangle IS real ;
subtype torque IS real ; NATURE mechanical2 IS
vangle across
torque through ;
END rotm ;
use work.mechanical2.all ;
ENTITY engr IS
GENERIC(      gr : real := 2.0 ; cr : real := 1.0).
PORT( TERMINAL sh1, nf : mechanical2 ;
QUANTITY v1 : OUT real ;
QUANTITY v2 : OUT real ;
QUANTITY t2: OUI real);
END engr ;
ARCHITECTURE a OF engr IS
QUANTITY vel1, vel2, toi 2 : real ;
QUANTITY angsh1 across tor1 through sh1 to ref;
BEGIN
vel1 == angsh1'Dot ;
ve!2 == vel1 * gr ;
tor1 == cr * vel1 ; tor2==(-tor1)/gr;
v1 == vel1 ;
- - v2 == vel2 ;
t2 == tor2 ;
END a;

```

## b. Schéma et code SPICE du circuit test de l'engrenage

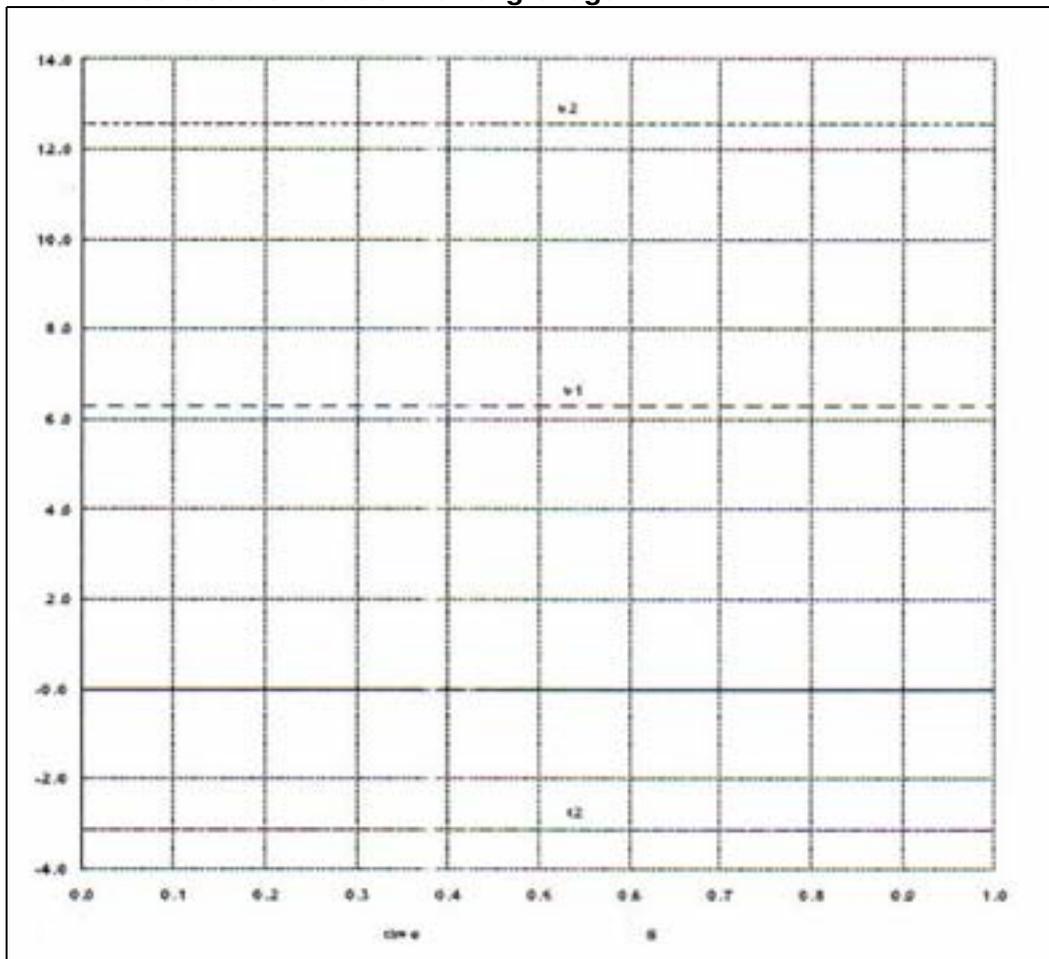


*Fig. 1.1.27 : Schéma du circuit test de l'engrenage.*

Dans la figure 1.1.27 correspondant au schéma du circuit test de l'engrenage, l'angle de l'arbre moteur correspond à une tension appliquée à la borne d'entrée (Sh1), qui se transforme en des tensions de sorties (v1), (v2) et (t2)... respectivement, les vitesses angulaires des pignons de l'engrenage et le couple du pignon de sortie.

```
*enr.cir
vangle sh1 0 de 0.0 pw1( 0.0 0.0 1.0 6.28)
YENGR sh1 0 v1 0 v2 0t2 0 mode igi
.model modenr enr.enr
+ gr = 2
+ cr= 1
.tran 0.01 1.0
.end
```

### c. Résultat de simulation de l'engrenage



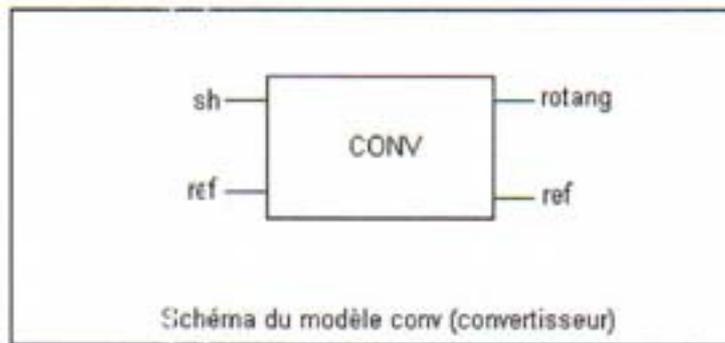
*Fig. 1.1.28 : Résultat de simulation de l'engrenage.*

Les droites de la figure 1.1.28 montrent de bas en haut, le couple de l'axe du pignon de sortie ( $t_2$ ) qui est proportionnel mais de signe contraire au couple de l'arbre du moteur et les vitesses angulaires du pignon d'entrée ( $v_1$ ) et du pignon de sortie ( $v_2$ ).

### 3) Le convertisseur

Ce modèle est utilisé comme interface entre l'engrenage et l'ensemble pignon - crémaillère. Il prend la vitesse angulaire du bloc fonctionnel engrenage et la convertit en accroissement de l'angle de rotation du pignon associé à la crémaillère.

### a. Schéma et code VHDL-AMS du Modèle du convertisseur

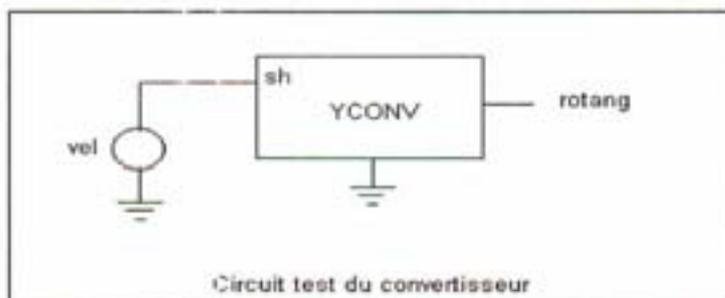


*Fig. 1.1.29 : Schéma du modèle de convertisseur.*

La figure 1.1.29 présente le schéma de principe du convertisseur qui n'est autre qu'une interface entre les engrenages et l'ensemble pignon et crémaillère. L'angle de rotation de l'axe du pignon de sortie à l'entrée (Sh) du convertisseur se transforme en sortie en un angle de rotation du pignon de l'ensemble pignon – crémaillère.

```
library ieee, std ;
use work.math_real.all ;
use work.mechanical2.all ;
ENTITY conv IS
GENERIC( conv : real := 0.005 ) ;
PORT( TERMINAL sh2 , ref : mechanical2 ;
QUANTITY rotang : OUT real ) ;
END conv ;
ARCHITECTURE a OF conv IS
QUANTITY vel across angle through sh2 to ref ;
BEGIN
angle == conv * vel ;
rotang == angle ;
END a ;
```

### b. Schéma et code SPICE du circuit test du convertisseur

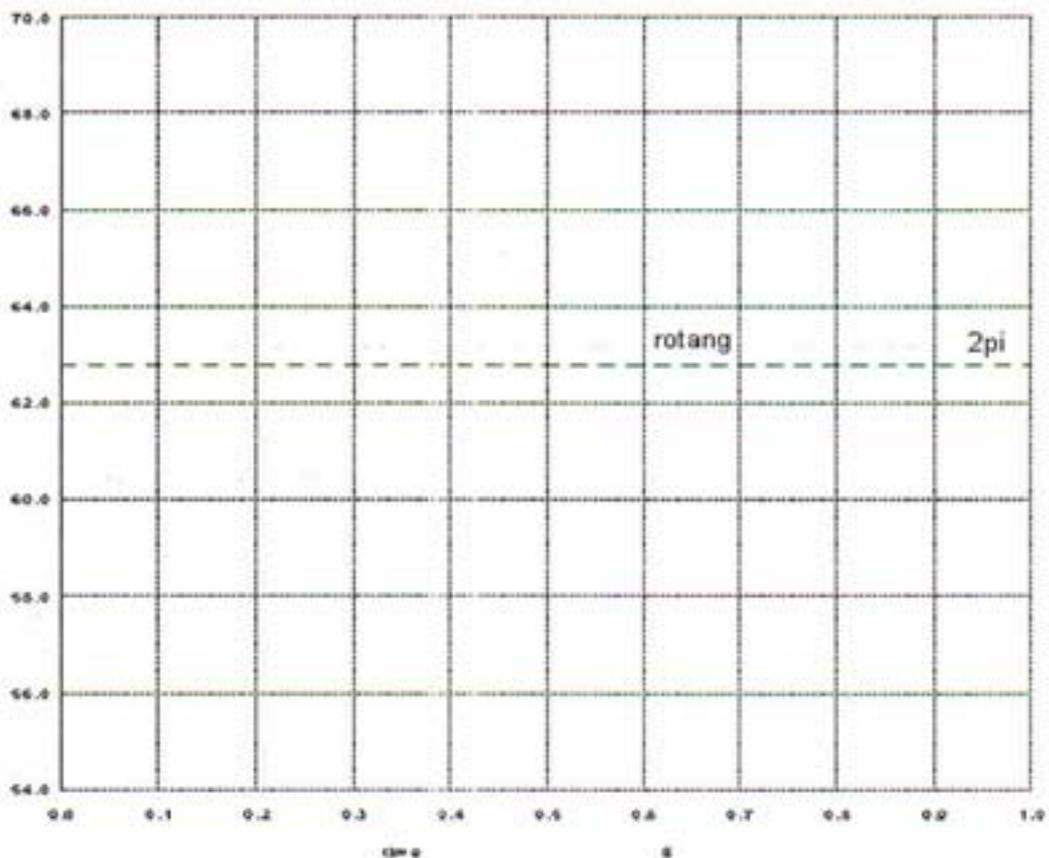


*Fig. 1.1.30 : Schéma du circuit test du convertisseur.*

Dans la figure 1.1.30, une tension (vel) appliquée à la borne d'entrée (sh) se transforme en une tension de sortie représentant l'angle de rotation (rotang).

```
*conv.cir
vel sh 0 de 12.56
YCONV sh 0 rotang 0 modconv
.model mdconv CONV.conv
+ conv = 0.05
.tran 0.01 1.0
.end
```

### c. Résultat de simulation du convertisseur.



*Fig. 1.1.31 : Résultat de simulation du convertisseur.*

La droite (rotang) de la figure 1.1.31, montre que le modèle de convertisseur n'utilise qu'une fonction de transfert de la forme  $y = a \cdot x$  (soit une droite).

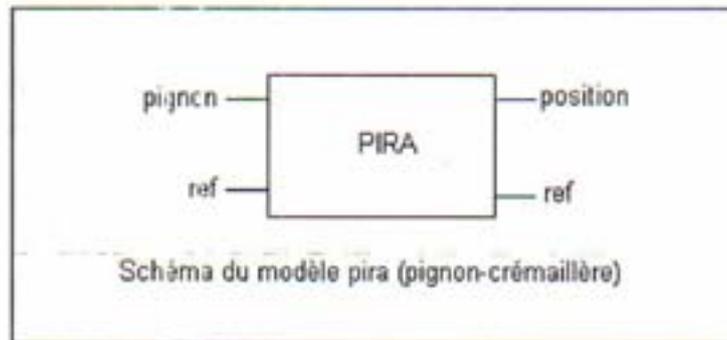
#### 4) L'ensemble pignon – crémaillère

Cet ensemble agit comme un convertisseur rotationnel / translationnel avec une relation entre la position de la crémaillère et l'angle de rotation du pignon.

La position de la crémaillère est donc fonction du rayon du pignon et de son angle de rotation.

Dans le modèle proposé, on considère un amortissement de la position de 90% de la position maximale.

##### a. Schéma et code VHDL-AMS du modèle de l'ensemble pignon – crémaillère



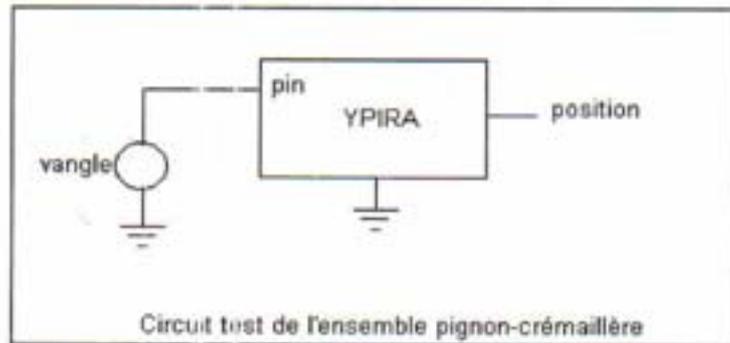
*Fig. 1.1.32 : Schéma du modèle pignon crémaillère.*

Le modèle présenté dans la figure 1.1.32 a à son entrée l'angle de rotation du pignon et à sa sortie la position sur la crémaillère. Ce modèle se présente comme un convertisseur rotationnel / translationnel.

```
library ieee, std ;
use work.math_real.all ;
use work.mechanical2.all ;
ENTITY pira IS
GENERIC(radius : real := 0.5 ; posmax : real := 0.7 ; posmin : real := 0.2 ; tau: real := 0.01);
PORT( TERMINAL pinion, ref : mechanical!2 ;
QUANTITY position : OUT real) ;
END pira ;

ARCHITECTURE a OF pira IS
QUANTITY apos : real ;
QUANTITY piangle across pos through pinion to ref;
BEGIN
apos == radius * piangle
IF (apos < posmin) USE
pos = posmin ;
ELSIF (apos > 0.9*posmax) USE
pos == 0.9*posmax + 0.1*posmax * (1.0 - exp((0.9*posmax - apos)/tau)) ;
ELSE
pos == apos ;
END USE ;
position == pos ;
END a;
```

**b. Schéma et code SPICE du circuit test de l'ensemble pignon - crémaillère**

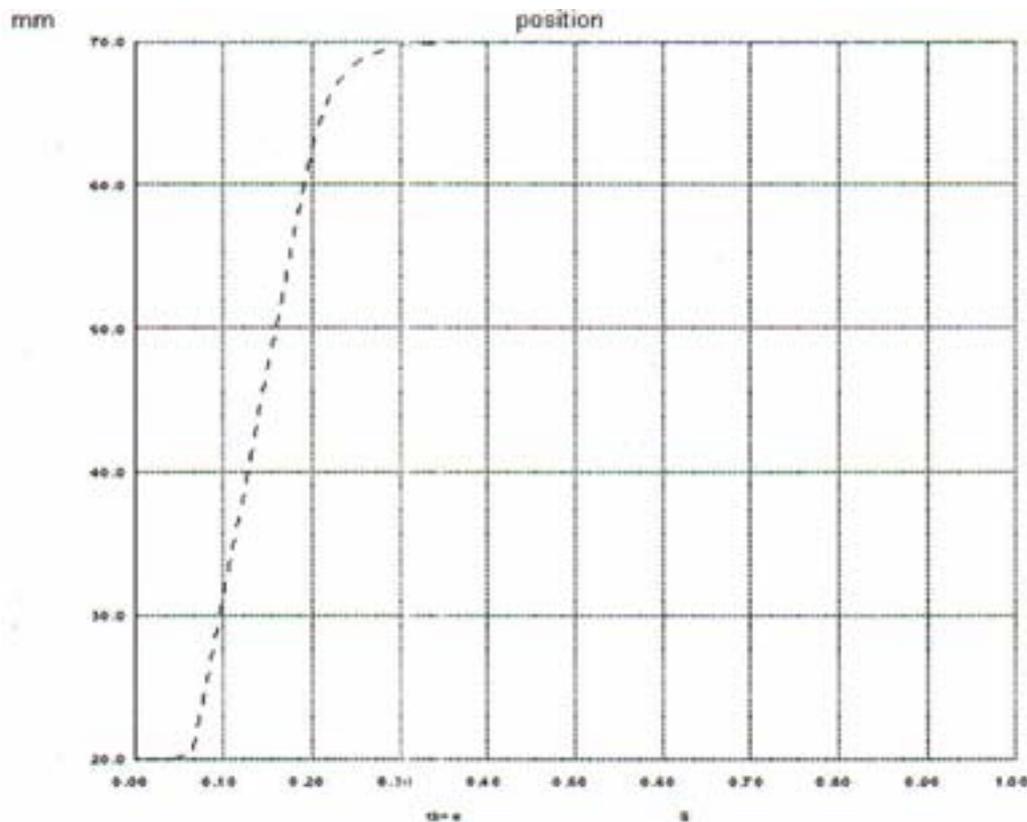


*Fig. 1.1.33 : Schéma du circuit test pignon crémaillère.*

Dans la figure 1.1.33, la tension d'entrée appliquée à la borne (pin) correspond à l'angle de rotation du pignon de l'ensemble pignon – crémaillère, et se transforme en une tension de sortie correspondant à la position du siège.

```
*pira.cir
vangle pin 0 de 0.0 pwl( 0.0 0.0 1.0 6.28)
YPIRA pin 0 position 0 modpira
.model modpira pira.pira
+ radius = 0.5
+ posmax = 0.7
+ posmin = 0.2
+ tau = 0.01
.tran 0.01 1.0
.end
```

**c. Résultat de simulation de l'ensemble pignon - crémaillère.**



*Fig. 1.1.34 : Résultat de simulation de l'ensemble pignon crémaillère.*

La courbe de la figure 1.1.34 montre l'élévation du siège, mais aussi un certain amortissement lorsque celui-ci arrive en fin de course (où de la course désirée par l'utilisateur).

Cet exemple de modélisation nous a permis de montrer la capacité du VHDL-AMS de décrire le comportement d'un système électromécanique (faisant interagir les domaines de l'électricité, de la mécanique linéaire et de la mécanique rotative).

D'autres interactions de domaines technologiques différents peuvent aussi être décrits. C'est ce que nous proposons de voir dans ce qui suit avec le cas de l'auto-échauffement dans un transistor MOS faisant interagir des phénomènes électriques et thermiques.

## 3.2. Transistor MOS soumis à auto-échauffement

### 3.2.1. Description

Cette application propose la combinaison des effets électriques et thermiques par l'introduction d'une résistance thermique ( $r_{th0}$ ) entre la zone active et le substrat d'un transistor MOS. Dans le modèle (**moec**) suivant, des équations simplifiées ont été utilisées.

L'effet de l'auto-échauffement peut se traduire au niveau de la tension de seuil ( $v_{th}$ ) par l'expression suivante :

$$v_{th} = v_{th0} (1 + (a \cdot \text{tempe})) \quad (48)$$

Et au niveau du facteur de conduction ( $k_{th}$ ) par :

$$k_{th} = k_{th0} (1 - (b \cdot \text{tempe})) \quad (49)$$

Avec (**tempe**) la variation de température, fonction de la puissance dissipée par le transistor MOS et de la résistance thermique ( $r_{th0}$ ) :

$$\text{tempe} = r_{th0} \cdot v_{ds} \cdot i_{ds} \quad (50)$$

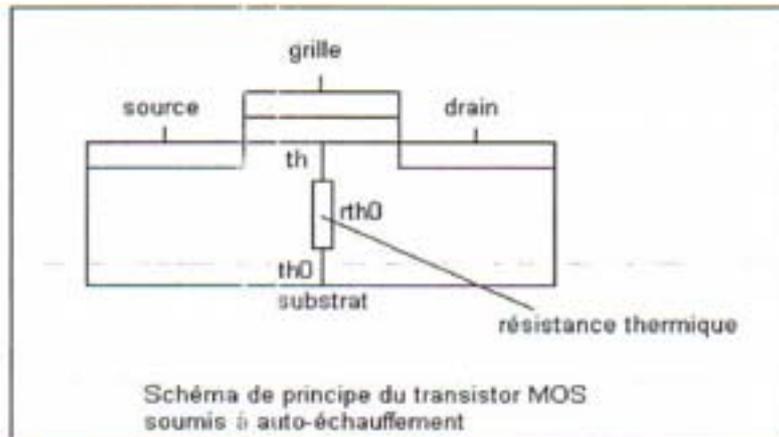
Où ( $v_{ds}$ ) et ( $i_{ds}$ ) représentent respectivement la tension et le courant entre le drain et la source). Il est important de remarquer ici que les équations contenant la température sont implicites.

Les interactions électrothermiques sont donc traduites dans cette application, au niveau de la résistance thermique ( $r_{th0}$ ), de la tension de seuil ( $v_{th}$ ) et du facteur de conductance ( $k_{th}$ ) comme le montre la figure 1.1.35 de la page suivante.

Les tensions électriques sont appliquées aux nœuds électriques que sont le drain (**dx**), la grille (**ga**), la source (**so**) et le substrat (**bu**).

La différence de température locale due à l'auto-échauffement est quant à elle, mesurée sur le nœud de sortie (**th**).

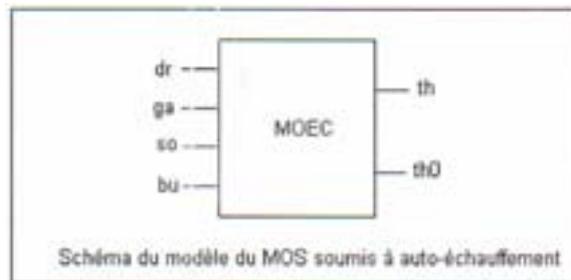
Le courant de drain est représenté par des équations semblables à celles du modèle de transistor MOS de niveau 1 de SPICE3F5 (MOS1).



*Fig. 1.1.35 : Schéma de principe du transistor MOS soumis à auto-échauffement.*

### 3.2.2. Modélisation et simulation

#### 1) Schéma et code VHDL-AMS du Modèle de transistor MOS soumis à auto-échauffement



*Fig. 1.1.36 : Schéma du modèle MOS soumis à auto-échauffement.*

Les entrées présentées dans la figures 1.1.36 correspondent au drain (dr), à la grille (gr), à la source (so) et au substrat (bu), qui est en outre la référence. Les sorties sont la température (th) de l'auto-échauffement par rapport à la référence (th0)

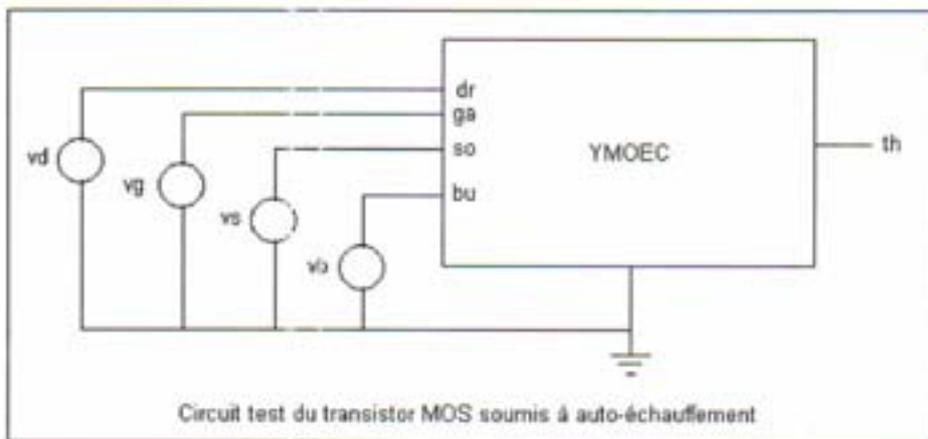
```

library ieee, std ;
ENTITY moec IS
GENERIC(rth0 : real := 0.5 ; vt : real := 0.7 ; kth0 : real := 0.3
-- résistance thermique
-- tension de seuil
-- facteur de conductance lambda : real := 1.0 e-2) ;
-- modulation de la longueur de canal
PORT( TERMINAL dr, ga, so, bu : electrical ;
QUANTITY th: OUT real);
END moec ;

ARCHITECTURE a OF moec IS
QUANTITY tempe, vth, kth : real ;
QUANTITY vds across ids through dr to so ;
QUANTITY vgs across ga to so ;
BEGIN
tempe == rth0 * vds * ids ;
vth = vt * (1.0 + 0.01 * tempe) ;
kth = kth0 * (1.0 - 0.02 * tempe) ;
IF (vgs <= vth) USE ids = 0.0;
ELSIF (vds <= vgs - vth) USE
ids == kth * vds * (vgs - vth - 0.5*vds) * (1.0 + lambda * vds) ;
ELSE
ids == 0.5*kth0 * (vgs - vth) * (vgs - vth) * (1.0 + lambda * vds);
END USE ;
th == tempe ;
END a;

```

## 2) Schéma et code SPICE du circuit test du transistor MOS soumis à auto-échauffement



*Fig. 1.1.37 : Schéma du circuit test du transistor MOS soumis à auto-échauffement.*

Dans la figure 1.1.37, les tensions appliquées en entrées permettent le calcul du courant de drain et donc de la température résultant de l'auto-échauffement (th).

```

*Transistor MOS soumis à auto-échauffement (moec.cir)
YMOEC
+ dr ga so bu
+ th th0
+ modmoec
.model modmoec moec.moec
+ rth0 = 0.5
+ vt = 0.7
+ kth0 = 0.3
.dc vd 0 10 0.01
.end

```

### 3) Résultats de simulation :

#### a. auto-échauffement (variation de la température)

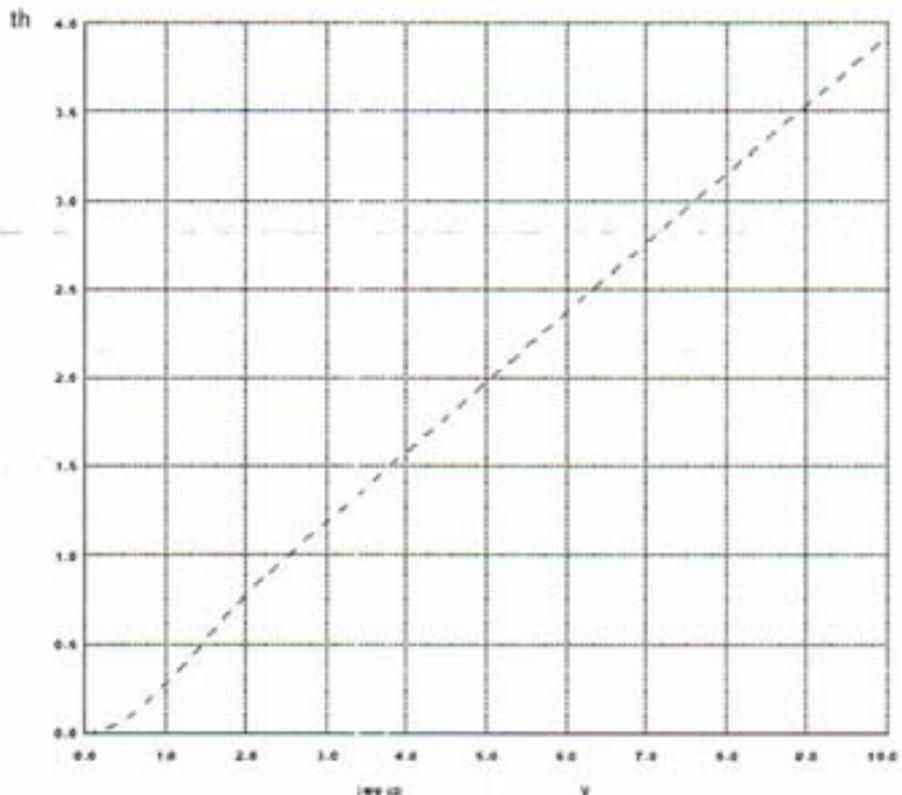
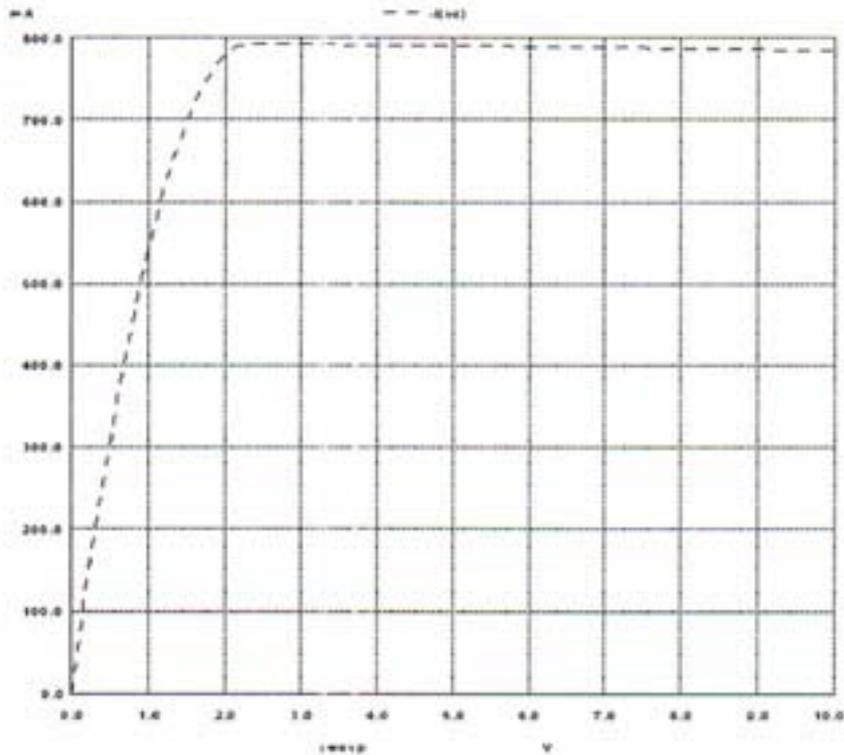


Fig. 1.1.38 : Résultat de simulation (auto-échauffement).

La figure 1.1.38 montre la variation de la température due à l'auto-échauffement en fonction du courant de drain.

**b. Un effet de l'auto-échauffement : la diminution du courant de saturation**



*Fig. 1.1.39 : Résultat de simulation (diminution du courant de saturation).*

La courbe de la figure 1.1.39 montre la corrélation qui existe entre l'auto-échauffement et la diminution de courant de saturation.

Nous venons d'établir l'analogie à l'électricité des domaines mécaniques et thermiques. Voyons maintenant comment la logistique de la modélisation peut utiliser cette analogie. C'est l'objectif que se fixe le chapitre suivant.

## CHAPITRE 2 : LA MODELISATION COMME OUTIL DE SPECIFICATION ET DE LUTTE CONTRE L'OBSOLESCENCE

Spécifier un système complexe revient à exprimer d'une manière exhaustive le comportement du système dans son environnement. Spécification et modélisation sont donc fortement liées dans la démarche de la logique de la modélisation.

Cette démarche distingue deux types de spécification:

- La spécification fonctionnelle qui permet de fixer les objectifs à atteindre en terme de performances et de coûts. C'est une vue d'ensemble de la mission et des fonctions du système à réaliser. C'est une description de haut niveau.
- La spécification technique qui est de plus bas niveau. Les choix de technologies de réalisation sont ici pris en compte. Ces choix sont très critiques car ils peuvent conduire à l'obsolescence des composants et des technologies [R06] dès la mise en service du système de par la longueur des délais entre la spécification et la réalisation.

Les contraintes économiques et celles liées à l'obsolescence des composants de par la fuite en avant des technologies, imposent de nouvelles méthodes de conception faisant appel à la modélisation et à la simulation.

En effet, afin de limiter les coûts de conception, il devient impératif de prévoir le comportement du système dès sa phase de spécification fonctionnelle.

En outre, l'évolution des technologies montre la nécessité d'élever le niveau des spécifications techniques afin de retarder les choix technologiques pour la réalisation du système et de pérenniser la fonction. Il devient donc impératif de réagir en terme de « fonction » et non plus en terme de « composant ».

### 1. L'approche « mécatronique »

La mécatronique regroupe l'ingénierie mécanique, électrique, électronique, l'automatique et l'informatique pour la conception, la réalisation et (nous le verrons plus tard) la maintenance de systèmes de plus en plus complexes [R14].

Face à cette complexité croissante, il en ressort que les ingénieurs et techniciens ont besoin d'adopter une stratégie d'intégration des ces ingénieries. Le terme de mécatronique est donc ici utilisé pour décrire ce processus d'intégration en offrant la possibilité de communiquer et de dialoguer entre les experts des différents métiers.

L'ingénierie des systèmes multi-technologiques est un processus itératif, long et compliqué, pour ne pas dire complexe.

L'approche « mécatronique » propose une méthode de conception prenant en compte les étapes suivantes :

- **L'analyse du besoin client - utilisateur**

Elle doit conduire à la mise en évidence des potentiels de performance du système.

- **La spécification.**

Il s'agit de traduire le besoin utilisateur en terme de réponse du système à sa mission et ce d'une manière structurée et non ambiguë. La première étape de spécification passe par l'identification des fonctions du système et des contraintes qui lui sont associées.

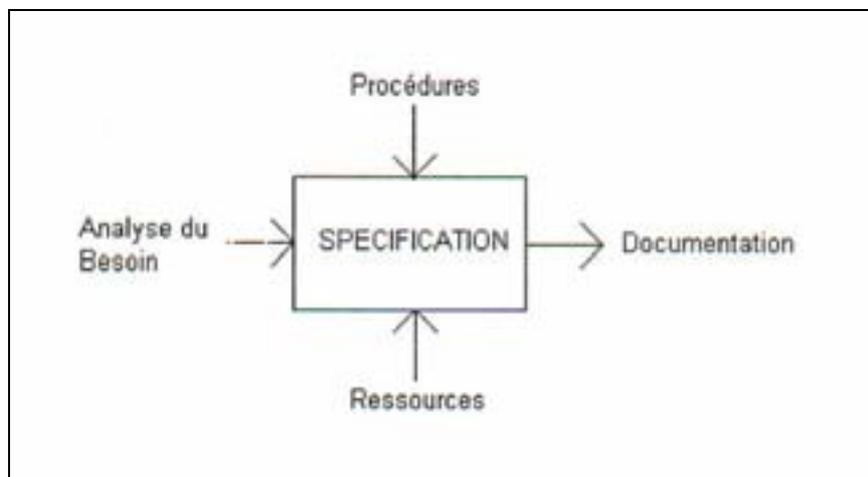
Nous verrons que si les spécifications sont d'une certaine façon simulables, elles permettent de générer l'ensemble des solutions possibles et de choisir la solution la plus convenable, ce qui a un réel impact sur les coûts de conception !

- **La documentation.**

Les spécifications permettent de guider la conception des documentations nécessaires à la fabrication des éléments du système, à leur intégration mais aussi à la compréhension du fonctionnement du système, son exploitation, sa maintenance et son évolution...

**La spécification est donc le point critique qui conditionne la réponse du système au besoin de l'utilisateur.**

D'une manière fonctionnelle, on peut représenter le processus de spécification de la manière suivante (figure 1.2.1). En entrée du bloc-diagramme, est effectuée une analyse du besoin. La sortie de la boîte noire spécification est la documentation élaborée à partir de l'analyse du besoin, des procédures et méthodes propres aux technologies et aux ressources mis en œuvre.



*Fig. 1.2.1 : Bloc-diagramme « Spécification » de l'approche « mécatronique ».*

Nous connaissons les entrées et sorties de la « boîte noire » SPECIFICATION, à savoir l'analyse du besoin et les différentes documentations nécessaires à la réalisation, la compréhension et le maintien en condition opérationnelle du système. Reste à définir ce que sont les procédures et les ressources permettant au processus de spécification d'assurer sa mission.

D'une façon simplifiée, on peut définir les procédures comme le langage et la méthode nécessaires à la spécification, et les ressources, comme les outils (informatiques) permettant l'emploi de ces procédures.

Dans l'approche « mécatronique », l'objectif est de réaliser des spécifications structurées, non ambiguës, c'est-à-dire compréhensibles par le plus grand nombre d'intervenants de l'ingénierie système, et simulables.

Nous allons donc dans ce qui suit, tenter de faire le point sur l'ensemble des procédures et des ressources pouvant permettre la spécification de systèmes afin de sélectionner celles qui, à notre sens, remplissent le mieux cette mission.

Le langage naturel ne suffit plus à décrire des systèmes de plus en plus complexes. Il porte en effet souvent à ambiguïté et manque de structuration. En outre, les spécifications textuelles ne sont pas simulables.

Le formalisme mathématique a l'avantage d'être prouvable mais il est mal adapté à l'utilisateur.

Les méthodes générales de conception (SADT, SART, FAST ... par exemple) sont intéressantes sur le plan « méthodologique » mais n'offrent pas suffisamment d'outils de développement.

Les langages « flot de données » manquent quant à eux de niveaux d'abstraction et ne sont pas adaptés à la conception de la documentation. Il en est de même pour les langages de programmation.

Reste les langages de description « matériel » ; certains disposent d'un niveau d'abstraction trop faible, tel que le VHDL par exemple, en se limitant au domaine numérique.

En revanche, le langage VHDL-AMS permet d'atteindre un haut niveau d'abstraction suffisant et est bien adapté à la spécification fonctionnelle et technique.

Il en ressort que le caractère simulable de la spécification permet de concrétiser le comportement et les échanges effectués par le système dès les premières phases de la conception.

La simulation des spécifications permet en outre de prendre en compte de nombreux paramètres que l'esprit humain peut difficilement cumuler.

### **1.1. Les spécification graphiques simulables**

Exhaustivité, non ambiguïté, lisibilité... font que les spécifications textuelles cèdent le pas aux spécifications graphiques [R16].

En effet, ces dernières permettent de réduire de manière importante le volume des documentations écrites, et ce, sans perte de contenu.

En outre, ces spécifications facilitent grandement la compréhension des systèmes complexes en abaissant la barrière du vocabulaire technique des différents métiers de la conception. Elles deviennent un outil de communication entre ces différents métiers et offrent une plus grande lisibilité.

Les spécifications graphiques peuvent ainsi servir de support à la documentation en vue de la formation, et à la maintenance et en fournissant, par exemple, une aide à l'identification rapide des pannes (diagnostic).

Enfin, la simulation appliquée à des spécifications graphiques permet d'évaluer le fonctionnement global d'un système sans se préoccuper de l'aspect « technologie de réalisation ».

Les spécifications graphiques facilitent donc grandement la prise en compte rapide des aspects de sécurité de fonctionnement et de testabilité des systèmes dès le début de la conception.

L'industrie aéronautique a apporté un certain formalisme aux spécifications graphiques [R08].

Aérospatiale utilise par exemple le formalisme SAO (Spécification Assistée par Ordinateur) qui est devenu partie intégrante de la culture de l'entreprise.

Dassault Aviation s'est intéressé à l'utilisation de la Représentation Schématique Fonctionnelle Assistée par Ordinateur des systèmes (RSFAO).

La RSFAO s'inspire du langage SAO et est utilisée à des fins de documentation, de mise au point, de maintenance des systèmes multi-technologiques (matériel et logiciel) embarqués.

Cette approche s'avère en outre un excellent outil de support à la formation des systèmes complexes.

En plus du gain en terme de lisibilité et de non ambiguïté des méthodes SAO et RSFAO, ces dernières offrent la possibilité de simuler le comportement des systèmes dès la phase de spécification.

### **1.1.1. SAO (Spécification Assistée par Ordinateur)**

A l'origine, dans les années 1980, la SAO d'Aérospatiale est un langage de type schéma bloc adapté à l'aéronautique, sensé répondre au problème d'asservissement des aides au pilotage [R16].

Ce langage d'origine présente donc deux caractéristiques principales :

- c'est un langage graphique ;
- c'est un langage orienté « métier ».

Il faut ajouter que ce n'est pas un langage informatique ; par conséquent, les représentations SAO (ou planches) ne sont pas explicitement complètes. En effet, une part non négligeable des informations est liée au contexte du métier et est donc implicite. L'expression de la spécification est donc grandement simplifiée.

L'avènement de l'informatique embarquée avec les programmes Airbus A310 et A320 a entraîné une évolution du langage vers une plus grande rigueur dans l'expression et vers la normalisation de la bibliothèque de composants SAO (éléments du langage).

Enfin SAO+ est une évolution de SAO s'appuyant sur le langage LUSTRE. Ce langage est toujours adapté à des concepteurs non informaticiens en ce sens qu'il reste simple et qu'il permet de masquer les contraintes purement informatiques par des concepts de plus haut niveau d'abstraction.

## **1) Notions de planches SAO**

La planche SAO (au format A4) est l'élément de base de la spécification SAO.  
C'est un ensemble type et syntaxiquement correct de symboles, de liaisons et de connexions.

La planche SAO possède deux parties distinctes ;

- le contenu fonctionnel est l'ensemble des symboles, liaisons et connexions représentant la spécification fonctionnelle effective ;
- le Cartouche identifiant la planche dont la nomenclature répond à un découpage en Livre / Chapitre / Planche fait par le concepteur.

Des outils graphiques permettent de saisir les planches en permettant d'avoir plusieurs versions d'un même système pour satisfaire à des impératifs de développement et de commercialisation.

La page suivante présente un exemple de planche SAO

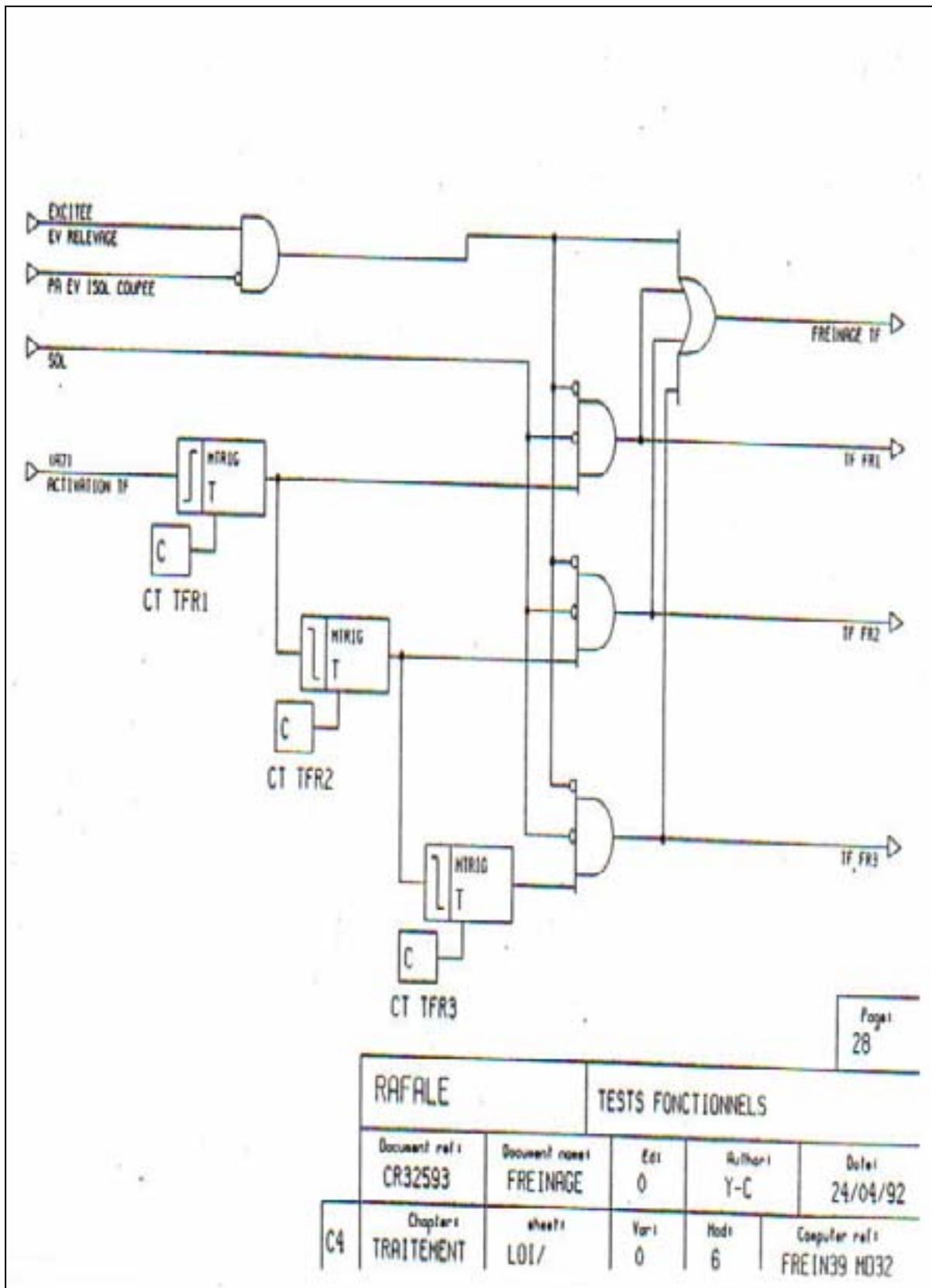


Fig. 1.2.2 : Exemple de planche SAO

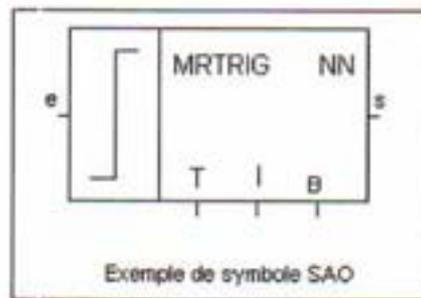
## 2) Symboles

Les symboles (composants ou éléments du langage) SAO sont regroupés au sein d'une bibliothèque. Ils sont classés en domaines :

- les liaisons avec le monde extérieur (à la planche),
- les symboles logiques,
- les fonctions de transfert.

Chaque symbole représente une fonction décrite par un algorithme s'apparentant à une description comportementale.

Les bornes des symboles sont typées (analogiques / logiques) et définies en bibliothèque comme étant obligatoires et reliées (entrées / sorties) ou facultatives et non reliées (paramètres) (figure 1.2.3).



*Fig. 1.2.3 : Exemple de symbole SAO.*

### 1.1.2. RSFAO (Représentation Schématique Fonctionnelle Assistée par Ordinateur)

L'origine du concept RSFAO était la réalisation d'une documentation schématique des systèmes plates-formes avion RAFALE, véritable mémoire technique, qui devait permettre la mise en œuvre de la maintenance intégrée de l'avion et la formation du personnel.

#### 1) Notion de planches RSFAO

Une planche RSFAO est l'élément de base de la spécification [R16].

Au format A2 ou A3, elle représente la connexion de plusieurs planches SAO visant à réaliser une fonction partielle ou complète d'un calculateur ou d'un système quelconque.

Une planche SAO est donc considérée comme un macro composant ayant les mêmes caractéristiques qu'un composant élémentaire avec ses entrées, ses sorties, ses paramètres...

Le principe d'élaboration d'une planche RSFAO et un exemple de planche sont représentés dans les pages suivantes.

Une planche RSFAO intègre sans distinction le logiciel et le matériel avec des éléments graphiques semblables.

Les parties matérielles concernent les entrées et sorties du système (contacteur, relais, fusibles, voyants, Fiches d'Interface Analogique - FIA, ...) et permettent de suivre l'information du capteur à l'actionneur. Les planches conservent les numéros de brochage de la liasse avion ce qui permet de visualiser rapidement les bornes physiques des équipements.

Les informations numériques issues des Fiches d'Interface Numérique (FIN) permettent de connaître l'état interne des flots de données du système. Associées à la maintenance, ces informations permettent de visualiser rapidement la provenance d'une panne survenue sur un avion. Enfin des informations du Compte Rendu de Maintenance (CRM) aident à la maintenance après vol.

## **2) Symboles**

Les macro composants SAO constituent les modules fonctionnels donnant l'ensemble des principes de fonctionnement des systèmes, qu'ils soient matériel ou logiciel.

Les composants externes sont tous les éléments se trouvant après les connecteurs d'entrée et de sortie du système. Ils ont pour objectif de permettre le suivi de l'information et de fournir toutes les indications nécessaires au personnel intervenant sur l'avion, tels que le numéro des connecteurs, des fusibles...

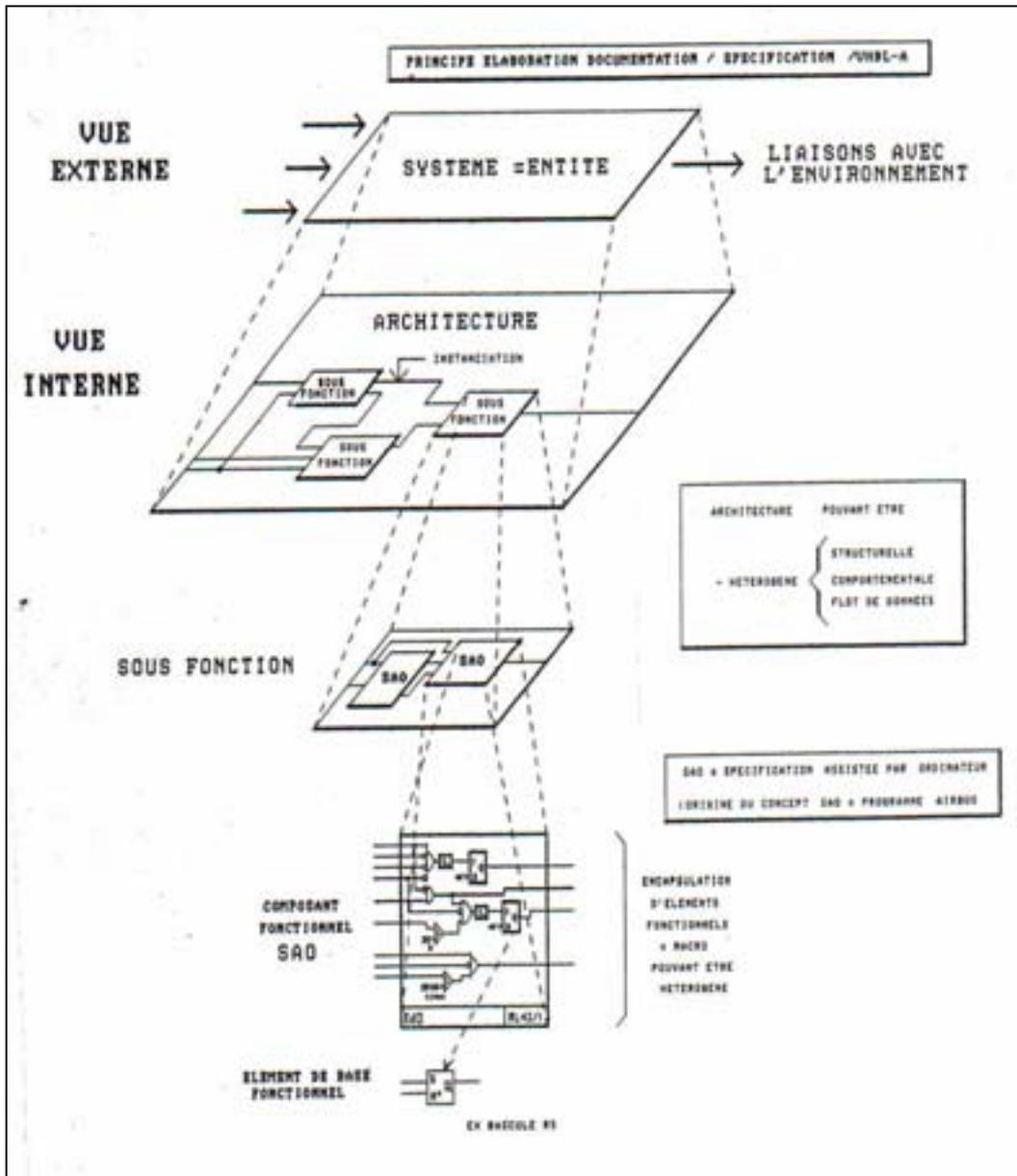
Les informations bus (FIN), les informations CRM et MCS (Maintenance Complémentaire Sol) sont nécessaires à la maintenance.

Les liaisons réalisent les interconnexions entre les planches.

Les connecteurs sont les bornes du système qui permettent d'accéder aux informations physiques.

Les interfaces E/S (FIA) constituent le raccord physique entre l'information fonctionnelle et l'information réelle. Ces interfaces donnent des indications pour se connecter au système avec un appareil de mesure quelconque.

La RSFAO favorise le formalisme des spécifications graphiques en étendant la spécification SAO à une plus large couverture de description (matérielle et logicielle) et en intégrant la maintenance pour une meilleure compréhension des systèmes complexes.



*Fig. 1.2.4 : Principe d'élaboration de la documentation de spécification VHDL-A.*

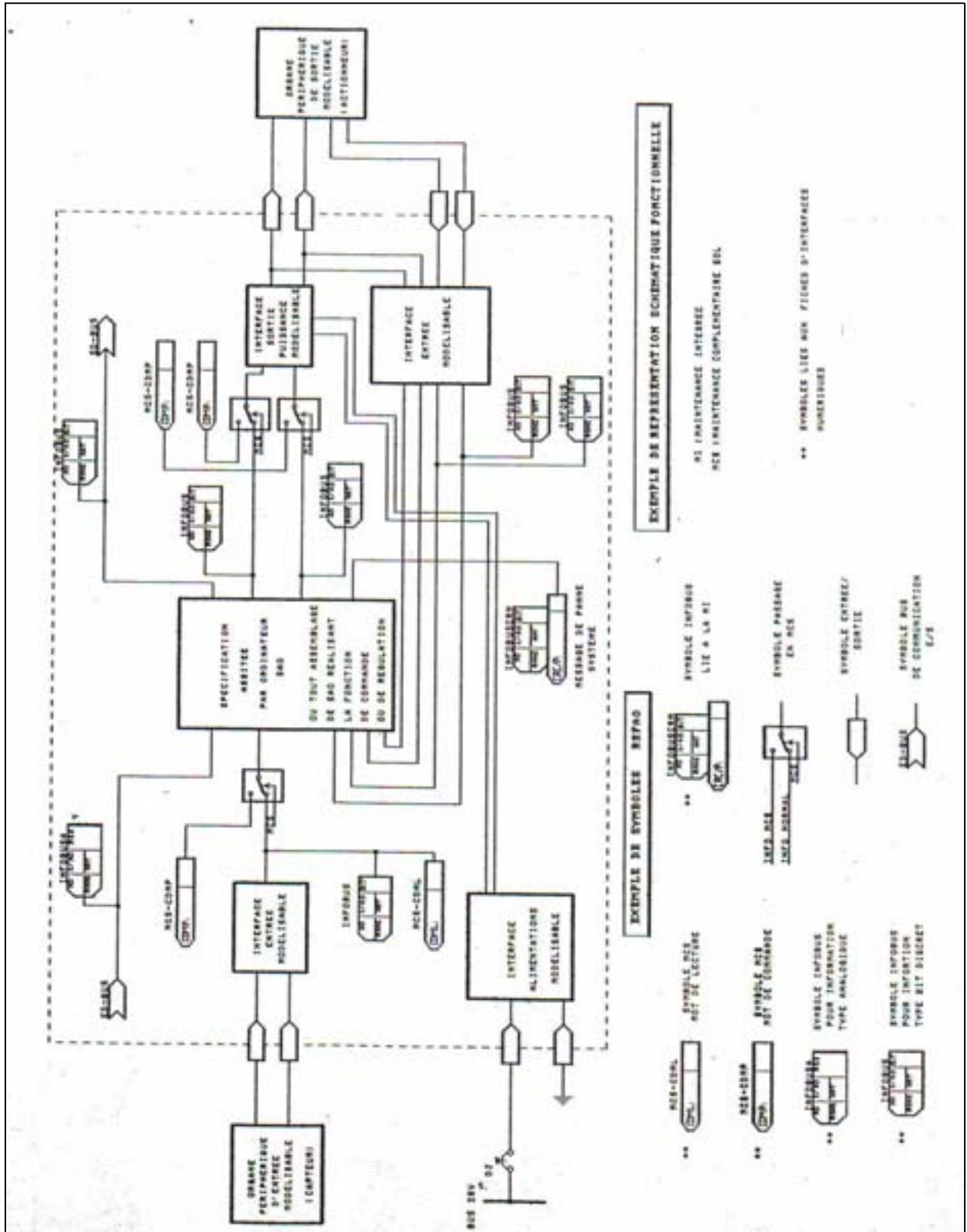


Fig. 1.2.5 : Exemple de planche RSFAO.

## 1.2. Modélisation appliquée à la représentation schématique

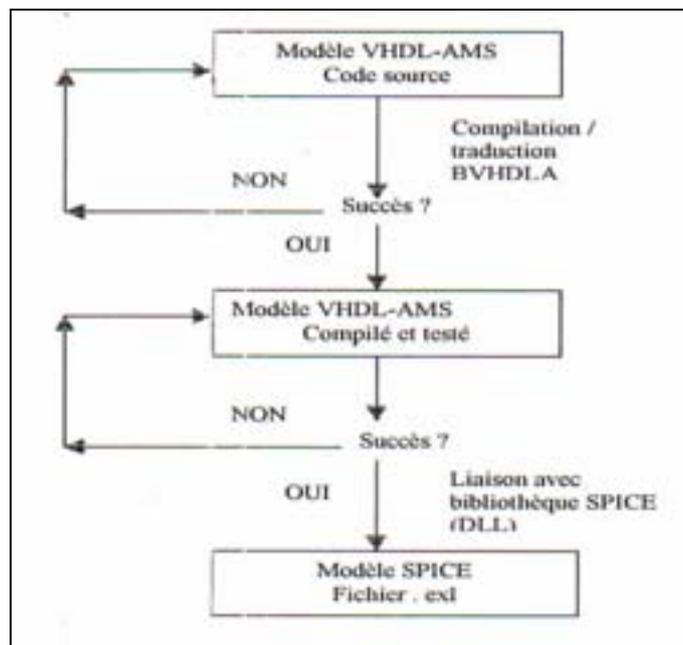
### 1.2.1. Modélisation BVHDLA et la Simulation Flash-Spice

L'objectif était d'utiliser le simulateur Flash-Spice d'ACAD System (base SPICE3F5) [R17] en le rendant capable de comprendre le langage VHDL-AMS défini par la norme IEEE 1076.1, [R03] en lui associant le module de traduction BVHDLA conçu par l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris (ENST). Les modèles présentés jusqu'ici dans cette thèse ont été réalisés par cette association de BVHDLA et de SPICE3F5, et nous allons voir comment dans ce qui suit.

Le module BVHDLA a pour principe d'introduire dans la structure d'un modèle SPICE les modifications nécessaires, portant sur les équations du modèle écrit en VHDL-AMS, ses entrées, ses sorties..., pour que la simulation du modèle SPICE corresponde à la simulation du modèle VHDL-AMS [R05]. Le fichier généré par BVHDLA est compilé, et les codes objets de ces fichiers sont liés aux autres fichiers de la bibliothèque SPICE pour créer un nouvel exécutable (yospice.exe). Cet exécutable permet de simuler le modèle VHDL-AMS par l'intermédiaire d'un circuit test faisant appel au modèle SPICE équivalent ayant la lettre Y pour préfixe (seule lettre restant disponible pour désigner un dispositif dans SPICE).

Une fois le test réussi, il est possible de placer directement le modèle dans la bibliothèque Flash-Spice en utilisant la procédure DLL (Dynamic Link Library). Le modèle VHDL-AMS traduit en SPICE3F5 sera ainsi enregistré dans un fichier de type DLL. C'est ce dernier fichier qui servira d'interface entre la modélisation VHDL-AMS et la schématique comme nous le verrons plus loin.

Le graphique suivant (figure 1.2.6) résume les procédures de test et de placement en bibliothèque Flash-Spice des modèles VHDL-AMS.



*Fig. 1.2.6 : Procédure de test et de placement de modèle VHDL-AMS en bibliothèque Spice.*

## 1.2.2. Implantation d'un modèle VHDL-AMS dans Flash Schématique

### 1) Présentation de Flash Schématique

Flash Schématique est un logiciel de CAO électronique (qui était) développé par la société ACAD System. Outre les possibilités de création de schémas dans le domaine électrique et électronique, la modélisation VHDL-AMS lui ouvrait la voie à la représentation schématique multi-technologique par analogie au domaine électrique.

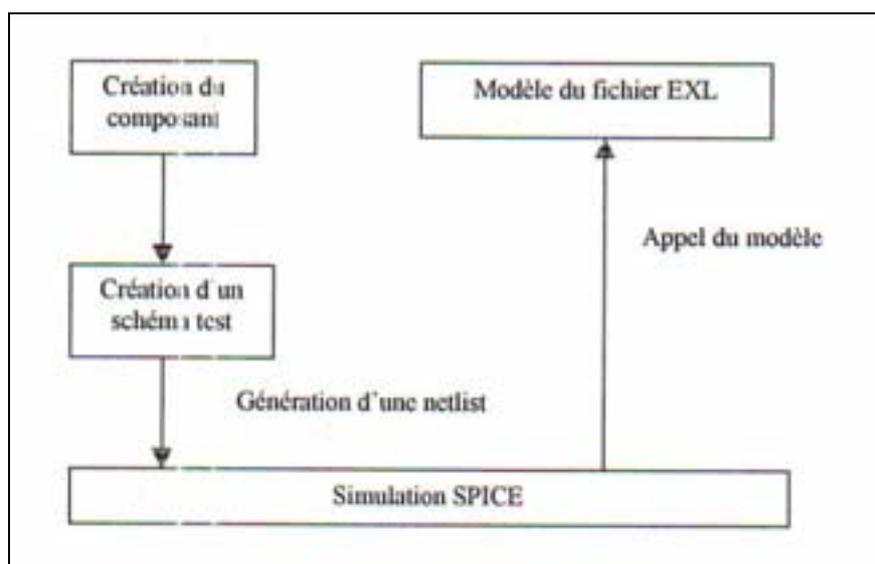
### 2) Création d'un composant

Le composant représentant le modèle VHDL-AMS se crée comme tout autre composant de la schématique. Seuls deux points particuliers le différenciaient :

- le placement des « pattes » devait impérativement se faire dans l'ordre des ports de l'entité du modèle VHDL-AMS,
- le préfixe du groupe du composant devait contenir la lettre Y.

### 3) Création d'un schéma test

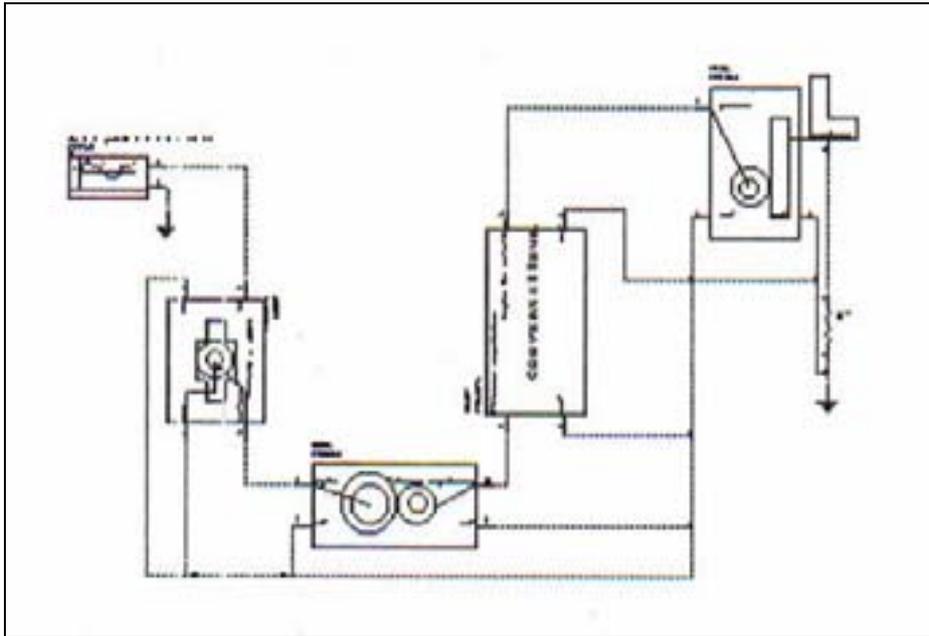
Tout comme il était nécessaire de créer un circuit test pour simuler le modèle VHDL-AMS en SPICE, un schéma test devait être réalisé pour permettre la génération d'une netlist et l'appel du modèle dans le fichier DLL qui était « la traduction du modèle VHDL-AMS dans Flash-Spice », et ce afin de permettre la simulation, comme nous le montre la figure 1.2.7.



*Fig. 1.2.7 : Principe de simulation d'un schéma test.*

#### 4) Exemple de représentation schématique simulable avec Flash Schématique

Le schéma suivant (figure 1.2.8) propose une représentation fonctionnelle du système de positionnement de siège que nous avons déjà vu, avec les composants que sont le moteur, l'engrenage, le convertisseur, l'ensemble pignon - crémaillère, et la source de tension nécessaire à l'alimentation du système.



*Fig. 1.2.8 : Schéma « simulable » du système de positionnement de siège.*

A partir de ce schéma, Flash Schématique peut paramétrer et générer une netlist SPICE permettant à Flash-Spice de procéder à la simulation.

```
* siège.cir
* résistance R1 permet de lire la sortie (in_4) du composant YPIRA
VPWL1 in_0 0 de 0.0 pwl( 0.0 0.0 1.0 12.0)
YDCMT in_0 0 in_1 0 dcmt
YENGA in_1 0 in_2 0 enga
YCONV in_2 0 in_3 0 conv
YPIRA in_3 0 in_4 0 pira
R1 in_4 0 1
.include siege.ann
```

Le fichier siege.ann correspond au paramétrage de Flash-Spice, dans lequel on trouve l'appel des modèles écrits en VHDL-AMS et placés en bibliothèque, ainsi que les commandes de simulation :

```
* siege.ann
.model dcmt dcmt.dcmt
.model enga enga.enga
.model conv conv.conv
.model pira pira.pira
.tran 0.01 1.0
```

### Résultat de simulation du schéma : élévation de la position du siège

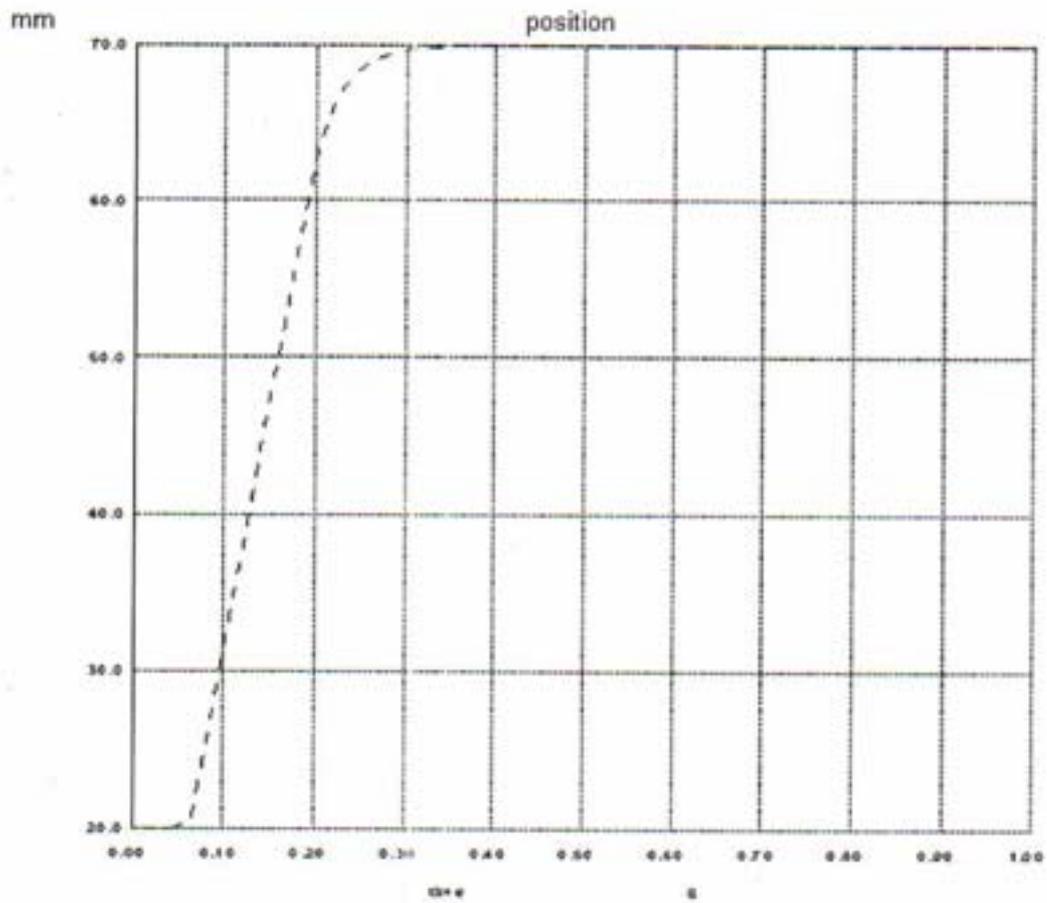


Fig. 1.2.9 : Résultat de simulation (élévation du siège).

La courbe de la figure 1.2.9 montre l'élévation du siège avec un amortissement en fin de course.

## 2. La logistique de la modélisation : un avantage sur l'obsolescence

L'obsolescence des composants (et notamment des composants électroniques) due à la fuite en avant des technologies est un risque majeur pour les grands systèmes (avions de chasse ou de transport, frégates, sous-marins ...). En effet, les technologies utilisées peuvent se retrouver complètement obsolètes bien avant la mise en service du système chez le client. En outre, l'espérance de vie d'un tel système est de 30 ans environ, parfois plus, ce qui pose un problème pour leur maintien en condition opérationnelle comme nous le verrons plus tard.

La question est donc de savoir comment retarder le plus possible les choix technologiques sans accroître la durée déjà très longue de conception des systèmes multi-technologiques ?

Nous disposons à l'heure actuelle d'outils efficaces de simulation qui nous permettent d'apporter un élément de réponse à ce problème, en se basant sur des langages de modélisation (tel que VHDL-AMS) et des méthodes de modélisation permettant à la fois de maîtriser les coûts de développement et d'assurer une certaine efficacité dans la conception des systèmes multi-technologiques.

Parmi les méthodes de modélisation, la méthode dite **fonctionnelle** est à tout point de vue intéressante, parce que simple à mettre en œuvre.

La spécificité de la modélisation fonctionnelle permet de s'intéresser non plus à l'**entité matérielle** de l'équipement mais à la **fonction** de cet équipement. Le passage de l'entité matérielle à une entité fonctionnelle se fait, dans cette approche, tout naturellement, et la description de cette fonction se traduit quant à elle par le passage de l'**architecture** au **processus**.

Ainsi, l'entité décrivant ses relations avec l'environnement matériel du système cède la place à la fonction qui décrit ses relations avec d'autres fonctions dans le cadre de la mission du système pris dans son environnement opérationnel. L'intérêt ici est de pouvoir prendre en compte très tôt les conditions d'emploi et les contraintes des systèmes multi-technologiques et de ses dispositifs dans leur milieu ou dans le milieu dans lequel ils seront utilisés par l'exploitant. L'architecture de l'entité devenue processus de la fonction décrira quant à lui les traitements subis par les entrées de données de la fonction afin de les transformer en informations en sortie utiles aux développeurs systèmes.

Cependant, pour que la modélisation multi-technologique soit applicable et efficace, il faut qu'elle s'inscrive dans un véritable projet d'études amont du système en conception. L'outil de pilotage de ce projet (ou plan d'étude amont) est le produit de « la planification stratégique et opérationnelle des études amont ».

## 2.1. Planification stratégique et opérationnelle des études amont

Il est indispensable (autrement dit stratégique), que le découpage en lots fonctionnels du système multi-technologique soit le plus rigoureux possible. Nous avons vu au tout début de cette thèse les méthodes de conception des systèmes multi-technologiques par la projection biunivoque de l'arborescence fonctionnelle dans l'arborescence technique. La plus grande difficulté en matière d'ingénierie système est de déterminer clairement les limites de chaque fonction et de chaque dispositif.

En effet, un même équipement peut avoir plusieurs fonctions (une fonction première ou principale, et de fonctions secondaires). Il est donc nécessaire d'effectuer un découpage fonctionnel aussi précis que possible afin de ne permettre aucune zone d'ombre pendant les études amont.

Ces zones d'ombre seraient autant de retards et de coûts supplémentaires et n'apporteraient pas ce que l'on est en droit d'attendre dans la phase aval des études systèmes, lorsque le choix de la technologie sera fait.

Outre le découpage précis des lots fonctionnels, **la planification stratégique** doit clairement définir les responsabilités des membres de l'équipe chargée des études amont et le calendrier comportant les dates estimées de remise des résultats d'études par chacun de ces membres.

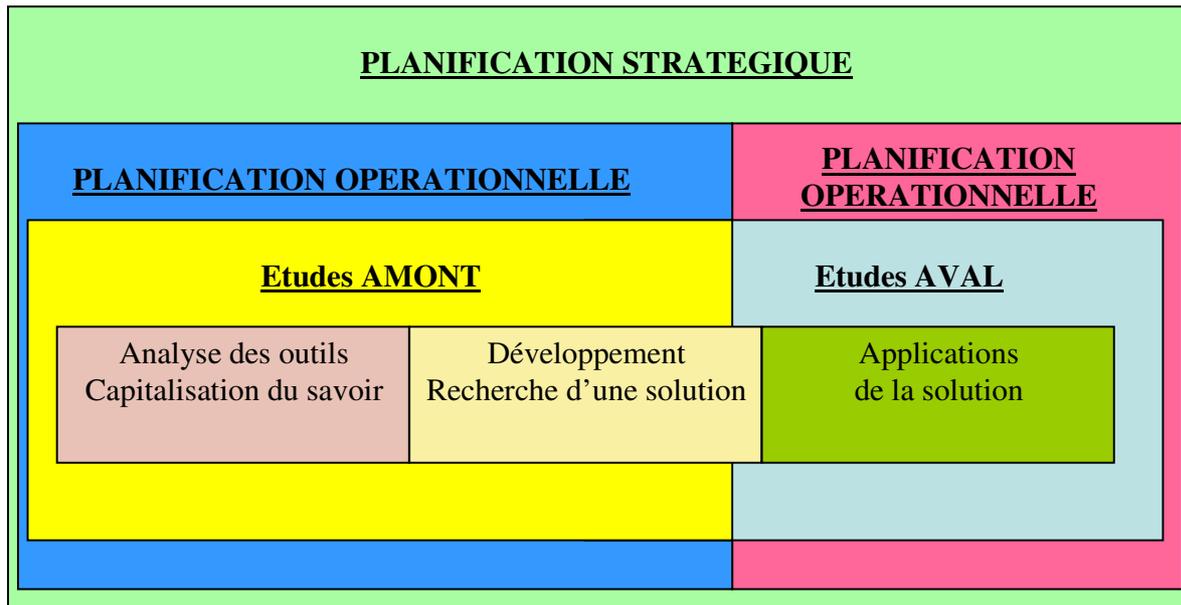
**La planification opérationnelle** quant à elle, décrit d'une manière détaillée comment l'étude va être conduite:

- Élaboration du plan d'études et du planning (répartitions des tâches, milestones)
- Suivi d'avancement des travaux (Résultats de simulation des modèles)
- Reporting "technique" (Modèles en cours validation, Modèle déjà certifiés)
- Analyse du retour d'expérience et engagement d'actions correctives (principe d'itération)

Le plan d'études de modélisation se compose de quatre parties et détermine les liens entre elles :

- Création des modèles
- Test et évaluation des modèles
- Certification des modèles
- Gestion des modèles.

La figure 1.2.30 de la page suivante montre comment se répartissent les études amont et aval : ces études passent par l'analyse des outils et la capitalisation du savoir dans un phase pré conceptuelle puis conceptuelle pour passer ensuite au développement proprement dit, à savoir la recherche de la définition répondant au mieux au besoin client, autrement dit à la mission du système ou à la fonction de l'équipement. Enfin viennent les études dites aval où l'on applique la solution retenue et donc la technologie choisie.



*Fig. 1.2.30 : Planification stratégique et opérationnelle des études systèmes amont.*

## 2.2. Typologie des modèles utilisés

### 2.2.1. Modèles de connaissance

Ils sont de deux types :

- Les **modèles environnementaux** servent à identifier, à analyser et à comprendre l'environnement du système.
- Les **modèles conceptuels** cherchent quant à eux à explorer et à valider les concepts opérationnels du système.

### 2.2.2. Modèles normatifs

Tout comme les modèles de connaissance, les modèles normatifs sont de deux types :

- Les **modèles normatifs et prédictifs** permettent de formaliser le « problème » et les besoins, et à prescrire les exigences.
- Les **modèles de construction** cherchent à édifier l'architecture fonctionnelle et physique (technique) du système.

### 2.2.3. Modèles prédictifs

Ils sont aussi de deux types :

- les **modèles formels** tentent de prévoir le comportement du système et de valider ce système au travers de la simulation.
- Les **modèles analytiques** quant à eux cherchent à estimer les performances, la fiabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement des systèmes, afin de valider le système dans des conditions opérationnelles et environnementales données.

### 2.3. Re-use, évaluation, certification, capitalisation des modèles

L'intérêt du projet d'étude amont réside dans le fait de laisser une grande place à la réutilisation de modèles pour la conception des systèmes multi-technologiques et de valider et certifier ces modèles. Il n'est pas nécessaire (car coûteux) d'élaborer de nouveaux modèles si ceux-ci existent déjà ou s'ils ne nécessitent qu'une adaptation.

Cette adaptation passe par un premier test (dit test unitaire) documenté d'un modèle existant. Vient ensuite un second test (dit test d'intégration) qui va évaluer les modèles couplés les uns aux autres. Ce test d'intégration peut s'intéresser au système modélisé dans son entier, ou à un sous-ensemble particulier. Toute évaluation doit faire l'objet d'une documentation détaillée.

La certification est l'étape de validation par le « client » des modèles. Dans le cadre du projet d'études systèmes amont, le client est le responsable R&D de l'industriel, le Maître d'œuvre (par exemple la Direction des Constructions Navales) ou le Maître d'Ouvrage du programme (par exemple la Marine Nationale).

Tous les modèles nécessaires à la conception du système multi-technologique, sont capitalisés et rigoureusement documentés au sein de bases de données. C'est à partir de la « base de données des modèles certifiés » que les équipes « ingénierie » vont puiser pour le développement du système. Plus tard, les bases de données seront enrichies par d'autres modèles (eux aussi validés et certifiés) liés à l'exploitation et au maintien en condition opérationnel du système, et ce tout au long de sa vie.

### Conclusion de la première partie

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à la démarche de la logistique de la modélisation en conception de systèmes multi-technologiques, et sommes passés pour se faire par l'analyse de l'adéquation des méthodes de conception à la modélisation des systèmes multi-technologiques, à la caractérisation des modèles fonctionnels et à leur utilité dans la recherche de spécifications fonctionnelles simulables utiles à la lutte contre l'obsolescence des composants due à la fuite en avant des technologies. Nous avons aussi posé les principes d'une méthode permettant de conduire des études amont de systèmes en conception dont les caractéristiques principales sont la réutilisation de modèles, l'évaluation et la certification de ces modèles. Voyons maintenant une application particulière de la démarche de la logistique de la modélisation, qui fait l'objet de la deuxième partie de cette thèse.



## DEUXIEME PARTIE

### CHAPITRE 1 : LA MODELISATION COMME OUTIL DU MAINTIEN EN CONDITION OPERATIONNELLE DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES.

#### 1. Liminaire à une maintenance modélisable

##### 1.1. Du « mode de défaillance » au « modèle de défaillance »

L'analyse des modes de défaillance permet d'appréhender de la manière la plus efficace possible le maintien en condition opérationnelle de systèmes alliant plusieurs technologies [R18].

Elle implique l'identification d'actions qui, une fois réalisées, réduiront la probabilité de défaillance d'un système et ce d'une manière efficace et la plus économique possible.

Elle recherche l'adéquation optimale des actions de maintenance d'un système en fonctions des conditions d'occurrence des défaillances et ce tout au long de la vie de ce système.

L'analyse des modes de défaillance est un processus itératif qui combine les données de performance d'un système en exploitation aux données formelles de conception, et utilise ces données pour améliorer le maintien en condition opérationnelle du système en exploitation ou spécifier des exigences de maintenance dans la conception de nouveaux systèmes ou encore de proposer des améliorations de systèmes existants.

La maintenance préventive suppose que la probabilité de défaillance d'une machine ou d'un composant peut être calculée statistiquement a priori et que les pièces défectueuses ou les corrections peuvent être remplacées ou exécutées juste à temps pour prévenir la défaillance.

A titre d'exemple, une pratique commune dans le passé était de changer ou de rénover les roulements à billes des machines tournantes après un certain nombre d'heures d'opérations. Cette pratique était basée sur l'hypothèse que le taux de défaillance des roulements à billes s'accroissait avec leur durée de service. Plus un roulement est sollicité, plus son risque de devenir défectueux est important. Même si cette hypothèse semblait logique, il a été prouvé qu'elle n'était pas exacte (tout au moins pour les roulements à billes).

En effet, une étude sur les machines tournantes a révélé que la durée de vie effective des roulements dépassait grandement l'espérance de vie définie au moment de leur conception si certaines conditions étaient respectées, telles que leur montage correct, leur lubrification convenable et leur protection contre la poussière et l'humidité... En effet, sans vouloir entrer dans des considérations de résistances des matériaux, la fatigue des roulements à billes est minimale lorsque des conditions d'opérations sont respectées et n'a donc pas grand-chose à voir avec l'âge du roulement.

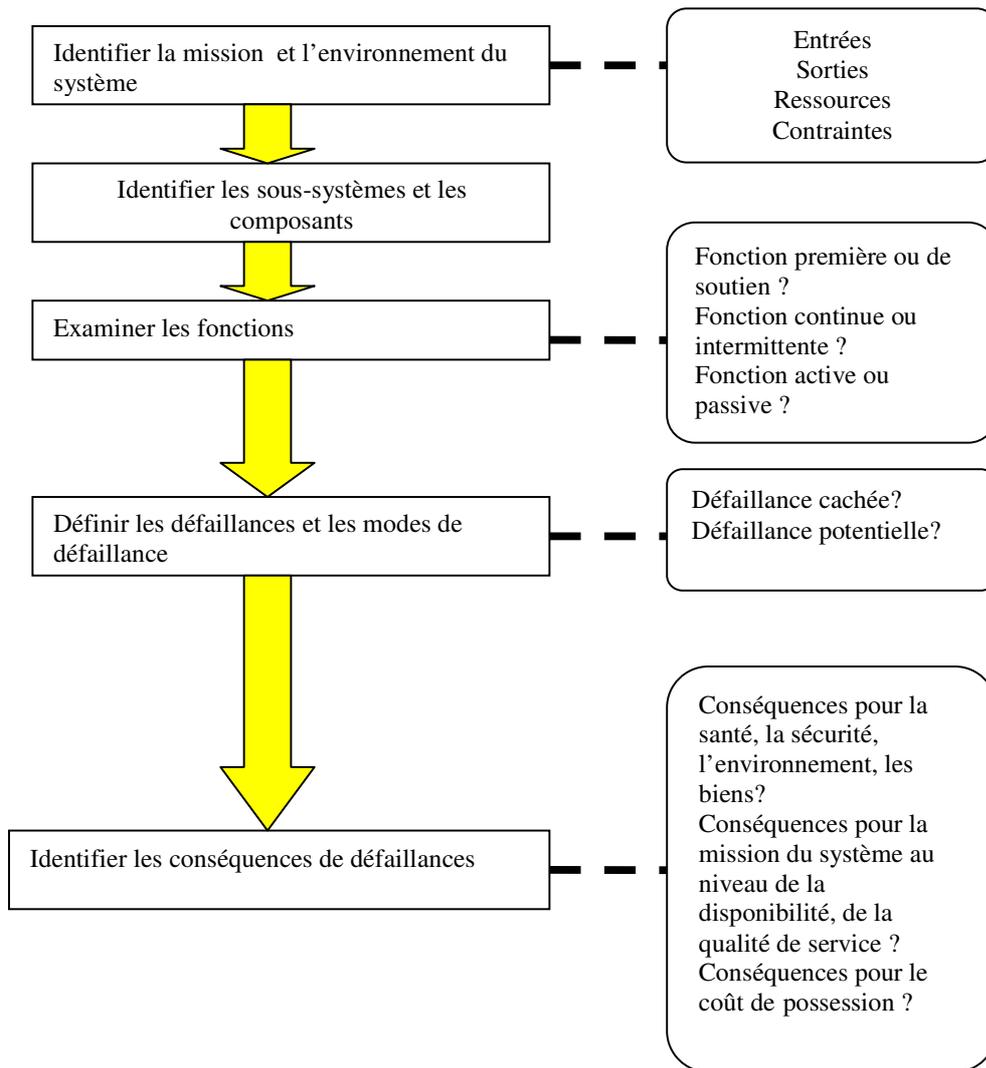
En outre, le développement de nouvelles technologies, incluant l'emploi de microprocesseurs puissants, a démontré que la défaillance des systèmes était basée sur les conditions

d'exploitation et non sur des considérations de temps. Nous sommes donc passé d'une maintenance purement préventive à une maintenance prédictive faisant place à des principes de test et d'inspection afin d'assurer une approche plus efficace du maintien en condition opérationnelle des systèmes. Notre objectif est ici de montrer que cette maintenance est en quelque sorte modélisable et se fonde sur une analyse intuitive des modes de défaillance. Par analyse intuitive, à la différence d'une analyse formelle, on admet que toutes les défaillances ne seront pas analysées, et l'on se concentre sur les causes en fonction de la criticité des défaillances en terme de sécurité, d'impact sur la mission du système et de coûts.

Qu'elle soit intuitive ou formelle, l'analyse doit considérer les questions suivantes [R19] :

- 1) Quelle est la mission du système ou la fonction de l'équipement ?
- 2) Quelles défaillances fonctionnelles pourraient intervenir ?
- 3) Quelles conséquences pourraient engendrer ces défaillances ?
- 4) Que peut-il être fait pour réduire la probabilité de défaillance et pour limiter la survenue d'une défaillance identifiée ou encore pour en limiter sa conséquence ?

Le schéma ci-dessous (figure 2.2.1) montre quelles sont les considérations à prendre en compte dans une analyse de maintenance que l'on souhaite d'une part, centrée sur la fiabilité et d'autre part, modélisable :



*Fig. 2.1.1 Principes à prendre en compte pour une maintenance modélisable et centrée sur la fiabilité.*

## **1.2. Avantages attendus d'une maintenance modélisable**

L'objectif d'une maintenance « modélisable » serait d'identifier pour chaque système et équipement des modèles de contraintes décrivant les modes de défaillance et leurs conséquences, et de déterminer les moyens les plus efficaces pour minimiser le risque et les effets liés à ces défaillances. Ceci permettrait de maintenir les fonctionnalités des systèmes et des équipements de la manière la plus économique possible en :

- 1) s'assurant de l'atteinte des niveaux de fiabilité et de sûreté de fonctionnement des équipements dès la conception et en exploitation,
- 2) permettant de restaurer les fonctions des équipements quand des détériorations surviennent ou risquent de survenir,
- 3) obtenant des informations pour l'amélioration en conception des éléments du système lorsque la fiabilité de ces éléments montre leur inadéquation

Le cycle de vie d'un système est souvent divisé en 2 parties : une partie acquisition comprenant la planification, la conception et la fabrication, et l'autre partie relative à l'exploitation. Le tableau 2 ci-dessous montre comment une maintenance modélisable centrée sur la fiabilité s'impliquerait dans les différentes phases du cycle de vie du système multi-technologique [R20].

Phase du cycle de vie	Implication de la maintenance en phase d' <u>Acquisition</u> du système	Implication de la maintenance en phase d' <u>Exploitation</u> du système
<b>Planification</b>	Validation des exigences Stratégie contractuelle Politique de maintenance Budget (R&D, Fabrication, Equipements, Main d'œuvre, Formation, Exploitation...) Plan prévisionnel de travail	Détermination des exigences (modifications, altérations, amélioration) Plan prévisionnel de travail Budget (Considérations d'exploitation et de maintenance, coûts annuels d'exploitation, main d'œuvre, pièces détachées...)
<b>Conception</b>	Application des choix technologiques Spécification, dessins, définition des tests d'acceptation	Application des choix technologiques Spécification, dessins, définition des tests d'acceptation
<b>Fabrication</b>	Choix du constructeur Construction	Choix du constructeur Construction Test d'acceptation
<b>Exploitation et Maintenance</b>	PAS APPLICABLE	Management du soutien (maintenance, formation, certification...)

*Tableau 2 : phases du cycle de vie des systèmes.*

Les décisions prises très tôt dans la phase d'acquisition affectent profondément le coût de possession (c'est-à-dire le coût du cycle de vie du système). Même si les dépenses interviennent plus tard durant le processus d'acquisition, les coûts sont pris en considération en phase de planification.

En effet, c'est en phase de planification que le concept est défini (le devis) et les coûts connus à 70%. Il ne reste donc plus que 30% pour les 3 phases suivantes du cycle de vie, et parmi ces 30% seulement 5% serviront à la phase d'exploitation [R21]. Sachant que la maintenance d'un système représente typiquement 3 à 5% du coût total de possession, il est nécessaire que cette maintenance soit optimisée pour ne pas dépasser le coût d'exploitation [R22].

Aujourd'hui, les exigences de fiabilité, maintenabilité et de sécurité doivent être prises en compte dans les spécifications systèmes. La modélisation et la simulation constitueraient donc un outil avantageux pour la réalisation de telles spécifications et pour l'estimation du comportement des systèmes soumis aux contraintes pouvant atteindre à leur disponibilité opérationnelle. C'est ce que nous nous proposons de voir dans ce qui suit.

## **2. Modélisation multi-technologique et maintenance prédictive**

### **2.1. Introduction à la Métrologie Fonctionnelle**

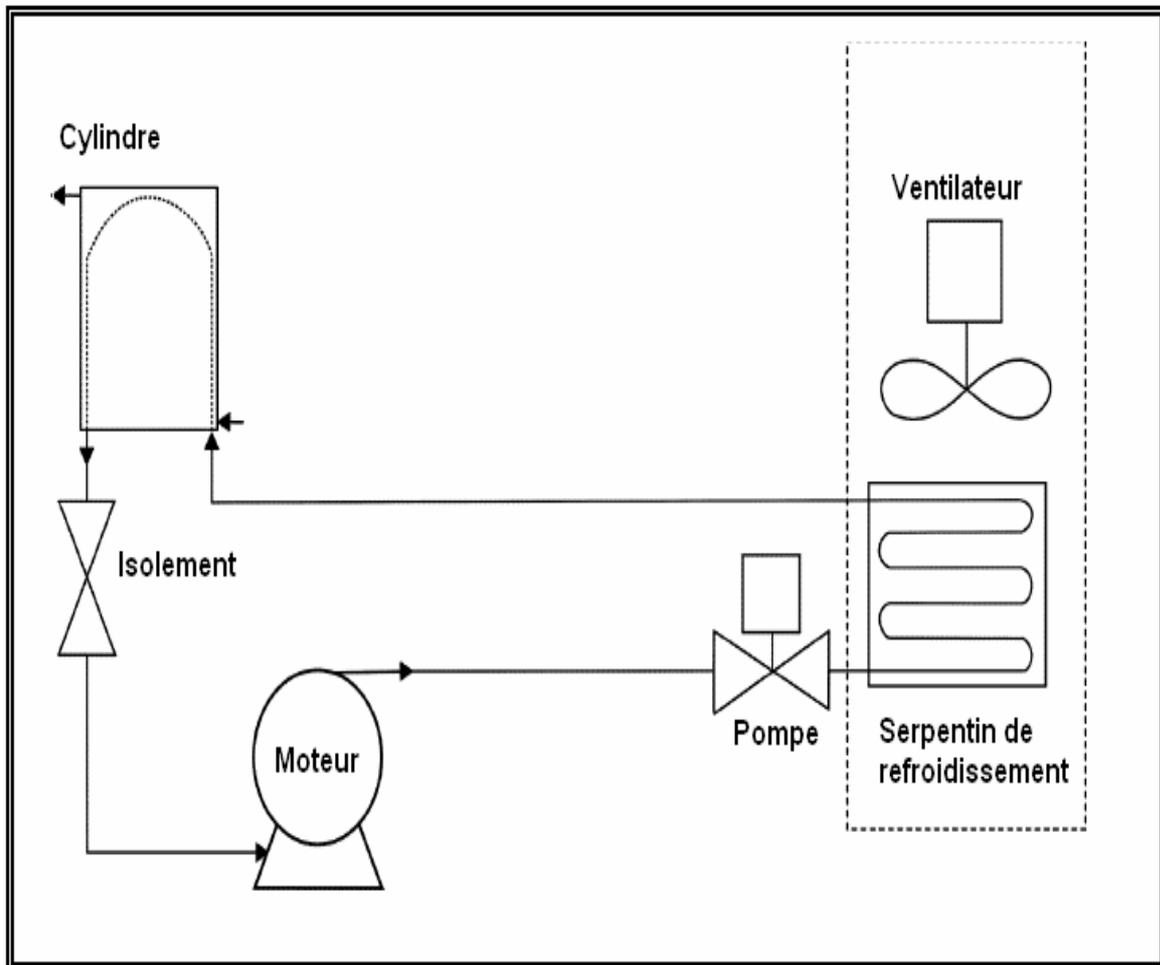
#### **2.1.1 Exemple introductif**

La maintenance prédictive offre de nombreux avantages car elle est une maintenance qui prend en considération les conditions dans lesquelles peuvent survenir les défaillances des systèmes ou des équipements. Aux Etats-Unis, la maintenance prédictive est aussi appelée « Condition Monitoring », ce qui indique un peu plus ce qu'elle recouvre. La maintenance prédictive met en œuvre principalement des essais non intrusifs afin de collecter des données qui permettront d'améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes et équipements.

Cette méthode remplace les tâches de maintenance arbitrairement planifiées dans le temps par des tâches de maintenance justifiées par les conditions relatives à l'exploitation des systèmes et équipements. Des défaillances « catastrophiques » peuvent ainsi être évitées par des actions de maintenance réalisées avant que les conditions de défaillances ne soient réunies. L'intérêt serait de prévoir la réunion de ces conditions, et pour cela il est nécessaire de connaître les signes précurseurs. Ceci passe tout d'abord par la collecte d'information sur les conditions d'emploi et d'âge des équipements.

La maintenance prédictive est très « orientée multi-technologie ». Les données obtenues par l'utilisation des différentes technologies de tests et d'inspections doivent être corrélées les unes aux autres afin d'améliorer « la prédiction ».

A titre d'exemple, considérons un simple système de refroidissement (radiateur de voiture) dont le schéma de principe se trouve ci-dessous, et listons les données, technologies, ou contraintes qui pourront être utiles à l'élaboration de modèles « prédictifs », au maintien en condition opérationnelle du système complet (à savoir la voiture).



*Fig. 2.1.2 : Principe du système de refroidissement moteur.*

Le principe du système de refroidissement moteur de la figure 2.1.2 est un système multi-technologique par excellence : le circuit hydraulique se compose d'une pompe mue par le moteur du véhicule, d'un serpentin de refroidissement (le radiateur), d'un ventilateur électrique, qui permet l'échange thermique du liquide de refroidissement circulant dans le circuit.

Le tableau 3 de la page suivante, présente quelques modèles en fonction de la technologie.

<b>Données / Technologies Contraintes</b>	<b>Utilité</b>	<b>Modèles fonctionnels</b>
<b>Débit</b>	Efficacité du système de refroidissement	Modèle de détecteur de débit
<b>Température</b>	Coefficient de transfert de chaleur / encrassement des conduits	Modèle de mesure de la température différentielle
<b>Pression</b>	Efficacité de la pompe / chute de pression	Modèle de cylindre d'une pompe
<b>Grandeurs électriques</b>	Efficacité du circuit de refroidissement en corrélation avec efficacité de la pompe	Modèle de consommation d'énergie du moteur couplé au modèle du cylindre de la pompe
<b>Epaisseur</b>	Détermine les dégradations dues à la corrosion et à l'érosion	Modèle de mesure par ultrason de l'épaisseur des parois des conduits
<b>Vibrations</b>	Mesure de la dégradation du moteur et de la pompe	Modèle de contrainte vibratoire couplé aux modèles du moteur et/ou de la pompe
<b>Analyse du lubrifiant</b>	Mesure de l'usure de la pompe ou du moteur	Modèle de tolérance du niveau de particules d'usure dans le lubrifiant couplé au modèle de vibration de la pompe.
<b>Fibres optiques</b>	Traces d'usure dans les conduits	Modèle «optoélectronique » (variation du flux lumineux). Modèle colorimétrique (variation de la couleur en fonction flux lumineux)
<b>Thermographie</b>	Comportement du moteur, des boîtes de distribution et des jonctions dans des conditions de hautes températures	Modèles thermiques
<b>Courant de Foucault</b>	Test d'induction électromagnétique	Modèle fonctionnel de discontinuité

*Tableau 3 : exemples de modèles en fonction de la technologie*

L'objectif de la métrologie fonctionnelle dans le cadre de la maintenance (dont la base « matérielle » est, nous le rappelons, la modélisation multi-technologique VHDL-AMS) porte tout

d'abord sur l'étude des technologies qui permettront l'élaboration des modèles que nous avons mentionnés dans l'exemple du système de refroidissement.

### **2.1.2. Domaines technologiques**

Nous nous contentons dans ce qui suit de brièvement définir les domaines technologiques d'une maintenance « modélisable » et de leur associer un type de modèle.

#### **1) L'analyse vibratoire**

La vibration d'un corps est le mouvement périodique à partir de sa position d'équilibre. Par exemple, imaginons que nous sommes entrain de conduire une voiture à une vitesse constante sur une route parsemée de trous et que chaque trou est plus grand que le précédent. Le choc (la vibration) résultant s'accroît à chaque trou rencontré à un tel point qu'il entraîner la destruction de la suspension, des roues, des pneus ... et de la voiture. Cette analogie dépeint ce qui arrive quand, par exemple un défaut (impact) dans des roulements ou des engrenages intervient et empire à chaque rotation. Les modèles mécaniques VHDL-AMS que nous avons vu dans la première partie de cette thèse peuvent être ici utilisés.

#### **2) La thermographie infrarouge**

La thermographie infrarouge permet de fournir une image des différences de température de la face visible d'un corps. Des modèles colorimétriques VHDL-AMS peuvent être ici utilisés [R14].

#### **3) La détection de bruits par ultrasons**

Les dispositifs de détection d'ultrasons fonctionnent normalement dans une gamme de fréquence de 20KHz à 100Khz et permettent de rendre audibles des changements de bruits associés à des fuites, des décharges par effet corona (effluve) et autres phénomènes produisant des hautes fréquences tels que la fréquence de résonance d'une bague de roulement ou de son logement causée par une lubrification insuffisante. Des modèles du domaine fréquentiel peuvent ici être utilisés.

#### **4) L'analyse des lubrifiants et des particules d'usure**

L'analyse des lubrifiants est réalisée pour déterminer l'état d'usure des machines tournantes, la qualité des lubrifiants ou si les lubrifiants ont été contaminés. Des modèles du domaine fluide peuvent ici être utilisés, mais aussi colorimétriques et thermiques (modélisation du changement de la couleur des lubrifiants) [R23].

Le contexte multi-technologique de la maintenance prédictive au travers des domaines que nous venons de voir, peut être appréhendé par la modélisation fonctionnelle. Ainsi, des modèles VHDL-AMS peuvent être construits afin de disposer de spécifications pour la surveillance de paramètres. L'ensemble de ces modèles de performance forment ce que nous appelons la métrologie fonctionnelle [R24].

## **2.2. Les modèles de surveillance des paramètres électriques.**

L'intérêt de cette étude particulière est qu'elle fait appel à des modèles purement électriques et à des modèles non exclusivement électriques pour le « monitoring » d'équipements électriques. Cette étude apporte en outre des précisions sur la métrologie fonctionnelle [R25].

L'efficacité opérationnelle des systèmes multi-technologiques est conditionnée dans une très grande proportion par le maintien en condition de ses équipements électriques. Ces équipements représentent parfois les  $\frac{3}{4}$  de l'investissement en capital d'un système. La surveillance des équipements électriques s'effectue par l'emploi de différentes technologies et techniques, pas uniquement électriques comme nous le verrons, même si celles-ci sont les plus répandues.

### **2.2.1. Les modèles purement électriques**

#### **1) Isolement des appareils électriques**

##### **a. Modèle Hi Pot**

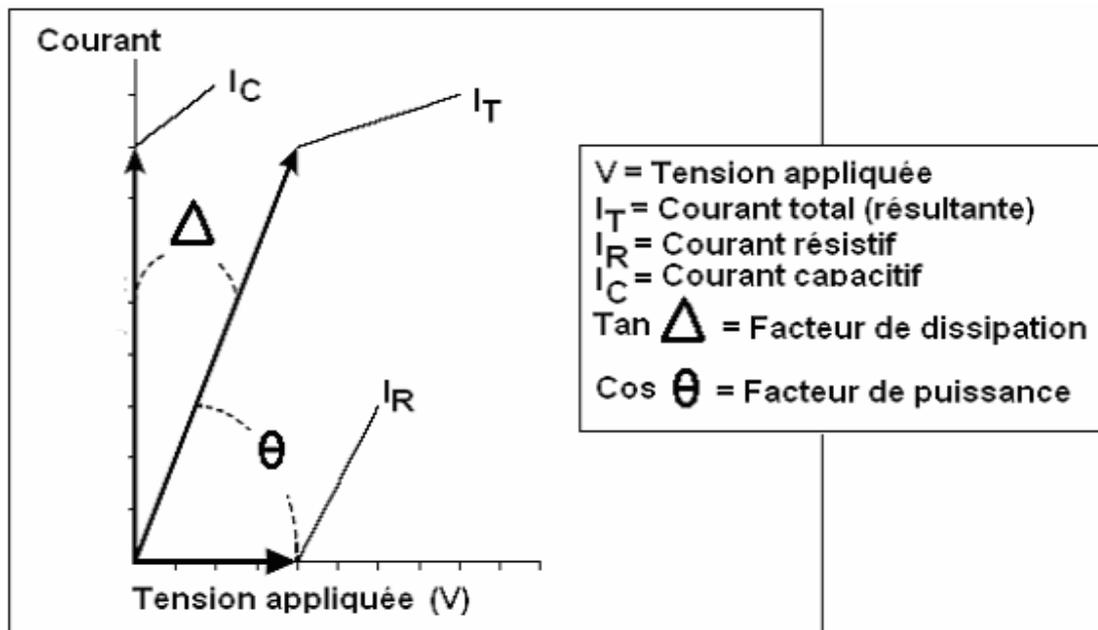
Dans le test à haute tension (Hi Pot), le double de la tension d'opération auquel on ajoute 1000 volts est appliqué, par exemple, aux enroulements d'un moteur, afin de juger de leur isolement. C'est typiquement un test « go / no go » pratiqué dans l'industrie sur des équipements neufs ou venant d'être remis en état. Ce test met en jeu le dispositif d'isolement du matériel et il peut engendrer une défaillance prématurée de celui-ci en cas de problème. Le Hi Pot n'est donc pas un test de routine. Une alternative existe cependant par l'application d'une tension plus basse progressivement augmentée afin de mesurer les changements à la lecture de la résistance d'isolement. Pour des équipements qui viennent d'être réparés, si le courant de fuite continue à augmenter à une tension de test constante, ceci indique que l'équipement n'a pas retrouvé ses paramètres de fonctionnement standard, et va connaître une nouvelle défaillance très prochainement. Pour de nouveaux équipements, cela indique que le dispositif d'isolement ou la méthode de construction est inadéquat pour une exploitation des matériels à long terme. Le modèle fonctionnel amplificateur – additionneur (Hi Pot) ainsi élaboré permet de fournir des données de mesures au niveau d'un modèle de résistance (le dispositif d'isolement) qui seront corrélées avec les données de la maintenance ou pour permettre la spécification de nouveaux systèmes ou d'équipements devant être reconstruits.

##### **b. Modèle du facteur de puissance d'isolement**

Le facteur de puissance d'isolement, parfois défini comme facteur de dissipation, est la mesure de la perte de puissance au travers de la mise à la terre. C'est un ratio dimensionnel, exprimé en pourcentage du courant résistif de l'isolement par rapport au courant total appliqué.

Pour mesurer cette valeur, on détermine l'angle de la phase entre la tension appliquée à l'isolement et le courant total qui est la combinaison du courant capacitif et du courant résistif.

Le schéma ci-dessous montre les relations entre tension et courant pour déterminer le facteur de puissance et le facteur de dissipation à l'isolement.



*Fig. 2.1.3 : Courbes du facteur de puissance.*

Dans le schéma de la figure 2.1.3 ci-dessus, on peut voir que le courant résistif ( $I_R$ ) est en phase avec la tension appliquée ( $V$ ) et que le courant capacitif ( $I_C$ ) et cette même tension ( $V$ ) ont un angle de  $90^\circ$ . La résultante est le courant total ( $I_T$ ), à laquelle on va comparer le courant résistif pour obtenir le facteur de puissance de l'isolement ( $I_R / I_T$ ).

Normalement, le courant résistif ( $I_R$ ) est très petit comparé au courant total ( $I_T$ ) parce que la plupart des isollements sont capacitifs par nature.

On peut en effet comparer l'isolement au diélectrique d'une capacité. Le diélectrique ne laissera passer aucun courant entre les deux conducteurs séparés par le diélectrique jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les deux conducteurs dépasse la tension de capacité du diélectrique, tout comme l'isolement de l'enroulement d'un moteur prévient du passage de courant à la terre jusqu'à ce que la tension appliquée dépasse la tension de capacité de cet isolement.

Comme l'impédance de l'isolement d'un système change en fonction de la durée d'exploitation, de l'humidité, de la contamination ou des dommages physiques, le ratio entre le courant capacitif ( $I_C$ ) et le courant ( $I_R$ ) va diminuer. L'angle de phase entre la tension appliquée ( $V$ ) et le courant résultant ( $I_T$  courant total) va donc diminuer ce qui implique une augmentation du facteur de puissance de l'isolement (cosinus de l'angle de phase tension / courant plus grand).

Le modèle du facteur de puissance permet par conséquent d'établir des comparaisons sur l'état des dispositifs d'isolement des systèmes et de prévenir des dégradations.

### **c. Modèle d'index de polarisation**

La résistance d'isolement d'un circuit électrique est mesurée à l'aide d'un ohmmètre de la phase à la phase ou de la phase à la terre. La lecture de la résistance d'isolement doit souvent être corrigée à cause de la température. Par exemple, la température des enroulements d'un moteur affecte les résultats.

Le ratio provenant de la lecture du ohmmètre, après une minute et 10 minutes, détermine l'index de polarisation auquel on se réfère. Le modèle d'index de polarisation prend ainsi en considération les variations de température dans le temps au travers du modèle de résistance (du dispositif d'isolement).

## **2) Les moteurs et transformateurs**

### **a. Modèle du « choc électrique »**

L'état des enroulements des moteurs est testé à l'aide d'un dispositif comprenant 2 capacités et un oscilloscope. Ce test permet de comparer la différence obtenue par une impulsion de même tension appliquée simultanément à 2 enroulements. Comme pour le test haute tension (Hi Pot), la tension appliquée est 2 fois la tension normale d'exploitation à laquelle sont ajoutés 1000 volts. Ce test est donc normalement utilisé comme test d'acceptation (go / no go). Les données fournies permettent une comparaison du signal entre 2 phases indiquant l'état relatif des 2 phases par rapport à l'isolement (court-circuit). A cause de l'impact sur l'isolement du système, ce test n'est pas recommandé comme test de routine de maintenance prédictive.

Le modèle prend en considération les éléments pouvant influencer sur l'état des enroulements afin de permettre une évaluation de leurs conséquences. Les résultats obtenus (sous forme d'abaques) seront corrélés avec les données de maintenance.

### **b. Modèles d'analyse des circuits moteurs**

L'analyse des circuits moteurs permet de vérifier les paramètres suivants :

- la résistance à la terre,
- la capacitance à la terre,
- les déséquilibres résistifs,
- les déséquilibres inductifs,
- l'index de polarisation.

Les tests sont réalisés avec un moteur non alimenté et sous une basse tension pour ne pas trop mettre à l'épreuve l'isolement du système.

Les données obtenues sont comparées aux grandeurs « normales » des moteurs similaires.

La résistance totale d'un conducteur est la somme de toutes ses résistances (impédance capacitive et inductive). Une mesure précise de l'impédance d'un conducteur permet de détecter des dégradations mineures du moteur pouvant conduire plus tard à sa défaillance.

L'état de l'isolement peut être déterminé par la mesure de la capacitance entre la phase et la terre. La présence d'humidité ou d'autres substances conductrices va former une sorte de capacité avec le conducteur, l'isolement (diélectrique) et la contamination (substances conductrices).

Maintenir l'équilibre de l'induction est primordiale pour une exploitation convenable tout au long de la durée de vie des moteurs électriques. En effet, un déséquilibre inductif entraîne une augmentation de la température des enroulements et réduit donc la durée de vie de l'isolement. Les modèles utilisés pour les spécifications d'analyse des circuits sont : la résistance, la capacité et l'inductance.

### **c. Modèle de test très basse fréquence (TBF)**

Ce test est réalisé avec un courant alternatif de 0.1 Hz sans les inconvénients d'un test haute tension (Hi Pot). La première application du test TBF consiste à mesurer la décharge partielle et les hausses de tensions pour les gros moteurs électriques mais aussi les câbles d'alimentation et autres appareils à forte capacité. Les résultats obtenus permettent de déterminer des dégradations. Les modèles de capacité sont ici utilisés.

### **d. Modèle du temps de démarrage**

Le courant nécessaire au démarrage d'un moteur électrique peut représenter 5 fois le courant nécessaire en pleine charge. Le courant de démarrage et le temps nécessaire au démarrage donnent une indication de l'état des moteurs. En effet, un courant de démarrage très important et un temps de démarrage assez long, peuvent indiquer des problèmes d'ordre mécanique, tels que des frictions dues au mauvais alignement des composants rotatifs du moteur. Les données peuvent être corrélées avec une analyse vibratoire. On peut ici utiliser un modèle fonctionnel simulant le temps de démarrage d'un moteur couplé à des modèles de contraintes résistives simulant l'état conditionnel du moteur (résistances). La lecture du courant nécessaire à la charge (moteur) à un temps donné et faite après variation de la résistance (état du moteur).

### **e. Modèle du rapport de transformation**

Le test de mesure du rapport de transformation d'un transformateur est surtout réalisé comme test d'acceptation (recette). Il peut aussi être utilisé comme un test de dépannage lorsque les autres tests ont révélé un problème potentiel. Pendant les opérations de maintenance de routine, ce test peut être réalisé pour identifier des courts-circuits, des problèmes de réglage ou de défaillances des commutateurs de réglage.

Le test est réalisé par l'application d'une tension à l'enroulement primaire et en mesurant la tension de l'enroulement secondaire. Le ratio entre les enroulements actifs peut être calculé.

Cette mesure peut être utilisée pour déterminer l'état de la capacité inductive du transformateur. La mesure du rapport de transformation peut indiquer qu'une défaillance existe mais ne peut pas déterminer la raison et le lieu de cette défaillance.

Le modèle de transformateur est ici utilisé pour lire le rapport de transformation.

### **3) Alimentation et distribution**

#### **a. Modèle d'impédance des batteries**

Les batteries sont des dispositifs de stockage de l'énergie électrique. Toutes les batteries ont une capacité de stockage dépendant de la tension à leurs bornes et de leur impédance interne.

L'impédance d'une batterie est testée par le passage d'un courant alternatif entre ses bornes. La tension résultante est mesurée et l'impédance peut être calculée. Cette mesure peut être réalisée sans déconnecter la batterie grâce au faible signal alternatif. Deux comparaisons sont donc faites :

- l'impédance déterminée pendant le test est comparée avec l'impédance calculée pour la batterie lors du dernier test,
- l'impédance déterminée pendant le test est comparée à l'impédance connue du même type de batterie.

Chaque batterie doit avoir une impédance se trouvant dans les 10% des impédances de batteries de même type et se trouvant dans les 5% de la dernière impédance déterminée pour la batterie.

Une lecture de l'impédance en dehors de ces limites révèle un problème de cellules ou une perte de capacité de la batterie.

En outre, si la batterie connaît un court-circuit interne, l'impédance tend vers 0.

En revanche, en circuit ouvert, l'impédance va tendre vers l'infini et une usure prématurée causée par une chaleur ou des décharges excessives.

L'impédance d'une batterie étant propre à chaque batterie (dans des limites fixées par le type de batterie), il est important de la connaître très tôt (dès la mise en service de la batterie) afin de juger lors des tests de routines de son usure. Les modèles de résistance et de capacité sont utilisés.

#### **b. Modèles du facteur de puissance**

Maintenir un facteur de puissance optimal maximise l'efficacité de l'utilisation de l'énergie électrique. Le facteur de puissance, comme nous l'avons déjà vu, est le ratio de la puissance réelle par rapport à la puissance réactive d'utilisation.

La mesure du facteur de puissance est réalisée par la détermination de la relation entre les phases de la tension et du courant. L'ajout de capacités augmentant le facteur de puissance est considéré comme un moyen améliorant le facteur de puissance des systèmes électriques.

Les modèles de capacité et de résistance sont ici utilisés pour la spécification des paramètres.

### **c. Modèle de filtre**

La distorsion harmonique est le résultat de charges non linéaires du système électrique. Un haut niveau de courant harmonique entraîne un échauffement excessif dans les transformateurs et les câbles, qui va réduire leur durée de vie mais aussi entraîner de faux déclenchements de disjoncteurs, ce qui peut être très gênant...

Un analyseur d'harmoniques est utilisé pour le courant harmonique et déterminer sa source. Des filtres peuvent ainsi être mis en place dans le système pour réduire l'impact du courant harmonique.

Les modèles de capacité et de résistance sont ici utilisés pour la spécification des paramètres.

### **d. Modèle de continuité d'un conducteur**

Une pointe de tension est appliquée à un conducteur. Chaque discontinuité dans le conducteur génère une impulsion réfléchie. La période de temps entre l'impulsion initiale et la réception de l'impulsion réfléchie indique l'endroit de la discontinuité.

Cette technologie est utilisée pour localiser les défauts des câbles d'alimentation. Les modèles de capacité et de résistance sont ici utilisés pour la spécification des paramètres.

### **e. Modèle des contacts de disjoncteur**

Afin de déterminer l'état des contacts d'un disjoncteur ou d'un commutateur on peut déterminer leur résistance. Cette technique permet de prévoir les futures tâches de maintenance à réaliser sur ce type de dispositifs. La plupart des constructeurs de disjoncteurs haute et moyenne tension spécifient une résistance maximale des contacts à la fois pour les nouveaux contacts et les contacts en cours d'utilisation.

La résistance des contacts dépend de 2 choses : la qualité de la zone de contact et la pression de contact. La qualité de contact peut se dégrader si le disjoncteur est sollicité en cas de panne.

La pression de contact peut être moins efficace de par la fatigue de fixation due à un nombre élevé de sollicitation du disjoncteur.

Les modèles de capacité et de résistance sont ici utilisés pour la spécification des paramètres.

Afin de mesurer la résistance de contact, on applique un courant continu, compris normalement entre 10 à 100 ampères, au travers des contacts. La tension aux contacts est alors mesurée et la résistance calculée par application de la loi d'Ohm.

La valeur de la résistance ainsi obtenue peut être comparée avec les limites maximales fournies par les fabricants.

## **2.2.2. Les autres modèles multi-technologiques**

### **1) Modèle d'analyse spectrale de la signature du courant dans les moteurs**

Cette analyse est une technique non destructive réalisée à distance sur des moteurs électriques en opération. Le courant et la tension fournissent les données d'un signal utilisé pour détecter les dégradations des équipements.

Ces données peuvent être comparées à celles fournies par une analyse vibratoire. Les spectres du courant utilisé par le moteur dans le domaine temporel et fréquentiel sont collectés et analysés.

Un problème d'arbre de rotor peut apparaître par exemple comme une bande de fréquence latérale à celle de ligne de fréquence de l'alimentation électrique. Cette méthode est généralement utilisée pour le diagnostic des circuits de puissance, des composants de moteurs électriques et des composants mécaniques entraînés par ces moteurs.

Un modèle fonctionnel colorimétrique peut ici être utilisé pour la spécification des paramètres [R14].

### **2) Modèle du temps de réponse des disjoncteurs**

Ceci est un test mécanique pour vérifier la vitesse et la position des contacts de disjoncteurs haute et moyenne tension avant, pendant et après leur utilisation. Dans ce test on utilise des capteurs de mouvements placés sur le mécanisme d'ouverture et de fermeture du disjoncteur, on applique une tension à ses connexions et on ferme et rouvre le disjoncteur. Le tracé de la durée du changement de tension et du signal obtenu par le capteur de position permet de connaître les ajustements nécessaires à réaliser sur les disjoncteurs par rapport aux données fournies par le constructeur ou les données historiques.

Le tableau 4 de la page suivante résume les dispositifs dont les paramètres de surveillance peuvent être spécifiés par les modèles dont nous avons établi précédemment la nature.

Dispositifs	Modèles
Câblage (distribution électrique)	Résistance; TBF ; Hi Pot
Contrôleur et disjoncteur (motorisé)	Temps de réponse des disjoncteurs ; Facteur de puissance d'isolement ; Capacité
Transformateur (pour distribution)	Rapport de transformation ; Capacité (facteur de puissance) ; Filtre (Distorsion harmonique)
Moteurs électriques	Analyse spectrale de la signature du courant dans les moteurs ; Analyse des circuits moteurs ; Résistance; Hi Pot ; « choc électrique » des enroulements ; temps de démarrage
Générateurs	Résistance; TBF

Tableau 4 : spécification de modèle pour la surveillance de paramètres électriques

### **3. Modélisation multi-technologique et maintenance proactive**

La modélisation multi-technologique permet de répondre aux caractéristiques essentielles d'une maintenance proactive car elle offre le moyen :

- d'analyser le retour d'expérience (faits techniques et causes de défaillances) et de communiquer efficacement avec le développeur du système sur les besoins de changements en conception ou avec les services techniques pour la correction des procédures ;
- de bâtir une stratégie de maintien en condition opérationnelle orientée sûreté de fonctionnement (disponibilité du système, fiabilité des fonctions, sécurité)
- de s'assurer que rien ne concernant le maintien en condition opérationnel du système n'intervienne isolément ;
- d'assurer l'amélioration continue de la qualité du système ;
- d'optimiser les choix technologiques en cas de reconstruction du système ou de ses équipements compte tenu des impératifs d'exploitation et de maintenance.

#### **3.1. Utilisation de modèles pour l'exploration conditionnelle de l'état des systèmes.**

L'exploration conditionnelle de l'état des systèmes est un élément clé de la mise en œuvre d'une maintenance proactive cherchant à optimiser les processus d'un programme de maintien en condition opérationnelle.

Prenons un exemple : le constructeur d'un système recommande d'ouvrir et d'inspecter un équipement spécifique d'un système à intervalle régulier. Pendant l'inspection de cet équipement, le technicien note l'état de ces différents composants. Les données collectées pourraient être corrélées avec des données de performance de modèles validés et certifiés.

Après analyse des résultats, la décision pourrait être de changer les intervalles d'ouverture et d'inspection de l'équipement jusqu'à ce que l'état des différents composants indique une réelle dégradation.

##### **3.1.1. Contrôle de récurrence des défaillances**

Le contrôle de la récurrence est une approche systématique d'analyse des défaillances des équipements.

Les défaillances répétitives entraînent une indisponibilité récurrente du système due à :

- Une défaillance répétitive d'une pièce d'équipement,
- Une défaillance répétitive de différents équipements d'un système ou sous-système,
- Une défaillance du même composant dans plusieurs équipements identiques ou dans plusieurs équipements différents.

Le contrôle des défaillances récurrentes implique le processus d'analyse suivants :

- 1) l'adressage systématique des défaillances du système à sa structure ou à ses composants
- 2) l'allocation efficace de ressources pour l'investigation et la correction des défaillances répétitives les plus critiques
- 3) la surveillance des performances des systèmes et de leurs équipements
- 4) l'identification et l'enregistrement des défaillances des systèmes, équipements, composants
- 5) l'établissement de priorités pour l'allocation de ressources nécessaires à la solution
- 6) l'assignation des problèmes aux ressources chargées de leur analyse
- 7) l'analyse des problèmes eux-mêmes et la détermination des causes
- 8) la recommandation des actions correctives
- 9) la sélection des actions correctives
- 10) l'implantation des actions correctives sélectionnées
- 11) l'évaluation des résultats des actions correctives implantées.

La modélisation permet d'évaluer les défaillances et les moyens contribuant à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement du système considéré en s'intégrant au processus d'analyse et de contrôle des défaillances récurrentes.

### **3.1.2. Amélioration continue de la fiabilité**

Souvent, la conception et la fabrication de nouveaux types d'équipements n'offrent pas la possibilité d'obtenir facilement des données prédictives « fiables » sur l'état des équipements en exploitation.

Ceci vient du fait que les concepteurs de systèmes n'ont bien souvent qu'une pratique restreinte des problèmes d'exploitation et de maintenance des systèmes qu'ils fabriquent.

Les normes de CAO/FAO qui ont maintenant plus de 25 à 30 d'âge, ne sont plus, pour la plupart, adéquates. En outre, le coût du cycle de vie et les données historiques des problèmes de fiabilité d'une famille d'équipements sont rarement documentés pour les personnes chargées d'acheter les systèmes et équipements, ces personnes étant plus enclin à acquérir ces systèmes et équipements au meilleur prix d'achat, sans se soucier du coût de l'exploitation et de la maintenance.

Afin de résoudre ce problème, les spécialistes systèmes, et notamment ceux chargés de la sûreté de fonctionnement, sont tenus d'écrire leurs propres spécifications, de tester les équipements des différents fournisseurs et de documenter tous les problèmes rencontrés. Une fois de plus, la modélisation multi-technologique constitue un moyen de réponse aux exigences de fiabilité et sûreté de fonctionnement que le client utilisateur est en droit d'attendre.

Prenons par exemple le cas d'une mauvaise installation d'éléments mécaniques rotatifs en définissant des modèles de contraintes d'équilibre et d'alignement.

Une mauvaise installation conduit souvent à des problèmes quotidiens auxquels le personnel d'exploitation et de maintenance doit faire face.

Par exemple, l'équilibre et l'alignement d'éléments rotatifs, tels que les roulements à billes de machines tournantes, sont souvent négligés pendant leur installation. L'inclusion de spécifications contractuelles pour l'installation des nouveaux systèmes, mais aussi pour la reconstruction et la réinstallation d'équipements existants, est une nécessité en terme d'efficacité opérationnelle et de maîtrise des coûts.

Dans le cas des roulements qui supportent et transfèrent les forces d'un élément en rotation à une machine, il résulte qu'ils posent d'une manière inhérente un problème de fiabilité. En effet, il a été établi que 10 à 20 % des roulements atteignent l'espérance de vie déterminée à leur conception. L'une des causes conduisant à la défaillance prématurée des roulements est la charge parasite des vibrations excessives causée par un déséquilibre ou un mauvais alignement.

En effet, cette charge résultante produit une augmentation de la charge dynamique sur les roulements et donc une défaillance prématurée.

Les formules empiriques utilisées pour déterminer la durée de vie théorique des roulements sont les suivantes :

Pour les billes de roulements

$$L_{10} \text{ Life Hours} = (16,667 / \text{RPM})(C / P)^3 \quad (51)$$

Pour le roulement complet

$$L_{10} \text{ Life Hours} = (16,667 / \text{RPM})(C / P)^{10/9} \quad (52)$$

Où,  $L_{10}$  est le nombre d'heures que 90% d'un groupe de roulements doit atteindre, ou dépasser, sous une charge constante ( $P$ ) avant de connaître une défaillance due à la fatigue ; ( $C$ ) est la charge du roulement qui résultera après un million de tours ; ( $P$ ) est la charge réelle des

roulements, statique et dynamique. (C) est obtenue à partir des données Constructeurs, et (P) est calculée au moment de la conception de la machine.

Comme on peut le voir, l'espérance de vie d'un roulement est inversement proportionnelle à la vitesse et plus significativement, inversement proportionnel au tiers de la puissance de la charge pour les billes de roulements et aux  $10/9^{\text{ème}}$  de la puissance pour les roulements eux-mêmes.

L'objectif est donc d'équilibrer un élément rotatif (vilebrequin, par exemple) de manière à ce qu'il atteigne un niveau de vibration minimum. La méthode de calcul équilibre doit absolument inclure des calculs de déséquilibres résiduels. Ces déséquilibres résiduels peuvent être appréhendés par la formule suivante :

$$U_r = (V_r / V_e).M \quad (53)$$

Où  $U_r$  est le déséquilibre résiduel,  $V_r$  est le déséquilibre réel,  $V_e$  est le déséquilibre constaté et  $M$  la masse.

Le déséquilibre permissible est lié à la masse du type de l'élément rotatif. En général, plus grande est sa masse, plus grand est le déséquilibre permissible. L'équation suivante peut être aussi utilisée pour déterminer la relation entre le déséquilibre résiduel permissible ( $U_{per}$ ) par rapport à la masse et un niveau de déséquilibre permissible requis ( $e_{per}$ ) :

$$e_{per} = U_{per} / U_m \quad (54)$$

La relation entre la vitesse et le déséquilibre permissible requis peut s'écrire sous la forme :

$e_{per} \times \omega = a$  (constante) où ( $\omega$ ) est la vitesse angulaire de l'élément tournant à sa vitesse normale d'opération.

Le niveau d'équilibre d'un élément mécanique rotatif s'exprime en grade (G) qui est le produit du déséquilibre permissible (requis) et la vitesse angulaire.

La norme ISO 1940/1-1986 « Vibration mécanique, exigences de qualité des éléments rotatifs rigides » de 1986 (voir annexe) donne des indications sur le niveau d'équilibre permissible (G) pour chaque type d'équipements rotatifs.

### 1) Caractérisation du modèle de la contrainte de déséquilibre

Comme nous l'avons vu plus haut, les forces entraînant le déséquilibre contribue en grande partie à la diminution de l'espérance de vie des roulements.

Par exemple, si l'on considère un arbre tournant à 3600 TPM de masse  $m = 30$  g (0.3 Kg) et de rayon  $r = 30$  cm (0.30 m), le calcul de la force centrifuge (F) due au déséquilibre donnera :

$$F = mr\omega^2 = [mr(2.\pi.f)^2] / g = 0.402 mrf^2 \quad (55)$$

Où la fréquence  $f = 3600 \text{ TPM} / 60 \text{ min.} = 60 \text{ Hz}$

On obtient une force (**F**) due au déséquilibre :  $F = 0.402 * 0.3 * 0.3 * 60^2 = 130,25 \text{ Kg}$  (56)

**Donc, un déséquilibre de 30 grammes sur un rayon de 30 cm à 3600 tours par minute crée une force centrifuge effective de 130,25 Kg environ.**

Si l'on considère que les roulements sont conçus pour supporter 450 Kg, l'espérance de vie des roulements est inférieure de 50% de celle prévue à leur conception :

**Ainsi la durée de vie réelle est égale à la durée de vie estimée multipliée par la formule suivante :  $[\text{charge} / (\text{charge} + \text{déséquilibre})]^3$  (57)**

Dans notre exemple,  $[\text{charge} / (\text{charge} + \text{déséquilibre})]^3 = (450 / 580)^3$ , La durée de vie réelle représente ici 47% de la durée de vie estimée.

Ce petit calcul permet de mieux se rendre compte de l'impact d'un déséquilibre d'un arbre sur la durée de vie des roulements qui le supporte. Une installation précise aurait pu éviter ce déséquilibre.

## **2) Définition du modèle de la contrainte d'alignement**

Les forces produites par les vibrations dues à un mauvais alignement entraînent aussi des dégradations des joints, engrenages, couplages et autres éléments rotatifs pour lesquels des tolérances existent. L'utilisation d'équipement de précision (tels que des systèmes lasers) est nécessaire pour respecter les tolérances recommandées par les normes. Quelques tolérances de montage sont fournies dans le tableau 5 de la page suivante, permettant l'élaboration du modèle de contraintes et de surveillance des paramètres mécaniques.

Type de montage (Source General Motors)	Nombre maximum de Tours par minute	Tolérance du décalage horizontal et vertical (en micron)	Tolérance d'angularité en micron par rapport au diamètre de couplage
<b>Couplage court</b>	600	123	24.5
	900	130	17.15
	1200	61	12.25
	1800	49	7.35
	3600	25	4.90
	7200	12	2.45
<b>Couplage avec entretoise</b>	600	123	N/A
	900	44	N/A
	1200	29	N/A
	1800	22	N/A
	3600	15	N/A
	7200	4	N/A

*Tableau 5 : contraintes d'alignement selon le type de montage*

Une étude réalisée dans l'industrie pétrochimique a montré que la durée de vie moyenne des roulements était multipliée par 8 si l'alignement de précision était respecté. Ceci a pour effet de réduire les coûts de maintenance de 7% et d'augmenter la disponibilité des équipements de 17%, d'où l'intérêt de disposer de spécifications sur l'installation des équipements rotatifs.

## **3.2. Utilisation de modèles pour la reconstruction des systèmes**

### **3.2.1. Analyse des faits techniques**

L'analyse du retour d'expérience est un processus proactif par excellence. Elle implique l'inspection et la collecte d'information de tout élément défaillant (équipement, sous-ensemble, composant...) afin de déterminer les causes de leur défaillance.

Des analyses techniques peuvent en outre être menées afin de fournir plus de détails sur les causes de ces défaillances.

Cependant les programmes de maintien en condition opérationnelle se contentent d'identifier les équipements sujets à défaillance et d'y parer avant que cette défaillance ne se produise, sans rechercher à en comprendre les raisons fondamentales.

Reprenons l'exemple du roulement qui connaît une charge trop importante et donc une défaillance répétitive.

Si personne ne cherche à comprendre qu'elle est la raison de cette charge parasite, on ne découvrira pas qu'en fait cette charge est produite par un mauvais alignement au montage ; les conditions qui causent cette défaillance persisteront de manière récurrente, et nécessiteront des actions de maintenance inutiles et donc extrêmement coûteuses.

D'où l'intérêt de la recherche des causes fondamentales de défaillance d'un système et de l'utilisation de modèles multi-technologiques comme « étalons de mesure » (métrologie fonctionnelle) pour servir de référence à l'analyse des faits techniques (retour d'expérience).

### **3.2.2. Sûreté de fonctionnement**

La modélisation fonctionnelle permet d'intégrer un certain nombre de notions fiabilistes permettant de prédire et d'améliorer la disponibilité d'un système, pouvant aller jusqu'à la reconstruction de ce système ou tout au moins d'un équipement [R12]. Voyons dans ce qui suit quelle peut être la base de ces modèles fiabilistes.

#### **a. Le temps moyen de bon fonctionnement (mean time between failure – MTBF)**

Le MTBF doit être calculé à partir de données collectées provenant de l'historique des équipements enregistré dans les logiciels de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (par exemple le module QM de certains systèmes d'Entreprise Ressource Planning tel que SAP).

La fiabilité d'un équipement peut être exprimée par la formule suivante :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (58)$$

Où  $F(t)$  est la probabilité que le système ait une défaillance au temps  $t$ .  $F(t)$  est la fonction de distribution de la défaillance.

Si la variable aléatoire  $t$  a une fonction de densité  $f(t)$ , la fiabilité s'exprime alors par la formule :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (59)$$

Si l'on suppose que la durée pour atteindre la défaillance se décrit par une fonction de densité exponentielle de la forme :  $f(x) = 1/L(e^{-t/L})$  où  $L$  est la durée de vie moyenne et ( $t$ ) la période entre 2 défaillances considérées, la fiabilité à un temps ( $t$ ) est s'exprime par :

$$R(t) = e^{-t/L} \quad (60)$$

La durée de vie moyenne ( $L$ ) est la moyenne arithmétique des durées de vie de tous les éléments identiques considérés. La durée de vie moyenne ( $L$ ) pour les fonctions exponentielles est équivalente au temps moyen entre défaillance (MTBF) :

$$R(t) = e^{-t/MTBF} = e^{-Ft} \quad (61)$$

Où ( $F$ ) est le taux de défaillance instantané.

Si un système a un taux de défaillance constant, la fiabilité de ce système par rapport à sa durée de vie moyenne est de 0.37. Dans d'autres termes, il y a une probabilité de 37% que le système ne connaisse pas de défaillance pendant sa durée de vie moyenne.

La durée de vie moyenne ( $L$ ) et taux de défaillance ( $Fr$ ) sont donc reliés par :  $Fr = 1/L$  (62)

Le taux auquel les défaillances interviennent pendant un intervalle de temps donné est appelé le taux de défaillance à cet intervalle. Le taux de défaillance ( $Fr$ ) s'exprime donc par le rapport :

$$Fr = \text{Nombre de défaillances} / \text{Nombre d'heures total d'opération} \quad (63)$$

Considérons l'exemple suivant :

Equipement	Défaillance à (H)	Heures d'opérations après défaillance
1	75	525
2	125	525
3	130	525
4	325	525
5	525	525
<b>Total</b>	<b>1180</b>	<b>2625</b>

*Tableau 6: Données de calcul du temps moyen de bon fonctionnement d'un équipement*

Dans le tableau 6 ci-dessous, les 5 unités ont une durée totale d'opération de 525 heures. La première a connu une défaillance au bout de 75 heures, la seconde au bout de 125, la troisième au bout de 130, la quatrième au bout de 325 heures et la cinquième n'a pas connu de défaillance pendant les 525 heures d'opérations (on considère que la défaillance pour cette cinquième unité a eu lieu au bout de 525 heures).

Le nombre total d'heures d'opération est donc le nombre d'heures d'opération avant défaillance des 5 unités, soit 1180 heures, plus le nombre d'heures d'opération après défaillance, soit 2625 heures. On obtient : 3805 heures.

**Le taux de défaillance est donc :**

$$Fr = 5/3805 = 0.001314 \text{ défaillance / heure} \quad (64)$$

Si l'on considère une **distribution exponentielle**, le temps moyen entre 2 défaillances, MTBF est :

$$\text{MTBF} = 1/Fr = 1/0.001314 = 761 \text{ heures} \quad (65)$$

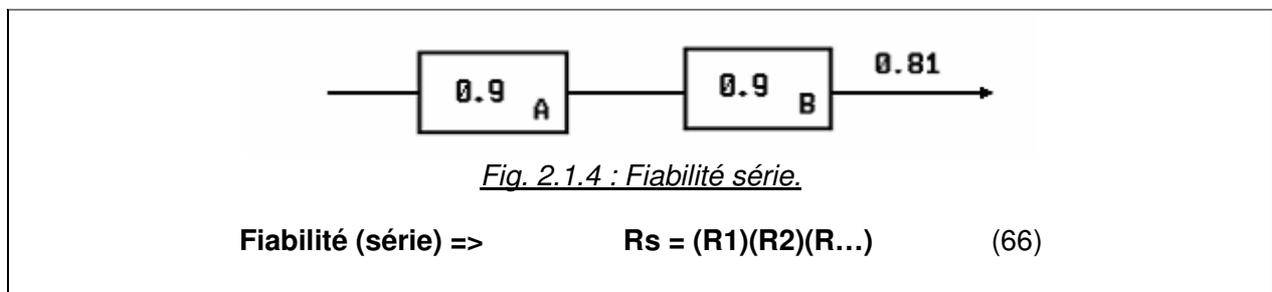
Dans l'hypothèse d'une distribution exponentielle négative, le taux de défaillance est supposé relativement constant pendant la durée d'opération normale du système si la conception du système est à maturité. C'est-à-dire que le système est exploité après la période de mortalité

infantile de diminution du taux de défaillance et soit avant la zone d'usure d'augmentation du taux de défaillance ou soit, dans la majorité des cas, dans une période où l'augmentation du taux de défaillance n'existe pas.

## b. Relations entre composants en fiabilité

### a) Réseaux séries

Dans un réseau en série, chaque composant est un unique point de défaillance (figure 2.1.4 et formule (66)). Par exemple, prenons le cas d'une ligne d'emballage. Normalement il n'y a qu'une seule « étiqueteuse » pour chaque ligne d'emballage. Si l'« étiqueteuse » a une défaillance, la ligne s'arrête.

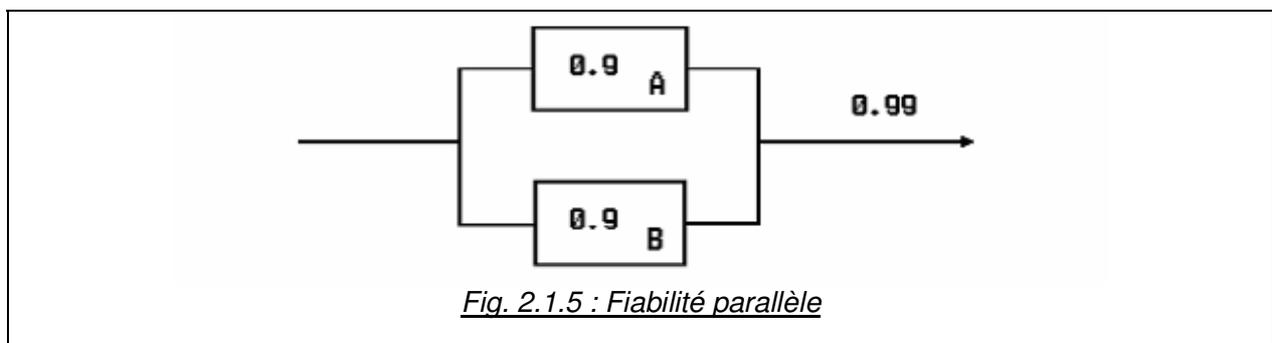


La fiabilité d'une configuration « série » opérant dans une période de temps connue peut être dérivée :

$$R_s = e^{-(R_1+R_2+R_{...})} \quad (67)$$

### b) Réseaux parallèles

Dans un réseau parallèle, de nombreux équipements redondants existent (figure 2.1.5 et formule (67)). Par exemple, si l'on reprend le cas des lignes d'emballage, on peut imaginer qu'il y en a plusieurs travaillant en parallèle.



<b>Fiabilité (parallèle) =&gt; <math>R_p = R_1 + R_2 - (R_1)(R_2)</math> (67)</b>
---

Si le réseau est constitué de 2 unités en parallèle.

Dans le cas de 3 unités en parallèle, la fiabilité devient :

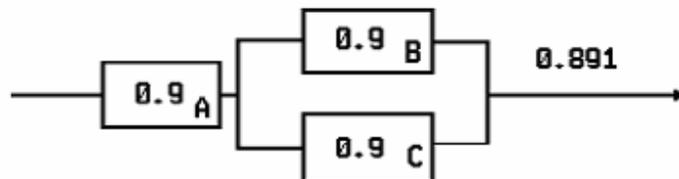
$$R_p = 1 - (1-R_1)(1-R_2)(1-R_3) \quad (68)$$

Enfin, la mise en parallèle de « n » composants tous identiques donnera :

$$R_p = 1 - (1-R)^n \quad (69)$$

### c) Réseaux séries – parallèles

Le schéma de la figure 2.1.4 et la formule (70) ci-dessous montrent un exemple de calcul de la fiabilité d'un système dont les composants sont montés à la fois en série et en parallèle. Comme pour les circuits électriques, l'analyse de la portion montée en parallèle est effectuée pour déterminer un équivalent et la combinaison de tous les éléments en série est faite.



*Fig. 2.1.6 : Fiabilité combinaison série et parallèle.*

$$R_t = R_a.R_{bc} \quad (70)$$

### c. Modéliser la disponibilité

#### a) La disponibilité inhérente (Ai)

C'est la probabilité qu'un système ou qu'un équipement soit utilisé dans des conditions environnementales et de support idéales à tout moment. Elle exclut toute action de maintenance préventive ou programmée (PMT) et délais logistiques et administratifs (ALT). Seul les temps moyens de réparation sont pris en compte (MTTR) :

$$A_i = [1 - (MTBF / MTTR)] \times 100 (\%) \quad (71)$$

**b) La disponibilité réelle (Aa)**

C'est la probabilité qu'un système ou qu'un équipement soit utilisé dans des conditions environnementales et de support idéales à tout moment. Les actions de maintenance préventive programmée (PMT) sont prises en compte, mais les délais administratifs et logistiques sont exclus :

$$A_a = [1 - (MTBF / MTTR + PMT)] \times 100 (\%) \quad (72)$$

**c) La disponibilité opérationnelle (Ao)**

C'est la probabilité qu'un système ou qu'un équipement soit utilisé dans des conditions environnementales et de support idéales à tout moment. Elle inclut tous les temps de maintenance, les délais logistiques et administratifs :

$$A_o = [1 - (MTBF / MTTR + PMT + ALT)] \times 100 (\%) \quad (73)$$

-----

Dans ce chapitre présentant la modélisation comme un outil du maintien en condition opérationnelle des systèmes multi-technologiques, nous sommes passés du mode de défaillance aux modèles de défaillance en introduisant la notion de modélisation des contraintes d'exploitation de ces systèmes, et avons discuter des avantages attendus d'une maintenance modélisable tout d'abord prédictive puis proactive.

Pour ce faire nous avons introduit la notion de « métrologie fonctionnelle », présenter quelques domaines technologiques et de modèles de surveillances de paramètres électriques ne faisant pas uniquement appel aux techniques électriques.

Enfin nous avons tenté de définir comment les modèles multi-technologiques pouvaient concourir à l'exploration conditionnelle des systèmes afin de contrôler la récurrence de défaillances, d'améliorer la fiabilité et la sûreté de fonctionnement et de permettre la reconstruction de ces systèmes.

## **CHAPITRE 2 : APPLICATION DE LA LOGISTIQUE DE LA MODELISATION AU MAINTIEN EN CONDITION OPERATIONNELLE DES SYSTEMES MULTI-TECHNOLOGIQUES**

### **Introduction**

La planification stratégique et opérationnelle des études systèmes amont que nous avons vue dans la première partie de cette thèse trouve une seconde application dans la recherche pour l'optimisation du maintien en condition opérationnelle des systèmes multi-technologiques.

Dans ce chapitre, nous allons donc appliquer cette méthode dans le cadre de l'amélioration des performances en terme de disponibilité technique opérationnelle et maîtrise de coûts de maintenance d'un équipement embarqué à bord d'un navire destiné à fournir en énergie une chaîne de transmission radioélectrique.

Cette application s'effectue en deux étapes ; la première consiste en une analyse technico-fonctionnelle de l'équipement, et la seconde étape est une exploration des contraintes opérationnelles dans lesquelles cet équipement est exploité.

Nous verrons au cours de cette deuxième étape que la modélisation offre une certaine utilité dans le cadre de la recherche du rétablissement de la disponibilité technique opérationnelle (DTO) d'équipements existants et pour la maîtrise de leur coût d'exploitation et de maintenance (coût global de possession).

### **1. Analyse technico-fonctionnelle**

Cette première analyse a pour objet de décrire les fonctions du système considéré en faisant intervenir les éléments physiques qui le composent.

L'intérêt de cette analyse est de fournir une arborescence fonctionnelle et technique permettant de prendre en considération la mission et les fonctions du système.

Ainsi, si une défaillance d'un élément du système est observée, cette défaillance est analysée en terme de défaillance de la fonction de cet élément, qui se traduit par une altération des performances du système ou d'une cessation complète de l'accomplissement d'une fonction.

Nous avons vu dans la première partie de cette thèse, que la frontière entre les différentes fonctions n'était pas chose aisée à déterminer. Il appartient donc à l'analyste de déterminer les « frontières fonctionnelles » du système considéré (si par exemple, ces frontières n'ont pas été définies à la conception).

Dans notre exemple d'application, nous prenons le cas d'un module redresseur dont la mission est de fournir une tension constante et protégée de 48 volts à une chaîne de télécommunication.

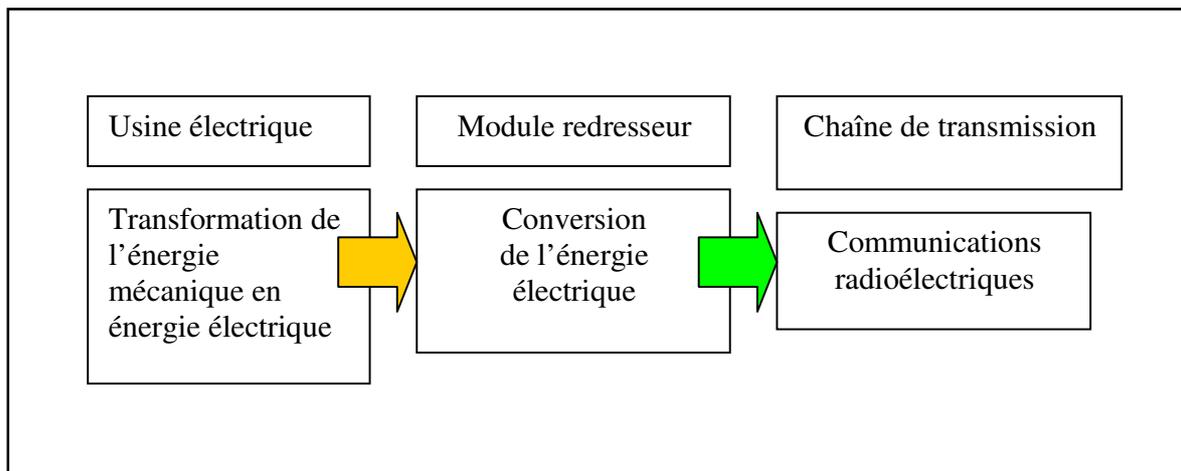
## 1.1. Place du module dans la chaîne

Il est à noter que la « mission » du module redresseur représente en fait une « fonction » d'un système de transmission de niveau « supérieur ».

La tension constante de 48V est une norme en matière de conversion d'énergie pour les télécommunications. Cette tension est aussi « protégée » car le module redresseur doit assurer une réserve d'énergie en cas de coupure de l'alimentation principale.

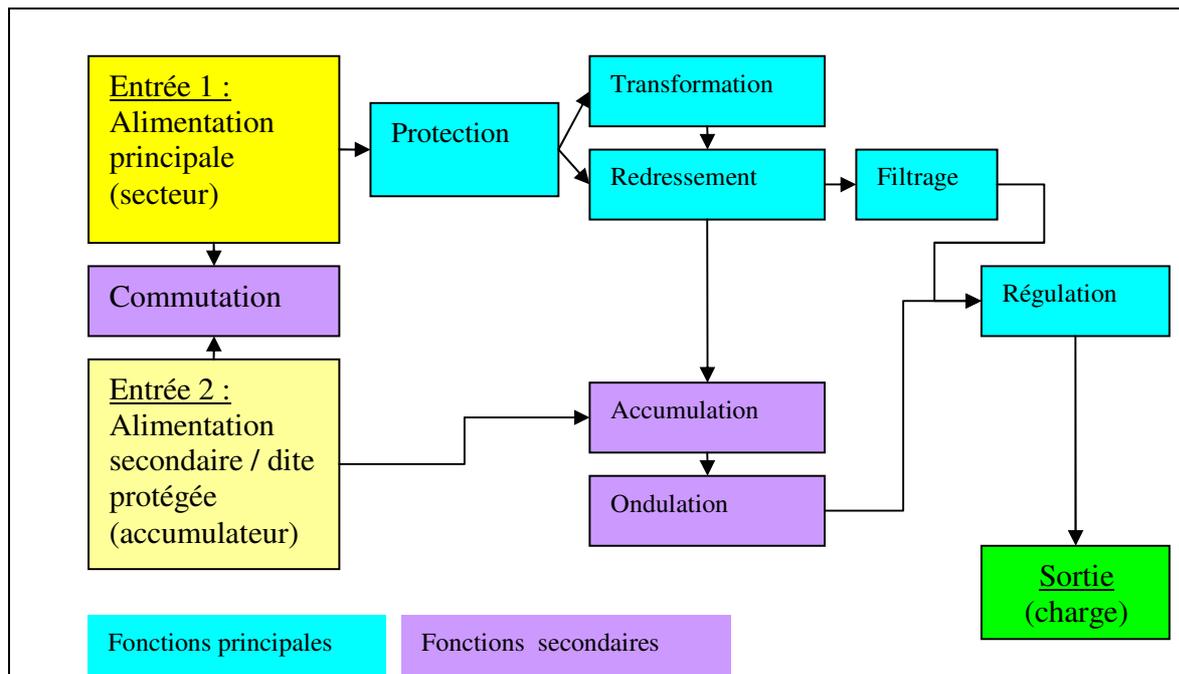
S'agissant d'un matériel embarqué à bord d'un navire, l'alimentation principale du module redresseur est fournie par l'usine électrique du bord composée de groupes électrogènes (moto alternateurs).

Le système complet peut donc schématiquement se présenter de la manière suivante (figure 2.2.1) :



*Fig. 2.2.1 : Représentation systémique du module redresseur*

Dans cette étude nous ne nous intéressons qu'aux fonctions principales du module redresseur. Le schéma de principe de la figure 2.2.2 de ce module peut donc se présenter de la manière suivante :



*Fig. 2.2.2 : Schéma de principe (fonctionnel complet) du module redresseur*

## 1.2. Description des fonctions

### 1.2.1. Les fonctions principales

La **protection** permet d'assurer le bon fonctionnement de la transformation et du redressement.

La **transformation** du signal sinusoïdal (1) d'entrée fournit un signal de sortie de même nature mais compatible à la charge.

Le **redressement** débarrasse ce signal d'entrée de ses alternances négatives.

Le **filtrage** du signal obtenu permet d'éliminer ses hautes fréquences.

Enfin, la **régulation** du signal transformé, redressé et filtré permet d'utiliser sa valeur efficace par la charge.

### 1.2.2. Les fonctions secondaires

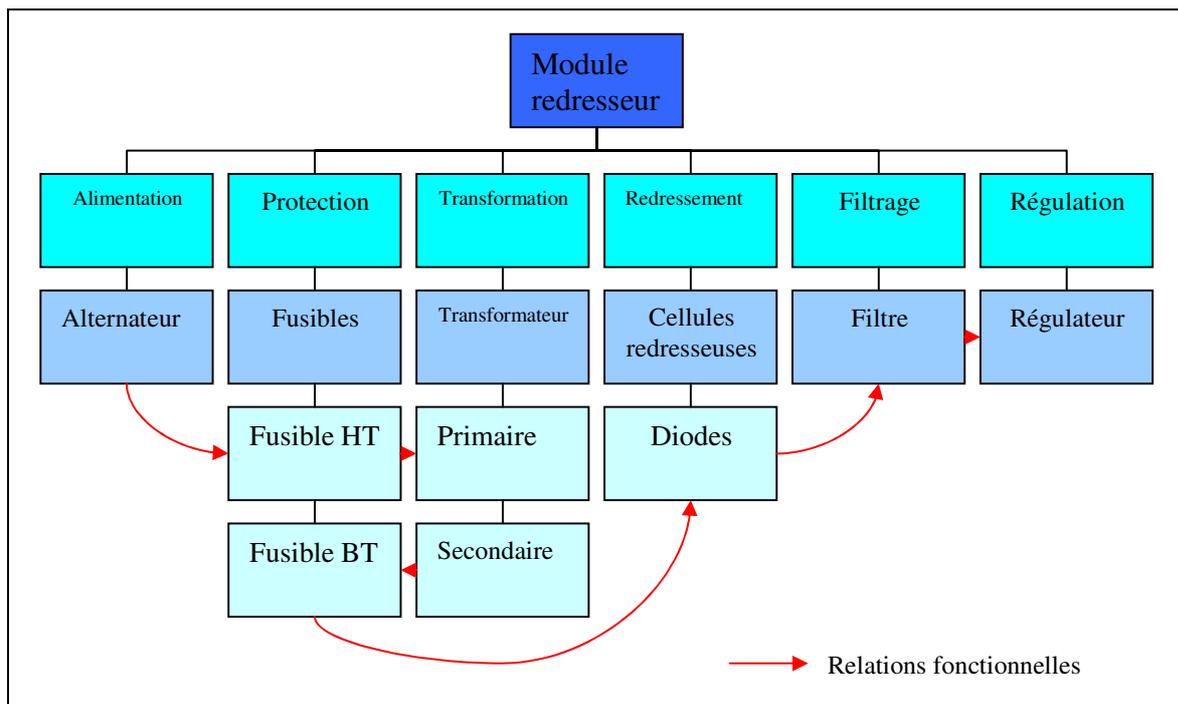
La fonction principale « redressement » participe à l'**accumulation** d'une réserve d'énergie.

La **commutation** permet le passage d'un signal sinusoïdal d'entrée (1) fourni par l'alimentation principale en un signal continu (2) provenant de l'accumulation d'énergie.

L'**ondulation** du signal continu permet à la régulation d'utiliser la valeur efficace de ce signal par la charge.

### 1.3. Arborescence technico-fonctionnelle

Dans le cadre de cette étude, l'arborescence technico-fonctionnelle se limite volontairement aux fonctions principales du module redresseur et car nous verrons plus loin que la recherche d'amélioration de performances n'intéresse que ce groupe de fonctions (figure 2.2.3).



*Fig. 2.2.3 : Arborescence technico-fonctionnelle (simplifiée)*

#### 1.3.1. Le concept de maintenance et l'arborescence logistique

L'arborescence logistique est issue de l'arborescence technico-fonctionnelle que nous venons de voir plus haut et du concept de maintenance.

Elle a pour objet de déterminer les éléments susceptibles de défaillance et donc de déterminer les unités (matérielles) remplaçables en ligne (URL) et celles réparables en atelier (URA).

La différence entre URL et URA provient de la « complexité » technique de l'élément matériel à remplacer ou à réparer. Le concept de maintenance détermine cette différence en fonction du compromis « DTO / Coût » (disponibilité technique opérationnelle et coût d'exploitation et de maintenance).

Enfin, « concept de maintenance » et « arborescence logistique » permettent l'élaboration de ce que l'on appelle le « Plan de Maintenance ». Ils constituent en quelque sorte le « savoir » et « l'avoir » pour « gérer » le système.

Dans le cas de notre module redresseur, le concept de maintenance peut revêtir deux formes : on peut considérer le module lui-même comme une unité remplaçable en ligne et réparable en atelier, à savoir à la fois une URL et URA.

Dans cette hypothèse, le compromis « Disponibilité / Coût » n'est pas optimum. En effet, même si la disponibilité technique opérationnelle semble satisfaisante, les coûts induits par la mobilisation de stocks de modules redresseurs et les coûts « logistiques » dus au transfert de ces modules dans les ateliers qui vont procéder à leur réparation sont élevés. En outre, les temps de remplacement d'un module défectueux par un autre module restent incompressibles. Intuitivement, on ressent que cette voie n'est pas la meilleure car elle n'offre aucune optimisation possible.

En revanche, l'analyse un peu plus poussée du retour d'expérience peut montrer que les défaillances connues par le module redresseur montrent une faiblesse dans les performances de certaines fonctions. Par exemple, il s'avère que de nombreuses pannes ont pour origine le dispositif de protection du module redresseur et que les nombreuses défaillances proviennent de contraintes opérationnelles (notamment thermiques) dans lesquelles est exploité le module.

Ainsi, le fusible Basse Tension, dont l'objet est de protéger les cellules redresseuses (diodes) du module, a tendance à « sauter » d'une manière intempestive entraînant la défaillance de ce module et ce à cause de la température excessive régnant à l'intérieur de son boîtier.

Dans ce cas, les unités remplaçables en ligne (URL) sont les fusibles du module redresseur. En terme de compromis « Disponibilité / Coût », on constate que même si le coût d'immobilisation des stocks de fusibles restent largement moins élevé que ceux pour l'immobilisation de modules redresseurs, la disponibilité technique opérationnelle des modules est loin d'être satisfaisante...

En effet, la disponibilité technique opérationnelle est fonction :

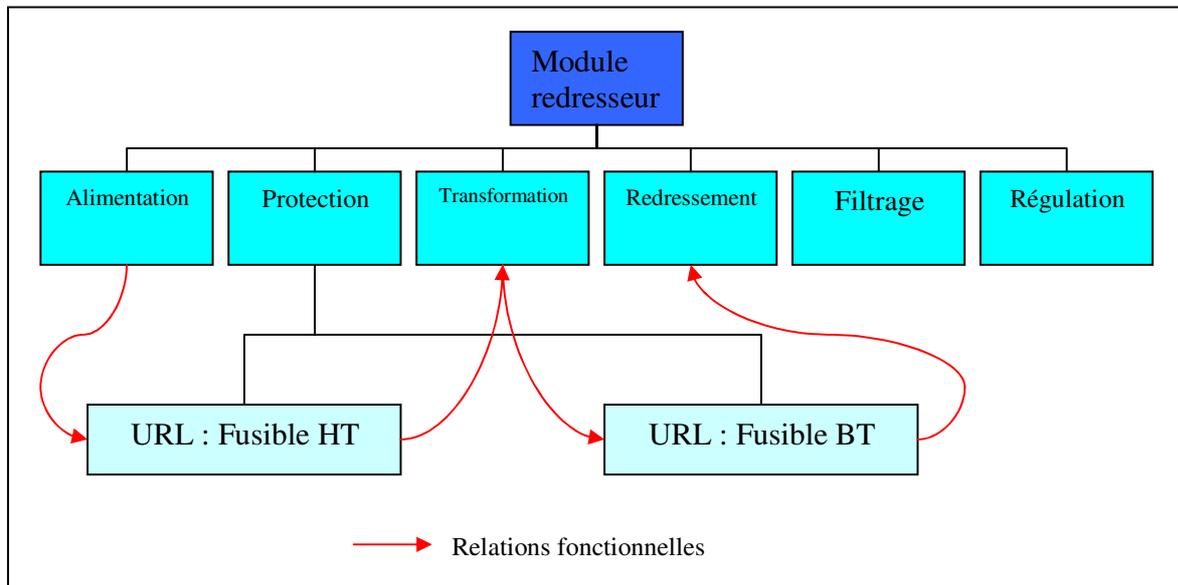
- du temps moyen de bon fonctionnement du module,
- des temps moyen de réparation
- et des temps administratifs et logistiques nécessaires à son maintien en condition opérationnelle.

Ainsi des remplacements intempestifs de fusibles entraînent des temps et donc des coûts d'indisponibilité. Mais à l'inverse de la première solution voulant remplacer les modules défectueux dans leur globalité et de les faire réparer en atelier, cette solution semble intuitivement plus adaptée.

Le compromis « Disponibilité / Coût » doit donc être trouvé dès la définition du concept de maintenance. Cependant, même si ce concept est défini en fonction des conditions opérationnelles, il se trouve que ces conditions sont bien généralement fixées par des critères « théoriques » lors de la conception.

En effet, seule l'expérience offre toute la gamme des critères de performance et couvre tous les modes de défaillance (souvent insoupçonnés au moment de la conception). Cependant, à défaut d'expérience concrète, la modélisation permet d'appréhender ce que pourrait être les contraintes opérationnelles d'un système en conception ou d'un système existant afin d'en optimiser son exploitation.

Le schéma suivant (figure 2.2.4) présente une arborescence dite « logistique » du module redresseur. Les fonctions restent le point de départ pour déterminer les éléments logistiques que constituent les unités remplaçables en ligne (URL) du dispositif de protection (fusibles HT et BT) et les relations fonctionnelles entre ce dispositif et les autres dispositifs du module.



*Fig. 2.2.4 : Arborescence logistique (simplifiée)*

### 1.3.2. L'exploration conditionnelle

L'exploration conditionnelle complète l'analyse du retour d'expérience en recherchant les causes « profondes » de défaillance en tenant compte des contraintes opérationnelles et afin d'apporter des éléments directeurs d'actions correctives.

C'est cette exploration conditionnelle qui a permis de déterminer le lien de cause à effet entre la température élevée à l'intérieur du boîtier des modules redresseurs et de la « défaillance » du système de protection...

Il est à noter que le terme « défaillance » doit être mis entre guillemets... En effet, il ne s'agit pas d'une défaillance à proprement parler du système de protection puisque celui-ci remplit son rôle sans aucune « défaillance »... Il y aurait eu réellement défaillance si les cellules redresseuses avaient été endommagées par le non fonctionnement du dispositif de protection.

La défaillance est donc provoquée par une température excessive dans le boîtier. La recherche de la solution ne se trouve donc pas obligatoirement dans une modification du dispositif de protection par changement du calibre des fusibles (ce qui pourrait même être dangereux) mais dans la recherche d'une diminution de la température à proximité de l'enveloppe du fusible BT.

## **2. Place de la modélisation dans l'optimisation du compromis « Disponibilité/Coût »**

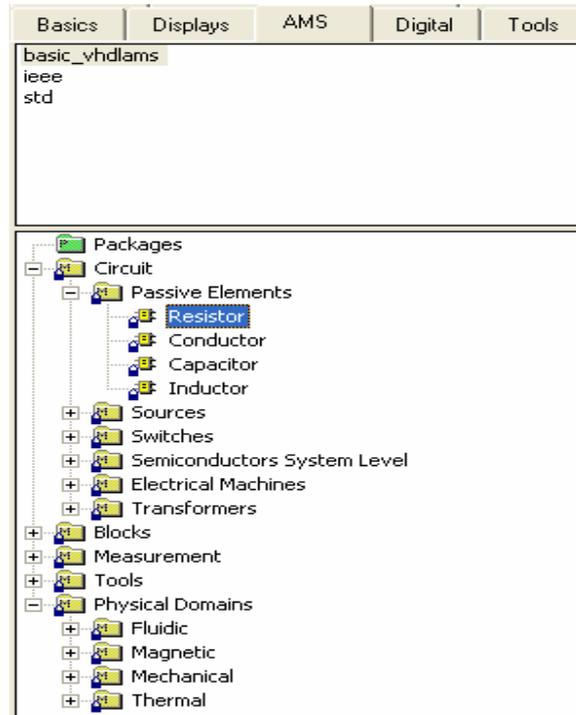
### **2.1. Modélisation des fonctions élémentaires et « re-use » de modèles**

L'objectif de cette étude est, nous le rappelons, la logistique de la modélisation. Le but recherché n'est pas (principalement) de construire des modèles mais plutôt d'utiliser et d'adapter des modèles déjà existants (« re-use »).

Ainsi, les fonctions élémentaires du module redresseur peuvent donc être décrites à partir de modèles existants.

Nous avons vu dans la première partie de cette thèse quelques exemples de modélisation VHDL-AMS avec le compilateur BVHDLA, le simulateur électrique SPICE, et nous avons aussi discuté de « l'encapsulation » de ces modèles dans FLASH Schématique.

La modélisation VHDL-AMS répondant à une norme lui conférant un caractère de portabilité, notre choix s'est porté sur des modèles VHDL-AMS développés dans Simplorer® [R26], car la bibliothèque de modèles de base constitue un très bon point de départ pour l'approche fonctionnelle comme le montre la figure 2.2.5 de la page suivante.



*Fig. 2.2.5 : Le « Model Agent » de Simplorer®*

En effet, les modèles VHDL-AMS développés utilisent une logique de modélisation « fonctionnelle », logique que nous recherchons car à la fois simple et suffisante pour décrire :

- d'une part les fonctions du système ou de l'équipement considéré,
- et d'autre part, les contraintes environnementales venant altérer les performances de ces fonctions,

et ceci afin de définir des axes d'étude pour l'amélioration ou le rétablissement de la disponibilité technique opérationnelle et donc la maîtrise des coûts de possession de ce système ou équipement.

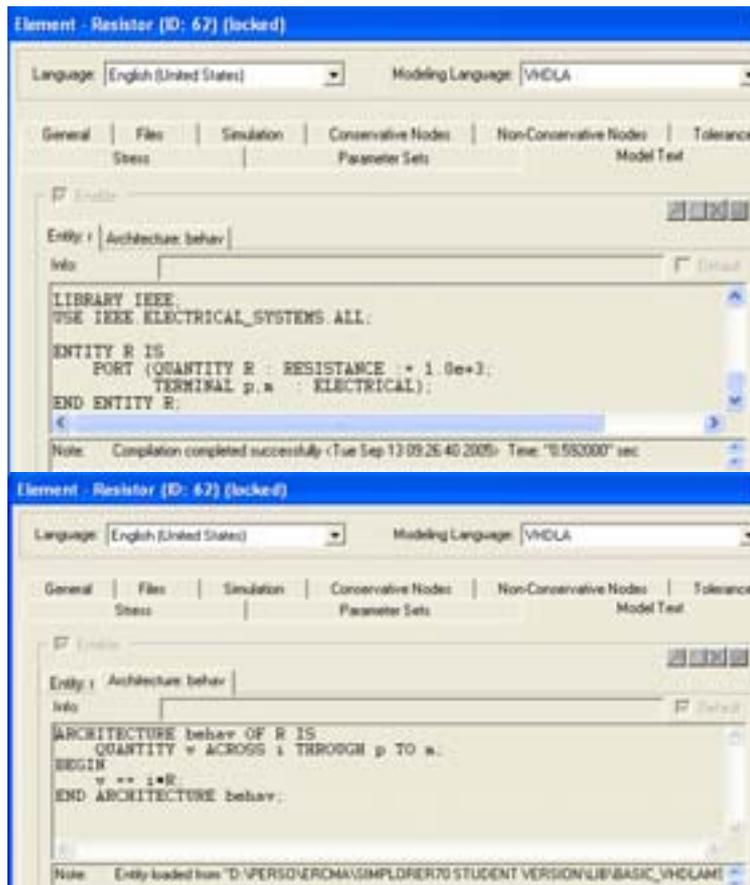
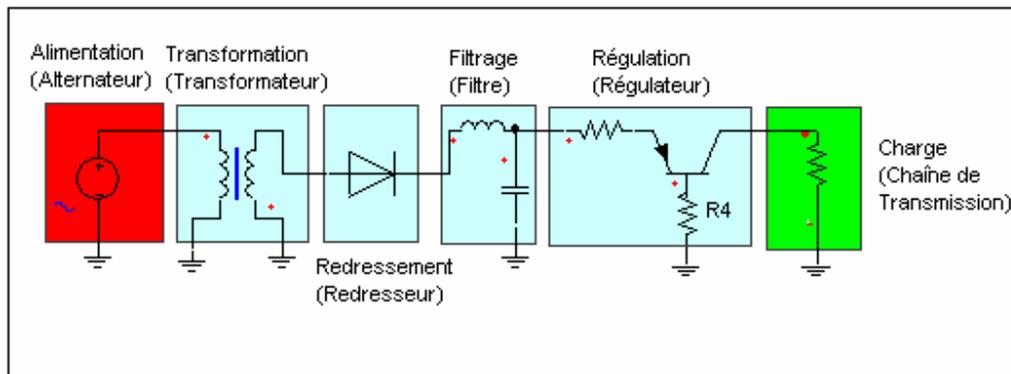


Fig. 2.2.6 : Description de l'ENTITÉ et de l'ARCHITECTURE d'un modèle fonctionnel de résistance par Symplorer®

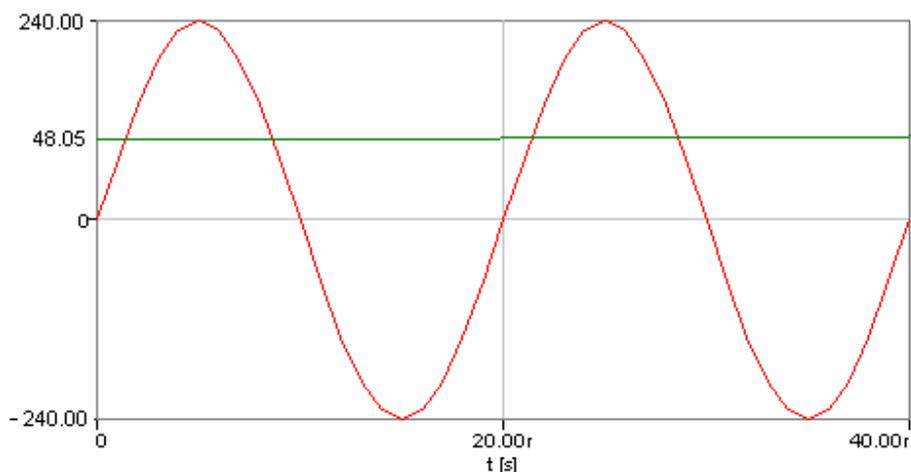
La figure 2.2.6 présente comment sont décrites les entités et les architectures des modèles VHDL-AMS dans Symplorer®, et en l'occurrence le modèle fonctionnel d'une résistance.

L'assemblage et la simulation des modèles fonctionnels dans la schématique de Symplorer® ont permis de simuler le fonctionnement du module redresseur.

Le schéma de la figure 2.2.7 ci-dessous présente une description possible en fonction du but recherché, à savoir la transformation, le redressement, le filtrage et la régulation d'un signal d'entrée de forme sinusoïdale d'une amplitude de 240 V et de fréquence 50 Hz en un signal continu de 48 V. Le résultat de simulation est montré à la figure 2.2.8 à la page suivante.



*Fig. 2.2.7 : Schéma de principe du module redresseur*



*Fig. 2.2.8 : Résultat de simulation*

## 2.2. Modélisation fonctionnelle des contraintes opérationnelles

L'exploration conditionnelle du module redresseur a permis d'indiquer que la contrainte thermique à proximité du fusible B.T composant la fonction de protection des cellules redresseuses provoquait une fusion intempestive de ce fusible.

En pratique, la protection des diodes contre les courts-circuits est assurée par un fusible ultra-rapide. Le temps de fusion de ce fusible doit être strictement inférieur au temps de fusion des semi-conducteurs. La contrainte thermique du fusible ultra-rapide  $(I^2t)_{UR}$  se doit donc d'être inférieure à la contrainte thermique  $(I^2t)_{SC}$  des semi-conducteurs.

La contrainte thermique est donc le premier paramètre à prendre en compte dans le calcul d'un dispositif de protection. La limite de destruction des semi-conducteurs est donnée par une contrainte thermique maximale admissible. D'une manière empirique, pour que la protection soit efficace, il faut que la contrainte thermique du fusible soit d'environ 20% inférieure à la fusion des semi-conducteurs.

On pose donc la formule suivante :

$$(I^2t)_{UR} = 0,8 (I^2t)_{SC} \quad (74)$$

### 2.2.1. Définition des performances fonctionnelles (Métrologie fonctionnelle du dispositif)

D'une manière générale, le calibre d'un fusible ultra-rapide est donné par le constructeur à une température ambiante de 20°C.

Le courant maximum d'utilisation, que nous noterons (**Ib**) doit donc être corrigé en fonction des 3 paramètres suivants :

- l'intensité de coupure du fusible (calibre) : (**In**)
- la température en degrés Celsius de l'air à proximité de l'enveloppe du fusible : (coefficient **Kt**)
- la vitesse de l'air de refroidissement en mètre par seconde : (coefficient **Kv**)

Fort de ces considérations, on peut poser la formule du courant maximum d'utilisation (**Ib**) de la manière suivante :

$$(Ib) = (Kt).(Kv).(In) \quad (75)$$

et donner les valeurs remarquables de Kt et Kv en fonction de leurs paramètres respectifs, à savoir la température et la vitesse de l'air.

#### a) Valeurs remarquables de Kt (coefficient de température)

<b>Température en °C</b>	-20°	0°	20°	40°	60°
<b>Coefficient Kt</b>	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8

*Tableau 7 : Valeurs remarquables du coefficient de températures*

**b) Valeurs remarquables de Kv (coefficient de vitesse de l'air)**

Le coefficient Kv, fonction de la vitesse de circulation de l'air à proximité de l'enveloppe du fusible se détermine de la manière suivante :

Si la vitesse (v) de l'air est inférieure à 5m/s, on a :  $Kv = 1 + 0,05.v$ . Si cette vitesse est au moins égale à 5m/s, on a :  $Kv = 1,25$ .

Vitesse de l'air en m/s	1	2	3	4	5
Coefficient Kv	1.05	1.1	1,15	1.2	<b>1.25</b>

*Tableau 8 : Valeurs remarquables du coefficient de vitesse de l'air*

**c) Valeurs remarquables du courant maximum d'utilisation (Ib) en fonction de la température à proximité de l'enveloppe du fusible et de la vitesse de circulation de l'air.**

Lors de la conception du module redresseur, le calibre du fusible a été déterminé à une valeur de 35A et ce en fonction d'une température de fonctionnement de 40°C avec une circulation d'air de 2m/s dans le boîtier.

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs de (Ib), le courant maximum d'utilisation en fonction de la température réelle (observée lors de l'exploration conditionnelle) qui se rapproche plus de 60°C que de 40°C et qui explique la « défaillance » du module redresseur (due à la fusion prématurée du fusible).

(Ib) fonction de la température et de la vitesse de l'air	20 °C	40 °C	60 °C
<b>1m/s</b>	37A	33A	29A
<b>2m/s</b>	39A	<b>35A</b>	<b>31A</b>
<b>3m/s</b>	40A	36A	32A
<b>4m/s</b>	42A	38A	34A
<b>5m/s</b>	44A	39A	<b>35A</b>

*Tableau 9 : Courant maximum d'utilisation en fonction de la température et de la vitesse de l'air*

En première approche, à la lecture de ce tableau, on constate que le postulat d'une température maximale de 40°C et d'une vitesse de circulation de l'air de 2m/s semblait correct.

En effet, si l'on considère le rapport du courant maximum d'utilisation sur le calibre du fusible, on obtient :  $(I_b)/(I_n) = (K_t).(K_v) = 0,9 \times 1,1 = 0,99$  (76), soit une valeur très proche de 1.

Cependant, comme nous l'avons dit précédemment, la température régnant dans le boîtier du module redresseur s'avère être égale (et parfois même supérieure) à 60°C, pour une vitesse de circulation d'air toujours égale à 2m/s.

On constate donc que la valeur du courant maximum d'utilisation n'est plus que de 31 ampères, alors que la valeur efficace du courant débité reste toujours proche de 35 ampères.

En revanche, ce tableau nous permet d'apercevoir que si, pour une température de 60°C, on augmente la vitesse de circulation de l'air, le courant maximum d'utilisation augmente lui aussi, pour atteindre la valeur de 35 ampères.

$$(I_b)/(I_n) = (K_t).(K_v) = 0,8 \times 1,25 = 1 \quad (77)$$

### 2.3. Le modèle de contrainte opérationnelle comme modèle fonctionnel d'un dispositif

Les données « métrologiques » d'une fonction prise dans son contexte opérationnel permettent de bâtir un modèle fonctionnel simple.

Ce modèle possède une double utilité :

- il permet tout d'abord de **simuler la contrainte environnementale** dans laquelle évolue l'équipement,
- il permet ensuite de définir la fonction attendue d'un dispositif dans son contexte environnemental et ainsi d'**initier des actions correctives**.

#### 2.3.1. Le modèle fonctionnel

Il est important de rappeler que l'un des objectifs de la logistique de la modélisation est le « re-use » de modèles et non pas la création à proprement parler de modèles.

En effet, le « créateur de modèles » a « un métier » [R03] différent de celui du « logisticien » de la modélisation qui, même s'il se doit de participer à la spécification de nouveaux modèles, a pour tâche essentielle d'utiliser des modèles déjà existants et de constituer des bibliothèques utiles à l'amélioration du maintien en condition des systèmes multi-technologiques.

Le rôle du « logisticien » de la modélisation est aussi de montrer que l'emploi de modèles, et notamment de modèles fonctionnels, reste une discipline accessible favorisant la compréhension du fonctionnement parfois complexe de systèmes et des contraintes dans lesquels évoluent ces systèmes, et joue un rôle dans le transfert de compétence.

Le modèle présenté ci-dessous cherche à montrer le lien que nous avons vu précédemment entre la vitesse de la circulation d'air dans le module redresseur et le courant maximum d'utilisation.

```

----- VHDLAMS MODEL cmu -----
-- Définition du courant maximum d'utilisation en fonction de la
vitesse de circulation de l'air et de la température-----
-----

LIBRARY ieee;
USE    ieee.math_real.ALL;
USE    ieee.electrical_systems.ALL;

----- ENTITY DECLARATION cmu -----
-

ENTITY cmu IS
GENERIC (kt0 : real := 1.1;
         kv0 : real := 1.0;
         iin : real := 35.0);
PORT (   TERMINAL (terminal n1, n2 : electrical);
        QUANTITY Ib : OUT real) ;

-- Ib est le courant maxi d'utilisation
END ENTITY cmu;

----- ARCHITECTURE DECLARATION arch_cmu -----
-
ARCHITECTURE arch_cmu OF cmu IS

QUANTITY kt, kv : real;
QUANTITY v across ib through n1 to n2;

BEGIN

kt==0.8;
-- Faire varier Kt en fonction de la température
-- Kt => 0.8 pour 60°C ; 0.9 pour 40°C; 1.0 pour 20°C

    if (v<=5.0) use
        kv == (1.0 + 0.035*v + 0.003*v*v);
-- Kv (fonction de la vitesse, dépend du temps)

    else
        kv == 1.25 ;
    end use;
ib == kt*kv*iin;

END ARCHITECTURE arch_cmu;

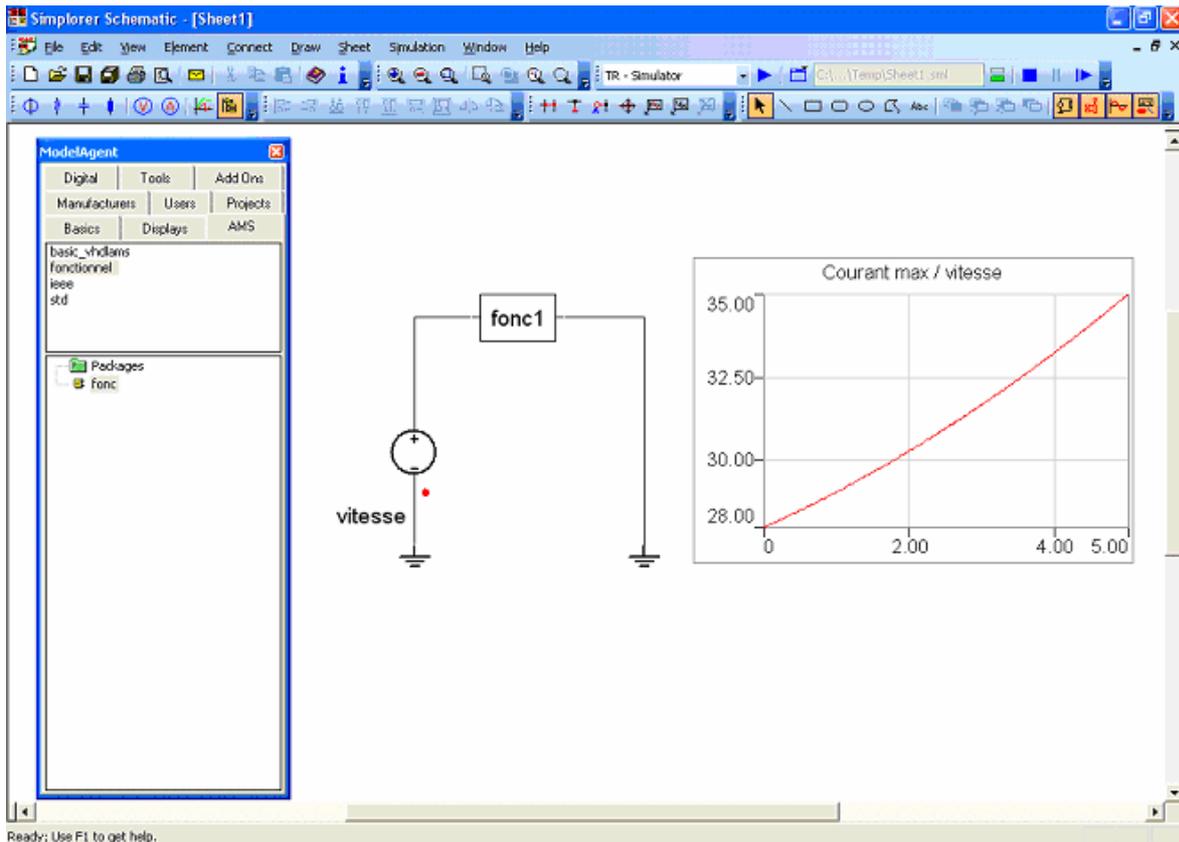
----- END VHDLAMS MODEL cmu -----

```

L'écran de la figure 2.2.9 nous fournit le résultat de simulation de ce modèle :

L'axe des abscisses représente la vitesse de circulation de l'air en mètre par seconde.

L'axe des ordonnées représente l'intensité du courant maximum d'utilisation, en fonction de la température (ici 60 °C) et pour une intensité initiale de 35A.



*Fig. 2.2.9 : Ecran Simplorer (schéma du modèle et résultat de simulation)*

Ce petit modèle montre qu'à une température de l'ordre de 60°C à l'intérieur du module redresseur et lorsque la vitesse de circulation de l'air est inférieure à 5 m/s, il y a un risque potentiel de détérioration du fusible car le courant maximum admissible d'utilisation d'un fusible de 35A est inférieur à sa valeur nominale.

### 2.3.2. Les actions correctives

Comme nous venons de le voir, une augmentation de la vitesse de circulation de l'air lorsque la température à proximité de l'enveloppe du fusible est de 60°C permet d'atteindre la valeur du courant maximal d'utilisation que l'on recherche (35A).

En pratique, une vitesse de circulation d'air de 5m/s correspond à un boîtier ventilé. Ainsi l'engagement d'une action corrective voulant introduire dans le boîtier du module redresseur un micro-ventilateur afin d'augmenter la circulation de l'air à proximité de l'enveloppe du fusible constitue une solution envisageable, pour les 3 raisons suivantes :

- 1) la disponibilité technique opérationnelle du module redresseur est rétablie ; en effet, les temps de maintenance dus à la défaillance intempestive de ce module sont réduits.
- 2) Les coûts générés par la « reconstruction » de l'enveloppe du module par l'addition d'ouïes d'aérations et d'un micro-ventilateur sont jugulés dans le temps par la diminution des interventions des maintenanciers et des délais administratifs et logistiques qui constituent une part importante du coût global de possession du module redresseur.
- 3) Le compromis « Disponibilité/Coût » est donc respecté, et ce sans toucher aux principes propre de fonctionnement du module redresseur qui aurait voulu un changement de calibre des fusibles pour assurer sa protection.

-----

## **Conclusion du chapitre 2 :**

Dans cet exemple d'application nous avons utilisé la méthode de planification des études amont pour la conception de systèmes multi-technologiques décrites dans la première partie de cette thèse, et l'avons appliqué au maintien en condition opérationnelle.

Cette étude s'est faite en deux phases ; tout d'abord par une analyse technico-fonctionnelle d'un équipement puis une analyse logistique dans laquelle nous avons introduit les notions de concept de maintenance, d'arborescence logistique et de plan de maintenance, qui constitue l'« avoir, savoir, gérer » de tout système multi-technologique en exploitation.

Ensuite, nous avons vu la place de la modélisation dans la recherche de l'optimisation du compromis « Disponibilité / Coût » de l'équipement par le « re-use » de modèles et nous avons créé un modèle de contraintes environnementales.

Enfin, nous avons mentionné les actions correctives que permettait la compréhension du modèle, et ceci pour améliorer la disponibilité technique opérationnelle, la maîtrise des coûts d'exploitation et de maintenance et enfin le compromis entre disponibilité et coûts.

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

L'objectif initial de cette thèse a été de montrer que l'utilisation de la modélisation intégrée à une démarche logistique pouvait offrir un avantage concurrentiel pour la conception de systèmes multi-technologiques.

Tout d'abord, un avantage en terme de délai de conception de par une forte intégration de la démarche logistique dans le management de projet.

Un avantage en terme de pertinence des choix technologiques et de lutte contre l'obsolescence des composants (notamment des composants électroniques) due à la fuite en avant des technologies pendant des délais assez longs nécessaires au développement des systèmes complexes.

Enfin, un avantage en terme d'optimisation du maintien en condition opérationnelle de ces systèmes en concourant à l'amélioration continue de la qualité dans leur exploitation et leur maintenance, mais aussi en participant efficacement au rétablissement de leur disponibilité technique opérationnelle et à la maîtrise de leur coût global de possession.

Cette thèse insiste donc sur le fait que la conception de systèmes ne s'arrête pas à la livraison du système au client, même si les coûts de développement représentent 95% du coût global de possession des grands systèmes (tels que les avions commerciaux ou militaires, les navires, les satellites de communications, ou plus modestement, les systèmes de conversions d'énergie pour les télécommunications...). 5% du coût global de possession d'un système sont donc estimés pour son exploitation et sa maintenance tout au long de son cycle de vie jusqu'à son retrait... Il s'avère que ces coûts sont en fait beaucoup plus importants si les moyens mis en œuvre pour le maintien en condition opérationnelle sont insuffisants ou si les conditions d'emplois pour lesquelles a été développé le système ont changé au cours de sa vie.

La logistique de la modélisation a donc un rôle à jouer dans l'efficacité opérationnelle (rétablissement, amélioration voire optimisation de la disponibilité technique opérationnelle) et la maîtrise des coûts d'exploitation et de maintenance des systèmes complexes.

A cet effet, en France, la loi de programmation militaire 2003-2008 a, en outre, comme objectif principal le rétablissement de la disponibilité des équipements existants de la marine nationale et pour une moindre mesure, l'acquisition de nouveaux équipements. Mais cette démarche de rationalisation ne se limite pas qu'au domaine militaire. Elle est dictée par la conjoncture mondiale de diminution des ressources qui tend à la recherche d'importantes économies d'échelle par l'accroissement de l'efficacité dans la planification de ces ressources.

De par son association au soutien logistique intégré des systèmes et à la maîtrise des coûts de leur maintien en condition opérationnelle (disponibilité, maintenabilité et sûreté de fonctionnement), la démarche de la logistique de la modélisation en conception de systèmes multi-technologiques concourt donc à un objectif de performance.

Enfin, les utilisateurs de systèmes multi-technologiques demandent de plus en plus aux constructeurs de fournir des services de contrôle à distance pour le maintien de la disponibilité technique opérationnelle de ces systèmes (télégestion et télémaintenance). Par exemple, la société Delta Energy Systems développe des dispositifs de gestion des ateliers d'énergie pour

les télécommunications (à base de microcontrôleurs) qui permettent en cas d'incidents sur le site client de se connecter sur le réseau de la compagnie et de disposer d'une aide au diagnostic des pannes (pour lequel un système expert est en développement). La « métrologie fonctionnelle » permettrait en effet de préparer la programmation des microcontrôleurs en s'intéressant aux fonctions élémentaires à surveiller.

## Annexe

### LOGISTICS OF MODELLING & SIMULATION IN DEVELOPMENT PHASE. STRATEGIC & OPERATIONAL PLANNING OF FEASIBILITY STUDY

#### INTRODUCTION

Multi-technological system design is a process that may take several years and which has to face to the continuous technology improvement. Components obsolescence (and for instance electronic components) is a major risk for complex systems. The technology in use for the system development may be completely obsolete before the system installation at customer site. Additionally, the lifecycle of such a system (like fighter, transportation plane, battleship...) is around 30 years, sometimes more. This is a big deal for the system operational condition maintenance (if equipment rebuilding is required for example), because most of the time, the chosen technology for the equipment design is not in use anymore or the company which produced does not exist anymore.

So the problem is to know how to delay as much as possible the technological choices without increasing the already long lead-time of multi-technological systems design (or equipment re-designs).

One possible solution is through simulation, and we currently do have efficient tools. Simulation allows reducing development costs. It is based on systems modelling and is using for this, high level modelling languages. For instance, VHDL-AMS (Very high speed Hardware Description Language – Analogical and Mixed Signal) is one of those languages, which permits to describe a material entity (equipment) at the level of its relations to the environment (Black box input / output) and at the level of its architecture (equipment internal structure).

From all the modelling methods that we have, the Functional Modelling Method is actually very interesting because simpler to operate from methodological point of view.

The specificity of functional modelling permits not to concentrate on the physical equipment level anymore (as a material entity) but on the function of this equipment; in this approach, the transition from a material entity to a functional entity is naturally made, and the description of the function is done by passing from an architecture description to a process description.

As the “entity” describes the relationship of equipment to its environment, the “function” describes the same environmental links (information input / output) and the “process” describes the input data processing in order to get output information.

The main interest of the functional modelling approach is in the possibility to start the systems design feasibility studies and then, to delay as much as possible the technological choices (which are part of Engineering).

In order to make sure that the solution has any chance of success in system design, it is mandatory to setup a method which can lead the feasibility study project. This method is “the feasibility study strategic and operational planning” that we are going to see below.

#### FEASIBILITY STUDY STRATEGIC AND OPERATIONAL PLANNING

In order to understand the method, some notions should be initially introduced or reminded.

## **Entity – Architecture Relation**

“Entities” are “pictures of the reality”. In an electronic system-in-design, sensors, communication buses, micro-controllers or microprocessors and their programs, visualization and control screens, and auxiliary equipments, and also assembly integration (the system itself) are represented through a simplified material tree (fig. 1). Most of the time, the creation of such a tree is issued from experience. Each sub-assembly is then an “entity” for which the internal operation is described in its “architecture” (in VHDL-AMS).

## **Function – Process Relation**

At first, such a relation assumes the functional description of the "system-in-design". This description has for starting point the material tree already seen above. In the “function – process” relation we are interested in the entry data flow in order to obtain the outgoing data flow (according to the Black Box Theory). “Entity” is then “Function”, and “Architecture of the Entity” becomes “Process of the Function”.

## **Functional process and Feasibility study**

Functional split of a system-in-design can be done through the identification of three steps.

- Material Tree (that we have already seen) defines the architecture of the system-in-design and is the first step.
- Model Test and Evaluation of the system-in-design is the second step.
- Model Data Management allows the knowledge capitalization of the system-in-design and is the third step of the process.

Engineering process is part of the feasible studies where the technological choice will be made.

Modelling logistics in development phase requires an “action plan”. So, Feasibility studies have to be planned and this planning covers two aspects: a STRATEGIC aspect and an OPERATIONAL aspect.

## **Strategic planning**

It is mandatory (let’s say strategic) that the functional split of the system in-design is made in cooperation with the “Customer”. No shadows must subsist (except of course the technological choice at this feasibility study level)

Strategic planning also covers Feasible Study by forecasting what will be the use of Feasibility Studies results, and must define the responsibilities and reliabilities of the Feasibility Study team members and plan their deliveries (result delivery date estimation)

## **Operational planning**

Is of course issued from the strategic planning and establishes the Feasibility Study Schedule. Operational plans describe with details how the feasibility studies process will be lead:

- Study plan creation (task assignment, milestones...)
- Study plan control (model simulation results...)
- Technical reporting (validated and certified models...)
- Feedback analysis and corrective actions engagement.

The chart below shows the flow of the Feasibility Study Process (fig. 1).

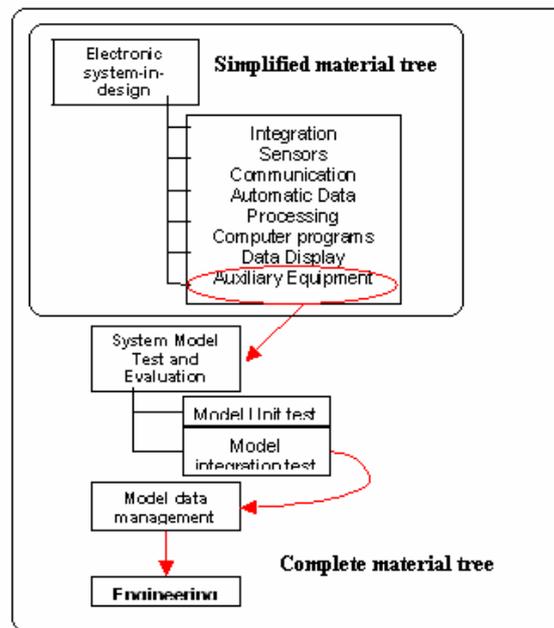


Fig. 1: Simplified and complete material tree

The process includes 3 steps:

- 1) System Functional modelling
- 2) Model Development Test and Evaluation and Model Integration Test and Evaluation
- 3) Certified Model Storage

### System Functional Modelling

The purpose is to describe the system-in-design at a functional level, by using so called functional models. This assumes that all equipments have been defined and their function modelled.

### Model Development Test and Evaluation and Model Integration Test and Evaluation

This step assumes either we are developing a specific model or we are using an already existing model. For both conditions, a first test (called unit test) of the model is realised and documented. Comes afterwards a second test (called integration test), which evaluates the models into a sub-system model or into the full system model. Every evaluation must be documented in detail for the further process steps.

### Certification Model Evaluation

By certification we understand the validation of the models by the “Customer”. At this level, the Customer may be the in-house Head of R&D or the Technical Manager who has the entire responsibility for the project.

Evaluation of the models for certification follows exactly the same procedure as evaluation during model design seen above. Documentation is mandatory and anyway, a model cannot be certified without an approved documentation.

## Know-how capitalization and specialized libraries

All models, data, information, documentations are capitalized into data bases. This gives to the model management activity, a transversal character, which starts at the very beginning of Feasibility studies with the system specification and as we define the “modelling tools to system design tools” adequacy. It is from the Certified Model Library that the Engineering department will pick up the models which will help to determine the technology that it should be used.

## APPLICATION

Let’s have a look at an application example of the Feasibility study process.

### System Functional Modelling

The purpose of this step is to model the function of the auxiliary equipment of the presented electronic system. As an application, we consider a DC 48W Power System which includes (fig.2):

- an AC source (240 V / 50Hz)
- a transformer
- a rectifier (Diode Bridge)
- a filter
- a regulator (protected DC 48V)
- (The load).

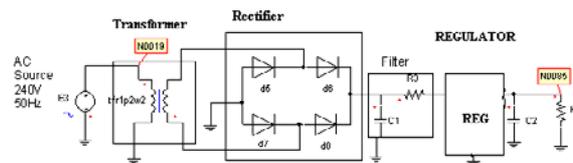


Fig..2: Power System Functional Bloc

### Description of the regulator component

First, we analyse the voltage regulator as a black box in order to define its different terminals. Its external view is presented in figure 3.

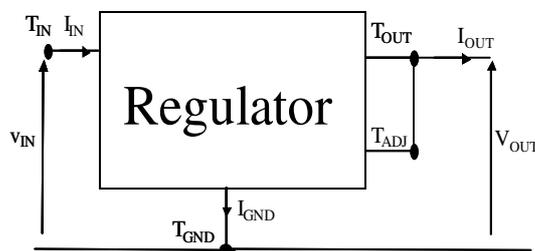


Fig. 3 : A voltage regulator black box view

It is composed by four terminal  $T_{IN}$ ,  $T_{OUT}$ ,  $T_{ADJ}$ ,  $T_{GND}$ , respectively the node of the input voltage, the output voltage, the adjust pin, and the ground pin. The voltage regulator is usually connected to a voltage divider in case of non-unity feedback as shown in figure 3.

The black box view introduces the VHDL-AMS model (see figure 4) where the VHDL-AMS entity of the voltage regulator is defined. The interface port contains the four terminals defined above. The generic parameter listing defines the electrical parameters of the VHDL-AMS model extracted using the basic DC characteristics from the manufacturer.

```

ENTITY regulateur is
  GENERIC (kp : real; vt : real;          lambda :real;
           vref : REAL; Ad : REAL; Lr : REAL; Ldr : REAL;
           Ignd0 : REAL; Ignd1 : REAL; Ignd2 : REAL; );
  PORT ( terminal Tin, Tout, Tadj, Tgnd : electrical);
END ENTITY regulateur;

```

Fig. 4: ENTITY of the VHDL-AMS regulator model

The voltage regulator VHDL-AMS model is built in a first approximation. Only 9 parameters are needed.  $K_p$ ,  $V_T$ , electrical parameters correspond to pass device;  $V_{REF}$  is the voltage reference,  $A_D$  is the gain of the differential amplifier,  $L_R$  and  $L_{DR}$  are line and load regulation,  $I_{gnd0}$  to  $I_{gnd2}$  are parameters for the mathematical expression used as ground current  $I_{GND}$ .

To improve the understanding of the VHDL-AMS model, the figure 5 shows a functional block diagram which includes the different blocks corresponding to DC characteristics.

The basic DC characteristics of the voltage regulator are:

- Dropout voltage  $V_{DO}$ , the difference between the input voltage and the output voltage when the minimum input voltage required for a regulated output voltage to occur is applied.
- Ground current  $I_{GND}$ , the current flowing out of the ground terminal.
- Line Regulation  $L_R$  is the change in output voltage for a change in input voltage
- Load Regulation  $L_{DR}$  is the change in output voltage for a change in load current

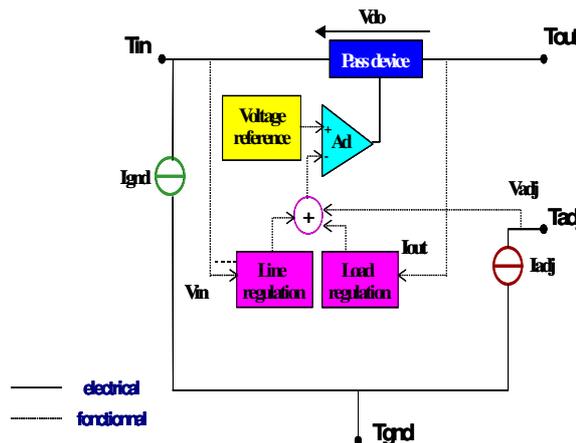


Fig. 5 : A voltage regulator functional block diagram

The introduced functional block diagram allows defining the voltage regulator VHDL-AMS architecture, (see figure 6). The architecture is composed by the different functional block defined above. Each block gives the mathematical expression to model the electrical behaviour of the voltage regulator. Two kind of blocks are used, one block correspond to electrical quantities as Pass Device with the dropout voltage  $V_{DO}$ , the current source as  $I_{GND}$  or  $I_{ADJ}$  and an another block correspond to free quantities as  $V_{INV}$  (the inverse voltage of the differential amplifier node) or  $V_{LDR}$  from the Load Regulation block. The difference between the two blocks is the kind of line used to connect them. Straight lines connect pure electrical blocks and dotted lines connect functional blocks.

```

ARCHITECTURE level0 OF regulateur IS
quantity vin across Tin to Tgnd;
quantity vout across Tout to Tgnd;
quantity vgnd across Tgnd to electrical_ground;
quantity vadj across iadj through Tadj to Tgnd;
quantity vrefvrai : real:=0.0;
----** diff amplifier**
quantity vindiff : real:=0.0;
quantity vinverseuse : real:=0.0;
quantity vg : real:=1.0;
quantity v0 : real:=1.0;
quantity vinl : real:=1.0;
quantity vinh : real:=1.0;
quantity vinh1 : real:=10.0e-24;
----** passdevice**
quantity vdo across iout through Tin to Tout;
quantity vgs : real:=1.0;
----** voltage reference**
quantity vref : real:=1.0;
----** regulation **
quantity vreg_ament : real:=0.0;
quantity vreg_aval : real:=0.0;
----** ground_pin_current**
quantity ignd through Tin to Tgnd;
BEGIN
iadj == 0.0;
----** regulation **
vreg_ament == vin*lr;
vreg_aval == iout*ldr;
vinverseuse == vadj + vreg_aval-vreg_ament;
----** ground_pin_current**
ignd == Ignd0 + Ignd1*iout+ Ignd2 *iout**2;
----** pass-device**---
vgs == vg - vgnd - vout;
if vgs <= vt use vout == 0.0;
elsif vdo <= ( vgs - vt ) use
iout == kp*( (vgs-vt)*vdo - vdo**2/2.0
*(1.0 + lambda*vdo);
else
iout == kp*0.5*( (vgs-vt)**2 )
*(1.0 + lambda*vdo);
end use;
----** voltage-reference**---
if vin <= vref use
vrefvrai == vin;
else
vrefvrai == vref;
end use;
----** diff. amplifier **---
vindiff == vrefvrai - vinverseuse;
v0 == (vin + vgnd)/2.0;
vinl == ((vgnd - vin)/2.0)/Ad;
vinh == ((vin - vgnd)/2.0)/Ad;
if vinh <= 10.0e-24 use vinh1==10.0e-24;
else vinh1 == vinh;
end use;
vg == (vin - v0) *(2.0/math_pi)
*arctan(vindiff,vinh1)+ v0;
END ARCHITECTURE level0;

```

Fig. 6: ARCHITECTURE of the VHDL-AMS regulator model

First, figure 4 introduces the useful generic parameters to get the ideal transfer characteristic of the VHDL-AMS model. Second, the two transfer curves from electrical simulation of the SPICE model and the VHDL-AMS model seems to be identical. But in the cut off region, a larger voltage difference is presented. This voltage difference is due to the design of the output stage. The VHDL-AMS is built in a first approximation. So, its transfer characteristic is assumed to straight line in cut off region. In the dropout and regulated region, the voltage difference is less than in the cut off region. Thus, it is interesting to zoom in the output regulated region to compare the transfer characteristics

## Model Test and Evaluation

2 phases at this level:

### a) Model development test and evaluation

In this example, the purpose is to use the VHDL-AMS regulator model. For instance, we decided to evaluate the model of the regulator. The first test is a unit test of the regulator, and if results are good enough, we go to the second step phase of the evaluation.

#### Testing electrical simulation results

We introduce results from electrical simulation of the SPICE model and the VHDL-AMS model in order to compare the agreement of the two models. First of all, the common DC transfer characteristic is presented in order to show what generic parameters are used to define the different region of the transfer curve ( the cut off region, the dropout region and the regulated region-see figure 7). The two curves are done defining an identical 700mA load current and a 0 to 20V input voltage range.

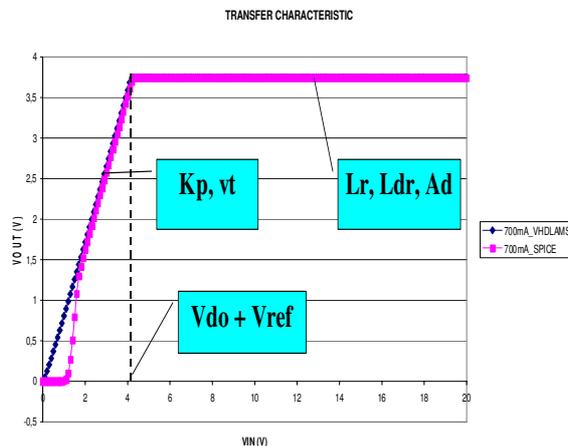
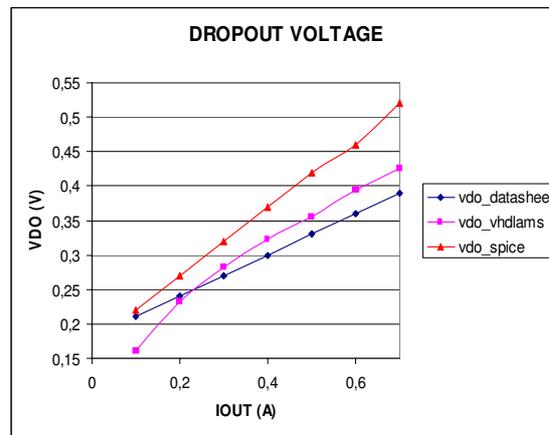


Fig. 7: Regulated region comparative

In the case study, our interest focuses on the regulated region. Figure 7 introduces the regulated region of the two models. The curves are defined for 100mA, 400mA, 700mA load current. Figure 7 shows that the VHDL-AMS model transfer curve has a good agreement versus the SPICE model. The voltage difference between the two curves are less than 2 mV in the voltage output regulated

**region. The slope difference between the two transfer curves is due to loop gain of each model and the value of line and load regulation voltage.**

A critical region of the voltage regulator is the transition between the dropout region and the regulated region. This boarder defines the dropout voltage  $V_{DO}$ . A comparative study of the dropout voltage is done by figure 8. In this figure, there are three curves, one represents SPICE model, another one represents manufacturer datasheet and the last one represents the electrical simulation results from VHDL-AMS model. By comparing datasheet to VHDL-AMS model and the SPICE model, we observe that the VHDL-AMS model is more accurate. Reducing the complexity of a behavioural model is the main goal of our work and it is done by VHDL-AMS model.

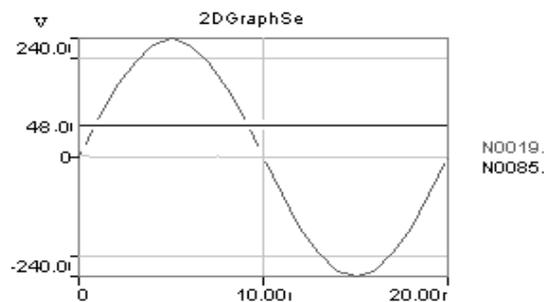


*Fig. 8: Dropout voltage comparative*

The VHDL-AMS model allows building behavioural model with less complexity.

**b) Model integration test and evaluation.**

The purpose is to integrate the regulator into the functional design of the Telecom Power System shown in figure 2 and to simulate the complete functional bloc. The results are those expected (figure 9), we can qualify the model and store it into the Development Library for further Engineering processes.



*Fig. 9: Input – output of the simulated system*

### **Certified Model Storage**

An identical procedure (as described above) is used for the qualification of the full system before storing it into the Development Library.

### **CONCLUSION**

The method described in this paper suggests an alternative to the technological obsolescence during the long lead-time development process of multi-technological systems, by structuring the studies which permit to delay the technical choices and by avoiding potential obsolescence. For this purpose and as an application, we show that VHDL-AMS is very useful for getting behavioural models of specific components (here a voltage regulator) and of a complete system. This simplifies very advantageously the proposed method.

## Références bibliographiques

- [R01] « Comprendre la MIL-STD-M-15071 », Aérospatiale, Paris, 1990.
- [R02] « La démarche logistique », H. Brunet et Y. le Duen, Edition AFNOR, 1992
- [R03] IEEE Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions IEEE Std 1076.1 – 1999
- [R04] Groupe de travail IEEE VHDL-AMS <http://www.eda.org/vhdl-ams/>
- [R05] « VHDL-AMS for mixed signal”, MIXDES2000, Gdynia, Pologne
- [R06] Contribution à la modélisation comportementale des circuits analogiques, Thèse Bordeaux I, N. Millet-Lewis, 1997
- [R07] « Manuel de référence pour BVHDLA/SPICE 3F5 », ENST-Paris, 1999.
- [R08] “Modélisation VHDL-AMS analogique et simulation SPICE”, Thèse O. Alali, ENST-Paris, 1998.
- [R09] « Spécifications des systèmes complexes et lutte contre l’obsolescence », REE, Volume 4, avril 1998.
- [R10] Modélisation des systèmes analogiques, thèse INP-Toulouse, 1999
- [R11] Spice Version 2nd User’s guide, A. Vladimirescu, University of California, Berkeley, 1981
- [R12] Contribuer à l’amélioration de méthodologie et outils d’aide à la conception de systèmes multi-technologiques, Thèse S. Jemmaly, ENST, 2003
- [R13] Modélisation des circuits électrotechniques en vue de leur simulation – Réalisation d’un simulateur, Thèse Bordeaux I, Fabien Legrand.
- [R14] « Mechatronics, Electronic control systems in mechanical and electrical engineering » W. Bolton Edition Langman, 1999.
- [R15] Spice3f5, spice latest version, University of Berkeley, <http://www.eecs.berkeley.edu/ipro/software/catalog/Description/Spice3f5>
- [R16] “Introduction à la RSFAO”, R. Rascalon, Dassault Aviation, 1999.
- [R17] « Manuel de référence pour Flash Schématique », Acad System, Beignon, 1999.
- [R18] “Reliability Centered Maintenance”, NASA Field manual, 2003.
- [R19] “Reliability and Organizational Maintenance Operations”, Department of the US Navy, Field manual 29-9-1990

- [R20] Maintainability, methods and applications, Thomson CSF Underwater Activities (UWA), 1996
- [R21] « Fiabilité, maintenabilité et disponibilité des systèmes électroniques », Communication, Thomson SINTRA, Activités sous-marines, 1997
- [R22] MIL STD 471A, US Military Standard “Life Cycle Test and Evaluation: development and operational test and evaluation (verification, demonstration, evaluation) – Chart for Maintainability
- [R23] Analysing Rendered Color of an Object illuminated by a Light Source submitted to thermal and electrical Conditions ; FlashSpice/VHDL-AMS Simulation MIXDES’99, June 99, Krakow, Poland, Charlot, Seon, Rojas
- [R24] « IT solution for continuous quality improvement – Methodology and Application », J-F. Charlot, Bern, 2003
- [R25] Norme CEI 900 Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courants alternatifs, UTE, 1988
- [R26] ANSOFT, Simplorer, Simulation software for multi-domain design in automotive, aerospace, power electrics and electric drive systems,  
<http://www.ansoft.com/products/em/simplorer>

## Publications

1. Color Rendering in a Hazy Environment : Simulation with SPICE3F5/VHDL-AMS  
BMAS'98, Washington, October 1997 (Charlot, Barker, Alali).
2. Analysing Rendered Color of an Object illuminated by a Light Source submitted to thermal and electrical conditions ; FlashSpice / VHDL-AMS Simulation MIXDES'99, June 99, Krakow, Poland (Charlot, Seon, Rojas).
3. Analysis of a Colorimetric System under Foggy, Thermal and Electrical Conditions with SPICE/VHDL-AMS, Electronic Reliability, Elsevier Editor, février 2000 (Charlot, Seon).
4. A VHDL-AMS Approach for Analysing Electro-Thermal Effects in a Flash Memory  
MIXDES 2000, Gdynia, Poland, juin 2000 (Charlot, Millet - Lewis, Lévi, Seon).
6. Logistics of Modelling & Simulation in Development Phase. Strategic & Operational Planning of Feasibility Study, MIXDES'05, June 2005, Krakow, Poland, (Charlot, Mongellaz, Lévi).



## LEXIQUE

### **1) Arborescence logistique – concept de maintenance – plan de maintenance:**

L'arborescence dite logistique est issue des arborescences techniques et fonctionnelles et du concept de maintenance. Elle ne s'intéresse qu'aux éléments qui permettent au système d'assurer sa mission et dont la défaillance compromettrait la réalisation de cette mission.

L'arborescence logistique ne peut être définitivement construite que si l'on a défini le concept de maintenance. Normalement, ce concept doit être défini très tôt dans la conception du système et tenir compte bien évidemment des conditions opérationnelles et environnementales dans lesquelles il sera utilisé.

Les éléments matériels de l'arborescence sont généralement appelés des URL (unités remplaçables en ligne) lorsque la tâche de maintenance consiste à remplacer directement l'élément défaillant sur le système. Les éléments matériels remplacés en ligne et dont la complexité technique nécessite des interventions plus poussées en ateliers, sont appelés URA ou unité réparable en atelier. URL et URA sont définies par le concept de maintenance.

L'arborescence logistique et le concept de maintenance permettront de bâtir ce que l'on appelle un plan de maintenance, dans lequel seront organisés, structurés et intégrés l'ensemble des moyens humains et matériels et des informations nécessaires au système pour accomplir sa mission dans un objectif d'efficacité opérationnelle.

### **2) Cycle de vie:**

Le cycle de vie d'un système comprend toutes les phases concourant à la conception chez l'industriel et à l'utilisation par le client, jusqu'au retrait. Ces phases consistent en : la planification du projet de conception du système, la conception proprement dite et le développement, jusqu'à la certification du système et sa mise en service chez le client, l'exploitation et la maintenance de ce système, et enfin son retrait.

Coût de possession :

Le coût de possession d'un système comprend l'ensemble des coûts générés par son cycle de vie (allant donc de la conception jusqu'au retrait du système). Il est à noter que 95% du coût de possession concerne les phases de conception (c'est-à-dire jusqu'à la mise en service chez le client - utilisateur). Même si la phase de conception est souvent très longue (de 5 à 10 ans pour les gros systèmes), il ne reste plus que 5% du coût global de possession pour la phase d'exploitation maintenance qui s'étend sur 30, voire même, 40 ans...

### **3) Disponibilité (technique) opérationnelle:**

Capacité d'un système de répondre à une demande à un moment précis dans des conditions d'exploitations prescrites.

### **4) Maintien en condition opérationnelle (MCO):**

Le MCO d'un système a pour objet de fournir l'ensemble des moyens matériels, humains et des informations, organisés, structurés et intégrés, permettant à ce système d'assurer sa mission dans un objectif d'efficacité opérationnelle. Par efficacité opérationnelle il faut entendre la réponse du système dans des conditions garanties de disponibilité technique opérationnelle et de coûts de maintenance et de logistique.

### **5) Mécatronique:**

Mécatronique est la contraction de mécanique et électronique. La mécatronique traite des systèmes électroniques de contrôle et de commande dans le domaine du génie électrique et mécanique. Elle consiste en l'intégration de produits qui sont issus de la mécanique, de

l'électronique et de l'informatique, au sein d'un système, dans le but de réaliser une fonction précise.

#### **6) Métrologie fonctionnelle :**

La métrologie fonctionnelle consiste à créer des modèles fonctionnels qui nous permettront de savoir si les paramètres électriques et mécaniques d'exploitation du système ne sont pas en dehors des spécifications et ce en fonction de ses contraintes opérationnelles et de son environnement du système.

#### **7) Mode de défaillance:**

Effet par lequel une défaillance est observée (par exemple : court-circuit, circuit ouvert, modification d'un gain), mais aussi état du système conduisant à une telle défaillance.

#### **8) Module fonctionnel:**

Fonction élémentaire de la description fonctionnelle d'un système au-delà de laquelle il n'est plus intéressant (rentable) de décomposer le système. Le module fonctionnel s'exprime souvent par un simple verbe (par exemple amplifier) et correspond à un élément matériel (un amplificateur) dans la description technique du système. Le module fonctionnel permettra le passage de la description fonctionnelle à la description technique du système (dans notre exemple, de la fonction « amplifier » à « l'amplificateur » par le choix d'une technologie (par exemple, la technologie bipolaire ou MOS).

#### **9) Sûreté de fonctionnement:**

Propriété d'un système multi-technologique capable d'assurer ses fonctions sans défaillance, dans des conditions préalablement définies et sur une période déterminée. La sûreté de fonctionnement comprend la fiabilité et la disponibilité.

La fiabilité fait référence à la capacité d'un système de se conformer à ses spécifications sur une période donnée, alors que la disponibilité a trait à la capacité d'un système de répondre à une demande à un moment précis.

Exploration conditionnelle de l'état d'un système:

Analyse de la capacité technique des équipements d'un système à répondre à leur fonction dans les conditions environnementales et opérationnelles prescrites. L'exploration conditionnelle se base sur l'analyse des faits techniques et sur la métrologie fonctionnelle pour déterminer la récurrence de défaillances afin d'engager des moyens de corrections.

#### **10) Système multi-technologique:**

Système alliant plusieurs technologies (électrique, électronique, mécanique, thermique, ...) répondant à un besoin précis d'un utilisateur dans un contexte environnemental et opérationnel donné.

L'ensemble des technologies utilisées est décrit par analogie à l'électricité.

Ces systèmes comportent généralement des dispositifs automatiques de traitement du signal (définition d'automatismes en électronique numérique) et des asservissements (définition d'automatismes en électronique analogique, tels que capteurs et actionneurs.



## **Résumé**

L'objectif de cette thèse est de montrer quels avantages la modélisation apporte à la gestion du cycle de vie des systèmes multi-technologiques. Pour se faire, la démarche adoptée se scinde en deux parties, la partie traitant de l'adéquation des modèles aux méthodes de conception des systèmes et de la modélisation comme outil de spécification et de lutte contre l'obsolescence. La seconde partie traite quant à elle du contexte de la modélisation dans la prévention de la défaillance des systèmes multi-technologiques et se veut une application de la logistique de la modélisation comme outil du maintien en condition opérationnelle de ces systèmes. L'analyse de l'adéquation des modèles aux méthodes de conception des systèmes multi-technologiques passe par la caractérisation des systèmes multi-technologiques et l'exposé des méthodes de conception et de modélisation et s'intéresse aux modèles VHDL-AMS multi-technologiques fonctionnels et à l'analogie au domaine électrique pour la spécification des systèmes et la lutte contre l'obsolescence. Cette thèse présente ensuite le contexte de la modélisation comme moyen de prévention de la défaillance des systèmes et cherche à définir ce qu'est une maintenance modélisable et quels sont les avantages que l'on peut en tirer. Enfin, cette thèse se conclut par un exemple d'application de la logistique de la modélisation au maintien en condition opérationnelle des systèmes multi-technologiques en montrant son implication pour l'amélioration continue de la qualité des programmes de maintenance, le rétablissement de la disponibilité opérationnelle et la maîtrise du coût global de possession des systèmes et leurs équipements.

## **Mots-clés**

Cycle de vie - Métrologie fonctionnelle - Disponibilité technique opérationnelle - Modèle fonctionnel - Maintien en condition opérationnelle - Sécurité de fonctionnement - Mécatronique - Système multi-technologique.

## **Abstract**

The objective of this thesis is to show which advantages modelling could provide to the multi-domain systems life cycle support management. In this purpose, the approach is to divide works into two parts. The first part is about the models adequacy to the multi-domain systems design methods and modelling as a specification tool and a tool against obsolescence. The second part is about the context of modelling in the multi-domain systems failure prevention and is also an application of VHDL-AMS modelling as a tool for systems operational condition maintenance.

## **Key-words**

Lifecycle - Functional metrology - Operational availability - Functional model - Maintenance - Reliability and Logistics - Mechatronics - Multi-technology systems.