HAL
open science

Modélisation du processus de dimensionnement par la simulation numérique en génie électrique

Jérôme Péchoux

To cite this version:

Jérôme Péchoux. Modélisation du processus de dimensionnement par la simulation numérique en génie électrique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. NNT : . tel-00549752

HAL Id: tel-00549752

https://theses.hal.science/tel-00549752

Submitted on 22 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Spécialité : Génie Electrique

préparée au ***Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble***

dans le cadre de ***l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal »***

Présentée et soutenue publiquement

par

Jérôme PECHOUX

Le 23 Mars 2001

Titre

Modélisation du processus de dimensionnement par la simulation numérique en Génie électrique.

Directeurs de Thèse :

Jean-Louis COULOMB et Yves MARECHAL

JURY

M. Alain NICOLAS	Président et Rapporteur
M. Mouloud FELIACHI	Rapporteur
M. Michel ROCHON	Examinateur
M. Jean-Louis COULOMB	Co-encadrant
M. Yves MARECHAL	Co-encadrant

Remerciements :

Je tiens à remercier tout particulièrement Messieurs Jean-Louis Coulomb et Yves Maréchal pour avoir dirigé mon travail et m'avoir apporté leur soutien durant les vicissitudes de ma thèse.
Je remercie l'A.N.R.T. et Matra Datavision pour avoir financé ma thèse.
J'adresse également un grand merci à Messieurs Nicolas, Féliachi et Rochon pour avoir bien voulu participer à mon jury de thèse.

Ma thèse a été une expérience unique grâce aux échanges et conseils des ingénieurs et techniciens, qui ont le souci de leurs thésards et donnent une âme au Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Pour n'en citer qu'une partie, Etiennette, les Patrick, Daniel, Bruno, Patrice, Marie-Thérèse, Danielle, Josiane, Monique et tous les experts de l'atelier…

J'ai également pu apprécier :

- les contacts avec mes confrères thésards, qui partagent avec moi cette même expérience enrichissante de devenir docteur
- le courage de tous les étudiants étrangers, vietnamiens, roumains, serbes, d'Afrique du Nord… qui parviennent malgré les difficultés liées à l'expatriation, à obtenir leur précieux sésame.

et à tous ceux que j'ai oubliés : MERCI !

CHAPITRE I INTRODUCTION **3**

I.1. ETAT DE L'ART : 3

I.2. NOUVEAUX OBJECTIFS : 4

I.3. MISE EN ŒUVRE 5

CHAPITRE II : GUIDAGE DE L'UTILISATEUR POUR LA RÉSOLUTION DES PROBLÈMES ÉLECTROMAGNÉTIQUES **8**

II.1. CAHIER DES CHARGES DE LA MÉTHODE DE GUIDAGE : 9

II.2. PRÉSENTATION DE L'EXISTANT, LE FORMALISME SADT : 9

II.3. UTILISATION DE CE FORMALISME DANS LE DOMAINE DE LA MÉCANIQUE DE STRUCTURE : 11

II.4. COMPARAISON BRÈVE ENTRE LA MÉCANIQUE DES STRUCTURES ET L'ÉLECTROMAGNÉTISME : 13

II.4.1. De fortes similitudes : *14*

II.4.2. Mais des différences non négligeables : *14*

II.5. GUIDE DU PROCESSUS DE RÉSOLUTION DE PROBLÈMES ÉLECTROMAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS SELON LE FORMALISME SADT 14

II.6. CONCLUSION : 29

CHAPITRE III CAPITALISATION DU SAVOIR-FAIRE DU CONCEPTEUR EN GÉNIE ÉLECTRIQUE **30**

III.1. CAHIER DES CHARGES DE LA DÉMARCHE DE CAPITALISATION : 30

III.2. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE POUR LA MÉCANIQUE ET TRANSPOSITION EN GÉNIE ÉLECTRIQUE : 31

III.2.1. Le modèle de conception *31*

III.2.2. Le but de simulation *31*

III.2.3. Le modèle physique *32*

III.2.4. Le modèle de simulation *33*

III.2.5. Les résultats *33*

III.2.6. La conclusion *33*

III.2.7. Liens entre les entités *34*

III.3. APPLICATION DANS LE CADRE DU GÉNIE ÉLECTRIQUE : 37

III.3.1. Les problèmes du conducteur haute tension : *38*

III.3.2. Le problème des barres dans un tableau de distribution basse tension : *45*

III.3.3. Conclusion sur ces deux problèmes *50*

CHAPITRE IV CRÉATION D'UN FORMALISME RASSEMBLANT LE GUIDE DE L'UTILISATEUR ET LA CAPITALISATION DU SAVOIR-FAIRE **51**

IV.1. DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES 51

IV.2. LA MÉTHODOLOGIE OBJET 52

IV.2.1. La hiérarchisation : *53*

IV.2.2. La surdéfinition *55*

IV.2.3. L'encapsulation *57*

IV.3. LA REPRÉSENTATION OPEN INVENTOR 58

IV.3.1. Le graphe d'objets : *58*

IV.3.2. L'interactivité du graphe d'Open Inventor *59*

IV.4. APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE OBJET À LA DÉMARCHE DE SIMULATION EN ÉLECTROMAGNÉTISME 61

IV.4.1. Définition d'un nouveau modèle de représentation électromagnétique *61*

IV.4.2. Application de la méthode dans le cas d'un shunt *66*

IV.5. CONCLUSION : 73

CHAPITRE V CONCLUSION **75**

CHAPITRE VI ANNEXE 1 : MODÉLISATION PAR SADT DU PROCESSUS DE SIMULATION NUMÉRIQUE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE **77**

CHAPITRE VII RÉFÉRENCES **91**

Chapitre I Introduction

Le sujet de cette thèse consiste à étudier le problème du « processus de dimensionnement par la simulation numérique en Génie électrique ».

Modéliser ce processus permet de pouvoir utiliser des modèles les plus simples possibles pour résoudre un problème physique particulier sans devoir traiter l'ensemble du processus de dimensionnement avec un seul modèle plus proche du réel mais beaucoup plus complexe. Mais ce processus ne peut se dispenser d'une formalisation qui fournit à l'utilisateur des règles à appliquer aux modèles utilisés pour assurer une cohérence entre ceux-ci.

I.1.Etat de l'art :

La simulation en Génie Electrique connaît deux références importantes, les simulations analytique et numérique. Dans le domaine de la simulation numérique, on trouve les logiciels de simulation par éléments finis qui effectuent des calculs de champs électromagnétiques. Ces outils sont très puissants pour résoudre la majeure partie des problèmes posés en électromagnétisme malgré les difficultés particulières à ce domaine comme la prise en compte du vide. Ces logiciels abordent tout problème électromagnétique en suivant un canevas très bien conçu en étapes :

- Définition géométrique
- Définition des régions physiques
- Maillage
- Résolution
- Visualisation des résultats

Il permet ainsi d'aborder schématiquement un problème électromagnétique de la manière suivante :

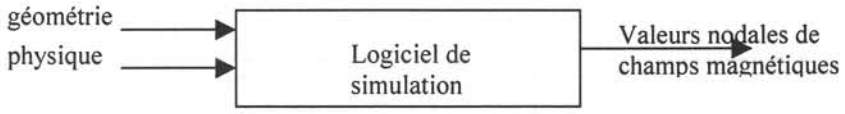


Figure I.1-1 Schéma de résolution d'un problème électromagnétique

La géométrie et la physique tiennent compte en fait d'un choix implicite de l'utilisateur d'effectuer une étude en trois, deux, une dimension dans un domaine particulier précis car le logiciel de simulation par éléments finis propose une large palette de possibilités.

De plus, certains logiciels de simulation par éléments finis permettent le paramétrage géométrique et physique ce qui complexifie le traitement de données permettant un retour des données de la sortie vers l'entrée comme le montre la Figure I.1-2.

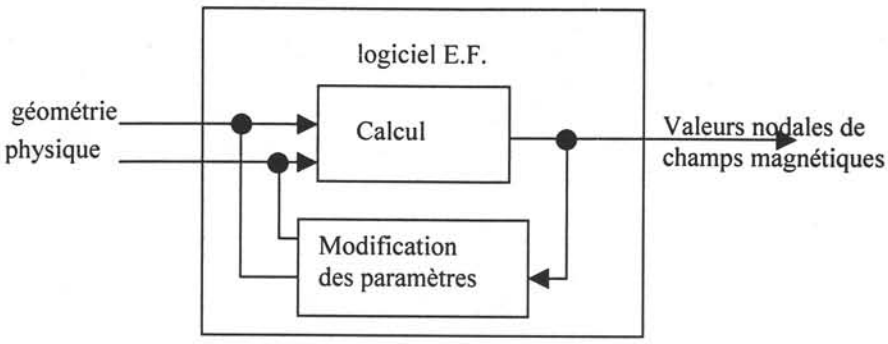


Figure I.1-2 Introduction du paramètrage dans la résolution de problèmes

Ainsi par l'étude du fonctionnement du logiciel de simulation par éléments finis qui rassemble l'ensemble des techniques actuelles de modélisation en électromagnétisme, et malgré sa prise en main intuitive grâce à son interface utilisateur, il apparaît plusieurs difficultés :

- Un cadre de conception trop vague laissant en particulier les utilisateurs débutants seuls face au logiciel,
- L'absence du relevé des choix et motivations de l'utilisateur qui justifient son étude,
- L'absence totale d'historicité ou de liens entre les projets qui associée à l'absence de trace des décisions, ne permet de suivre l'évolution d'un projet,
- L'impossibilité de transmission du savoir car chaque étude n'est pas directement exploitable sans l'aide d'une documentation qui fait souvent défaut,
- L'impossibilité enfin de réutiliser et d'adapter simplement l'utilisation du code à son propre projet même pour un exemple similaire.

I.2.Nouveaux objectifs :

Il apparaît que le processus de dimensionnement en génie électrique englobe la simulation en électromagnétisme qui est sujette à de nombreux choix comme la figure I.2-1 le décrit sous la forme d'un diagramme de flux.

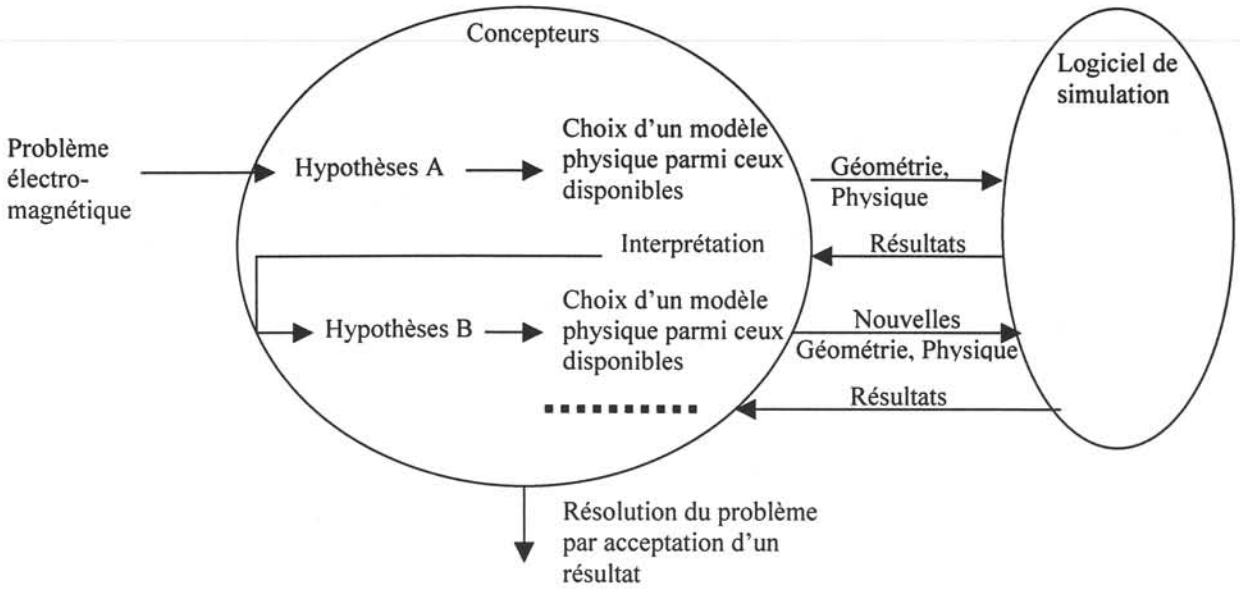


Figure I.2-1 Schéma de l'ensemble du processus de dimensionnement en génie électrique

Il devient alors nécessaire de développer des outils permettant :

- Tout d'abord, **objectif 1**, de mieux encadrer l'utilisateur dans sa démarche de modélisation d'un problème électromagnétique par un logiciel de simulation par éléments finis ou autres.

- Ensuite, **objectif 2**, de trouver un outil permettant de tenir compte ou, au moins, de visualiser les choix et hypothèses d'un concepteur en électromagnétisme afin d'apporter une meilleure disponibilité des connaissances utilisées.

- Enfin, **objectif 3**, de trouver un modèle général du processus de dimensionnement en ayant pour objectif à terme l'automatisation partielle ou complète de celui-ci.

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à l'amélioration des connaissances dans le processus de dimensionnement dans le domaine du génie électrique afin de permettre la réutilisation et l'automatisation des simulations antérieures.

I.3.Mise en œuvre

Il apparaît tout d'abord que l'objectif 1 permet d'aider l'utilisateur à utiliser le logiciel de simulation de la façon la plus sure et pédagogique qu'y soit.

Ensuite, l'objectif 2 permet quant à lui, de gagner un niveau plus abstrait, en replaçant le logiciel de simulation à sa place d'outil dans le processus de dimensionnement. Cet objectif

relativise la place du logiciel de simulation qui auparavant suffisait à lui seul dans tout dimensionnement. Ce qui était concevable pour des problèmes simples en électromagnétisme, devient alors un fort handicap lors de problèmes complexes dont les bases physiques deviennent moins certaines ou en constante évolution.

Enfin, l'objectif 3 a pour ambition d'aller plus loin que l'objectif 2 qui rassemble l'ensemble des interprétations d'un concepteur sans un formalisme très dirigé. L'objectif 3 pose les bases d'un formalisme puissant associant objets et graphes, qui permet de connaître une évolution suivant les problèmes futurs en électromagnétisme, et devrait aboutir après de nombreuses améliorations, à une certaine automatisation du processus de dimensionnement en électromagnétisme.

La figure 1.3-1 permet de résumer la place des objectifs cités ci-dessus dans le processus de dimensionnement électromagnétique.

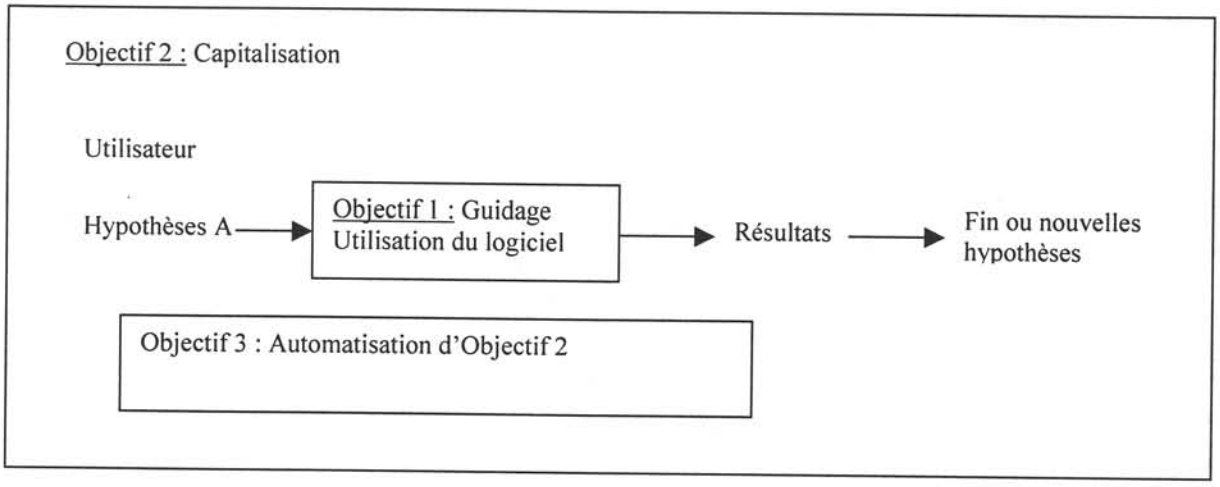


Figure I.3-1 Représentation englobante des objectifs

On peut tout de suite remarquer d'après la figure 1.3-1, que l'objectif 3 est en phase d'acquisition pour, à terme, englober l'objectif 2. On sait de plus que l'objectif 1 n'est pas encore totalement automatisable donc inclus totalement dans l'objectif 3 mais on considérera par simplification qui l'objectif 3 englobe l'objectif 1. Cela peut se résumer de la manière suivante par la Figure I.3-2.

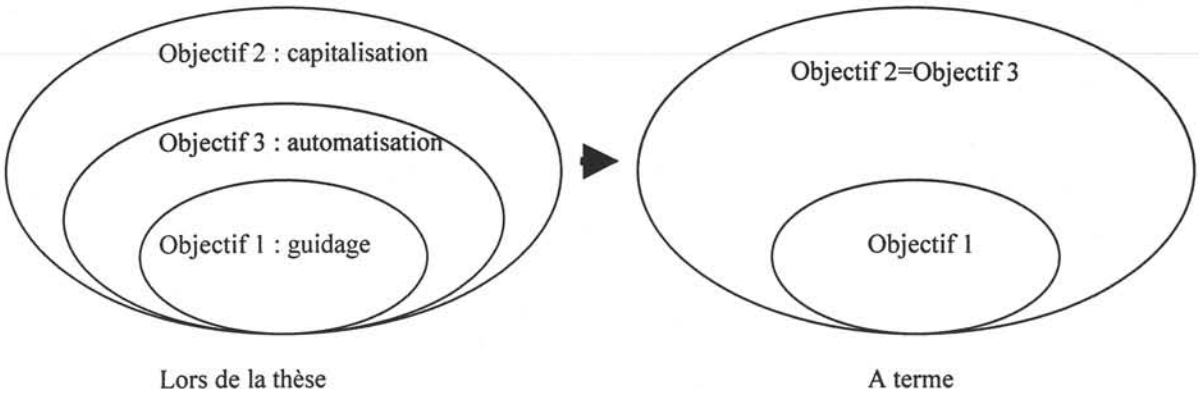


Figure I.3-2 Représentation de la finalité de la thèse

En fait, chaque objectif (1, 2, 3) présenté dans le paragraphe 1.2 représente dans cette thèse un chapitre particulier où est présentée une méthode permettant de répondre à l'objectif fixé.

L'objectif 1, le guidage, présenté au chapitre 2, n'est qu'une partie quoique importante du processus de dimensionnement.

L'objectif 2, la capitalisation, fera l'objet du chapitre 3.

L'objectif 3, en revanche, n'apparaît qu'après l'objectif 2 plus abstrait, car l'automatisation est certainement la partie la plus innovante qui englobera vraisemblablement l'objectif 2, permettant une considérable amélioration de la gestion des connaissances dans le processus de dimensionnement en génie électrique. Il fera l'objet du chapitre 4.

Chapitre II : Guidage de l'utilisateur pour la résolution des problèmes électromagnétiques

Le processus de conception en génie électrique est un processus long et complexe regroupant de nombreuses étapes interdépendantes et la plupart du temps mal définies. En effet, chaque concepteur a sa manière de concevoir à partir de son expérience, il doit aussi assimiler celles des autres concepteurs. Ils ont en fait des bases communes dont les contours sont généralement peu marqués. Les problèmes principaux d'une définition imprécise des étapes de conception sont :

- Les risques de redondance et donc de perte de temps,
- Les erreurs de conception dues à une méthode de conception non généralisable.

Pourtant, des efforts importants ont déjà été réalisés sur une étape particulière de la conception qui est la simulation par éléments finis d'un problème de génie électrique. En effet, de nombreux logiciels proposent aux utilisateurs un cadre relativement bien défini dont les principales étapes sont :

- La définition géométrique,
- La définition des régions physiques,
- Le maillage,
- La résolution,
- La visualisation.

Or, il apparaît que malgré l'amélioration des interfaces utilisateurs et de l'organisation des logiciels éléments finis, un utilisateur débutant se perd parfois dans ces étapes, car même si elles donnent un cadre de simulation, celui-ci est trop large pour réaliser à coup sûr une bonne simulation en électromagnétisme.

Ainsi, apparaît un besoin de mieux encadrer une des étapes de conception en génie électrique : l'étape de simulation.

Ce besoin est alors résumé par l'objectif suivant : Permettre à un utilisateur de pouvoir aborder n'importe quel problème électromagnétique en suivant un cadre rigoureux, exhaustif et précis.

Dans ce chapitre, nous allons donc tenter de développer cette démarche. Dans un premier temps, nous exprimerons plus précisément notre objectif sous la forme d'un « cahier des charges ». Ensuite, nous ferons une analyse de l'existant et en particulier du formalisme SADT ((Structured Analysis and Design Techniques) et de son utilisation dans le cadre

proche du notre qui est celui de la simulation mécanique. Cette analyse nous permettra de proposer une transposition de cette méthode à notre domaine de l'électromagnétisme.

II.1.Cahier des charges de la méthode de guidage :

Notre objectif est de permettre à un utilisateur de pouvoir aborder n'importe quel problème électromagnétique en lui offrant :

- Un cadre rigoureux, exhaustif et assez fin,
- Une grande lisibilité par l'utilisation d'un formalisme graphique,
- La possibilité de sélectionner le niveau de détails de l'opération pour satisfaire aussi bien les besoins d'un expert avec une vision fine que ceux d'un donneur d'ordre avec une vision globale.

L'exhaustivité de la méthode ne dépend que de sa confrontation avec de nombreux cas d'études électromagnétiques qui valident ou complètent cette méthode. Cela nécessite un formalisme très souple permettant une évolution rapide.

II.2. Présentation de l'existant, le formalisme SADT :

Le besoin révélé d'un formalisme graphique à la fois simple et rigoureux, et de plus permettant différents niveaux de lecture suivant le niveau de détails demandé, a déjà été formulé. Dans ce but, le formalisme SADT a été proposé. Celui-ci possède certaines particularités très intéressantes comme :

- Des entités représentant un processus avec ses entrées, ses sorties, ses variables d'environnement et les interventions extérieures (de différents utilisateurs).
- La hiérarchie entre les entités possédant différents niveaux de granularité entre chaque entité permettant aussi bien une vue synthétique compréhensible pour un lecteur non averti qu'une vue plus détaillée pour permettre à l'expert de mieux comprendre les mécanismes du processus.

Pour représenter ce guidage, il est usuel d'utiliser la méthode IDEF0 développée par Ross [ROS77]. Cette méthode est plus connue sous le nom de SADT (Structured Analysis and Design Techniques).

En particulier dans le cas d'un **diagramme d'activités**, le langage graphique IDEF0 a deux éléments principaux : les boîtes et les flèches. Chaque boîte représente une activité unique. Les flèches représentent des interactions telles que les données entre activités. Les boîtes et les flèches sont combinées dans des diagrammes qui eux-mêmes représentent des activités de

haut niveau. Un modèle IDEF0 est une séquence organisée de diagrammes expliqués par du texte. Au plus haut niveau, une seule boîte représente le sujet entier. Pour les diagrammes de plus bas niveau, il devrait y avoir entre 3 et 6 activités. Chaque boîte dans un diagramme peut lui-même produire un autre diagramme de plus bas niveau. Ce procédé peut continuer jusqu'à ce que le niveau désiré de détail soit atteint. Chaque niveau est repéré par une lettre et un nombre. Le plus haut niveau s'appelle par convention A-0. Le diagramme suivant se nomme A0. A1 se rapporte à la première activité de A0, A2 à la deuxième et ainsi de suite. Ainsi, la Figure II.2-1 montre la place des nœuds A42 et A44.

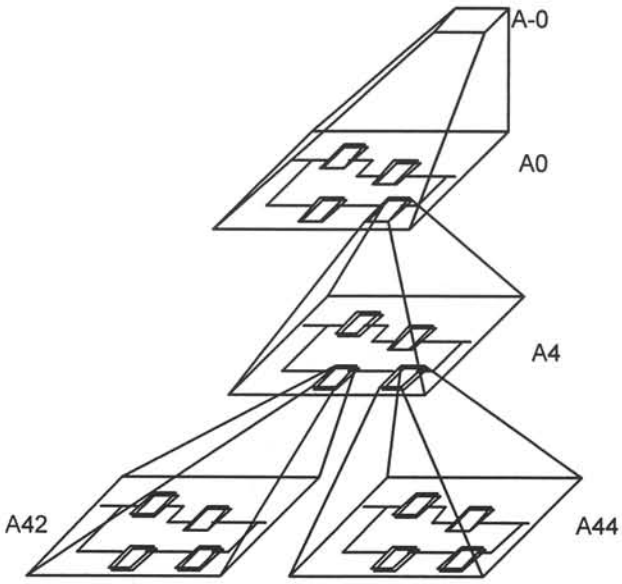


Figure II.2-1 Exemple de hiérarchie entre noeuds

Les flèches montrent les relations de contraintes et les flux de données entre les activités. Les flèches peuvent être combinées ou divisées. Une boîte peut être divisée en quatre classes : entrée, sortie, contrôle et mécanisme. Le langage IDEF0 limite chaque classe à un côté différent de la boîte comme le montre la Figure II.2-2.

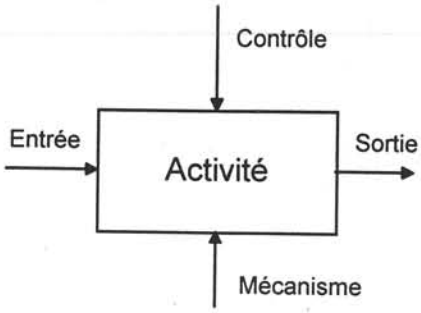


Figure II.2-2 Flux et relations de SADT

II.3. Utilisation de ce formalisme dans le domaine de la mécanique de structure :

Un article d'Arabashi [ARA91] présente les différents processus nécessaires à une étude « en éléments finis » d'un problème de mécanique des structures. Cet article présente une méthode utilisant le formalisme SADT présenté en II.2. Cette méthode a les caractéristiques suivantes :

- Elle s'applique a priori uniquement au domaine mécanique.
- Elle traite la partie du sujet concernant la résolution d'un problème une fois dimensionné.
- Elle a un caractère volontairement exhaustif pour résoudre tous les problèmes mécaniques par la méthode des éléments finis, ce qui la rend très intéressante à étudier pour notre cas.

La Figure II.3-1 situe la place de cette méthode dans le cadre du processus de dimensionnement mécanique.

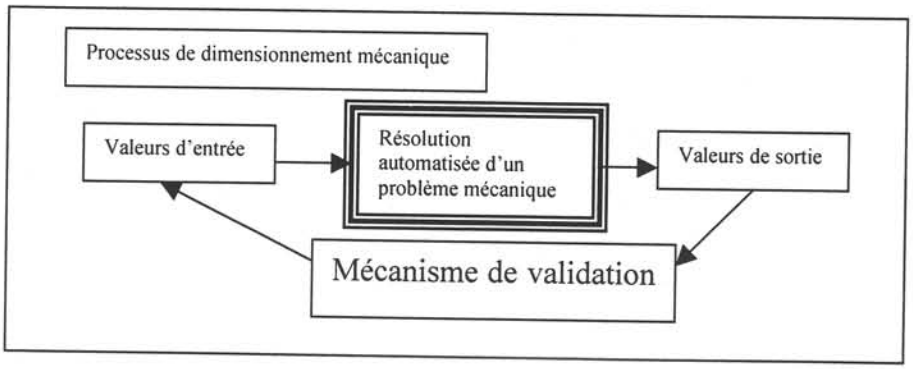


Figure II.3-1 Présentation du dimensionnement mécanique

La méthode est décrite de manière succincte dans les figures qui suivent. Une description détaillée est disponible dans [ARA91].

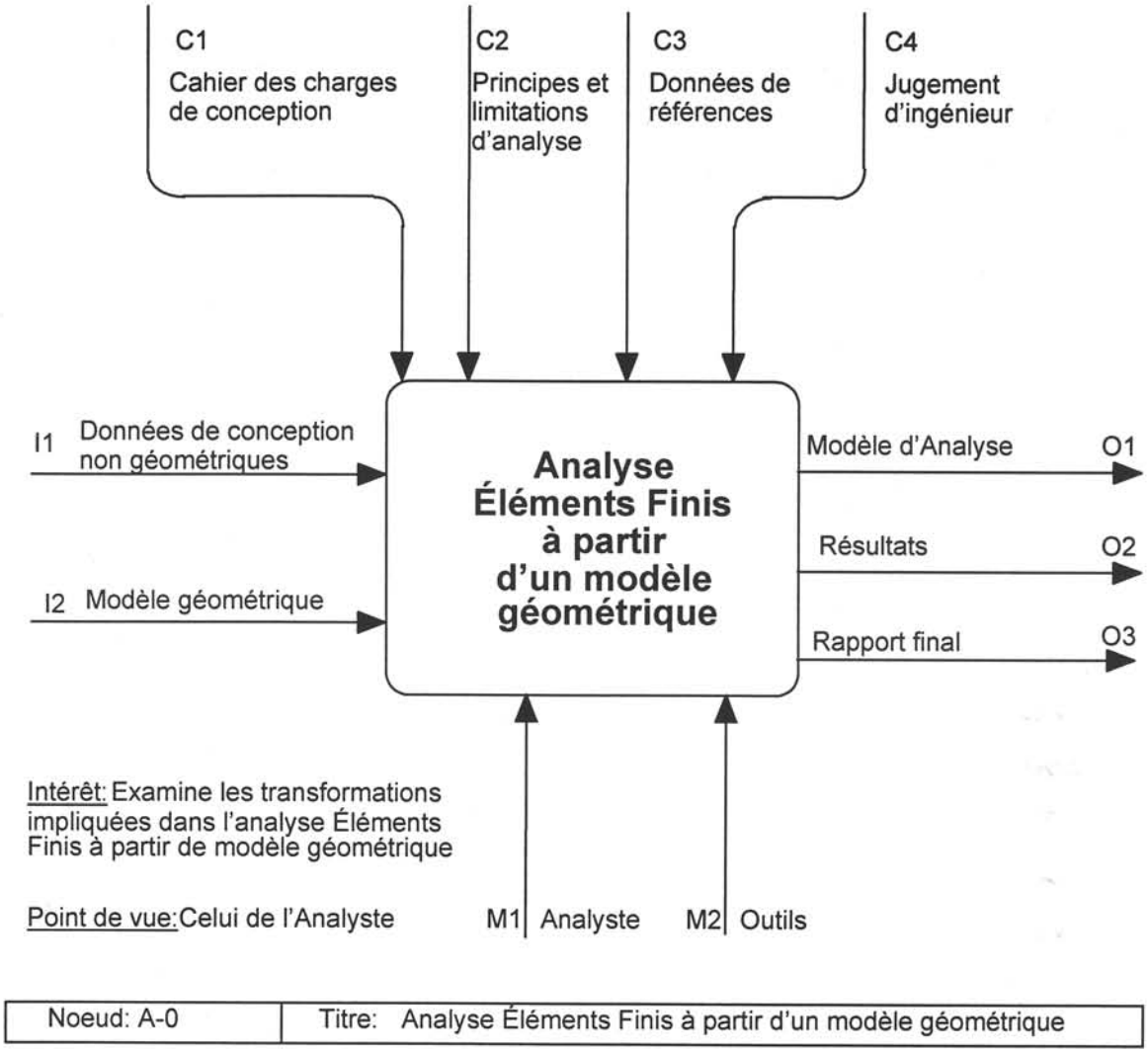


Figure II.3-2 Nœud A-0

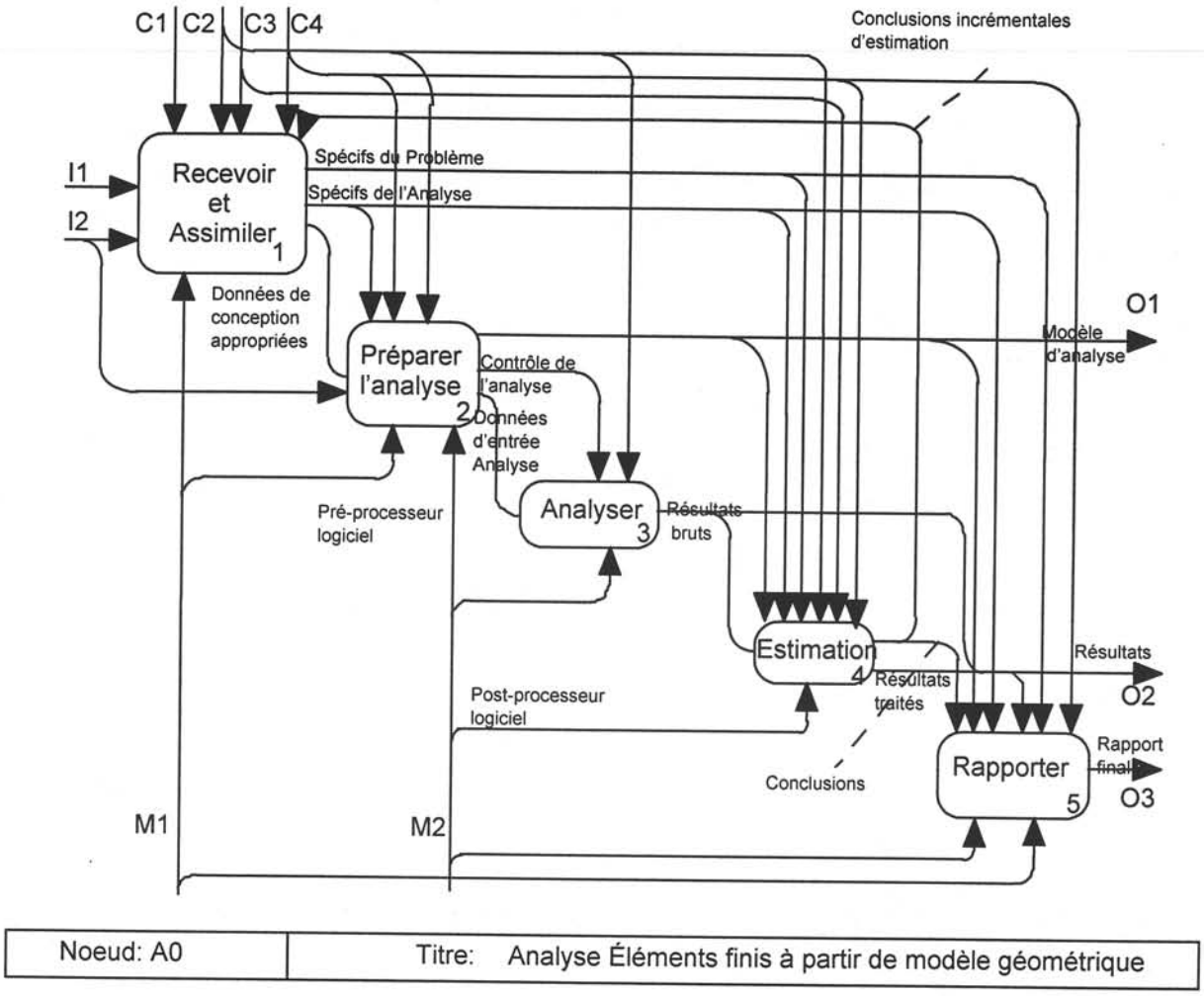


Figure II.3-3 Nœud A0

Ainsi cette étude représentée par la Figure II.3-2 et la Figure II.3-3 est devenue une référence pour la qualité de sa décomposition en processus dans le domaine mécanique et peut servir de base au guidage du processus de résolution d'un problème électromagnétique.

II.4.Comparaison brève entre la mécanique des structures et l'électromagnétisme :

Une fois étudiée l'application de la méthode SADT au domaine de la mécanique des structures, il apparaît intéressant dans le cadre de notre étude de la transposer au domaine électromagnétique. En effet, l'application au domaine mécanique est robuste et déjà éprouvée par les spécialistes mécaniques. Profitant de leur expérience mais soucieux de tenir compte des particularismes entre la mécanique des structures et l'électromagnétisme, il apparaît opportun de comparer sur le plan général, la mécanique des structures et l'électromagnétisme.

Par la connaissance des particularismes théoriques entre ces deux domaines, il devient alors tout à fait concevable, de traduire presque totalement la méthode SADT appliquée en mécanique vers l'électromagnétisme avec un minimum d'adaptations.

II.4.1.De fortes similitudes :

A l'instar de l'électromagnétisme, le calcul en mécanique des structures possède les caractéristiques suivantes :

- Définition des propriétés des objets à l'étude
- Définition des contraintes aux limites des objets (liens entre les objets, contraintes de forces...)
- Application d'un maillage
- Résolution d'un système d'équations aux nœuds du maillage
- Visualisation des résultats

II.4.2. Mais des différences non négligeables :

Nécessité de tenir compte de l'environnement (en général le vide) dans lequel le champ magnétique existe. Cela implique les conséquences suivantes du point de vue du maillage :

- Les maillages sont plus complexes en électromagnétisme qu'en mécanique.
- En mécanique la structure et ses liens avec d'autres structures se suffisent à eux-mêmes contrairement à l'électromagnétisme où les proximités relatives entre les structures sont aussi importantes que les structures et leurs liens.
- Il existe des phénomènes d'interaction à distance, ce qui rend plus délicat la décomposition fonctionnelle en électromagnétisme par rapport à la mécanique.

II.5.Guide du processus de résolution de problèmes électromagnétiques par la méthode des éléments finis selon le formalisme SADT.

Ainsi, les conclusions du paragraphe II.4 permettent à partir de la méthode développée par Arabashi [ARA91] et présentée au paragraphe II.3, de guider par la méthode SADT un utilisateur qui aborde un problème électromagnétique. Il apparaît alors d'après la Figure II.3-3, que seule l'étape de **préparation de l'analyse** nécessite un remaniement pour tenir compte des spécificités du domaine électromagnétique.

Ces différences sont présentées dans les figures ci-dessous, l'ensemble de la méthode est présenté dans l'annexe 1.

Afin de rendre plus lisible l'ensemble du graphe SADT, l'exemple de la trempe superficielle d'une roue dentée est utilisé pour illustrer la démarche. Il a été traité dans le cadre de la thèse de Zgainski[ZGA96]. La méthode SADT est appliquée dans le cas de la préparation de l'analyse qui distingue l'approche mécanique et celle électromagnétique.

Ainsi, l'exemple est issu de l'industrie automobile, et plus précisément d'une boîte de vitesse. Pour traiter en surface, dans le but de durcir des dentures d'engrenage, un des moyens de modification locale des caractéristiques physiques du matériau est la trempe superficielle. On utilise alors un dispositif de chauffage par induction : Il est constitué d'un inducteur (Figure II.5-1) entourant le dispositif à traiter, ici une roue dentée dont on veut modifier les caractéristiques mécaniques en faisant de la trempe artificielle.

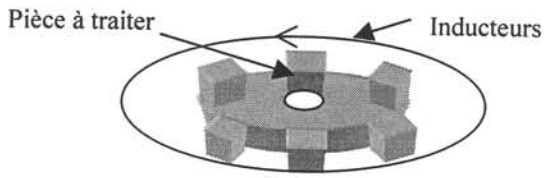
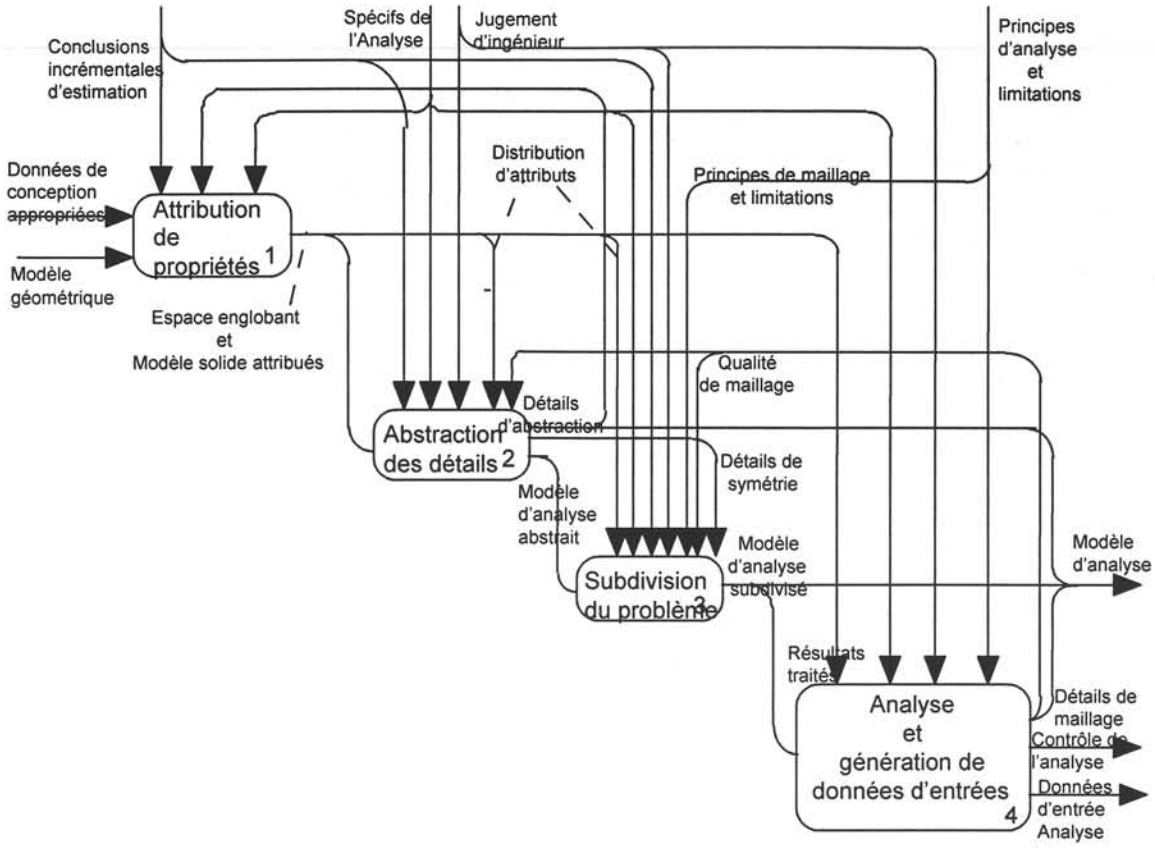


Figure II.5-1 : Principe du chauffage par induction



Noeud: A2	Titre: Préparer l'analyse

Figure II.5-2 Nœud A2

La Figure II.5-2 représente la vision globale de la préparation de l'analyse avec comme données d'entrée :

- Le modèle solide ou l'ensemble des coordonnées des points géométriques représentant le cylindre et ses dents, ainsi que la géométrie des inducteurs.
- Les données de conception sont dans le cas étudié, la fréquence du courant dans l'inducteur qui est de 200 kHz ainsi que les caractéristiques physiques des matériaux.

L'ensemble des autres flux de données est étudié dans les nœuds suivants.

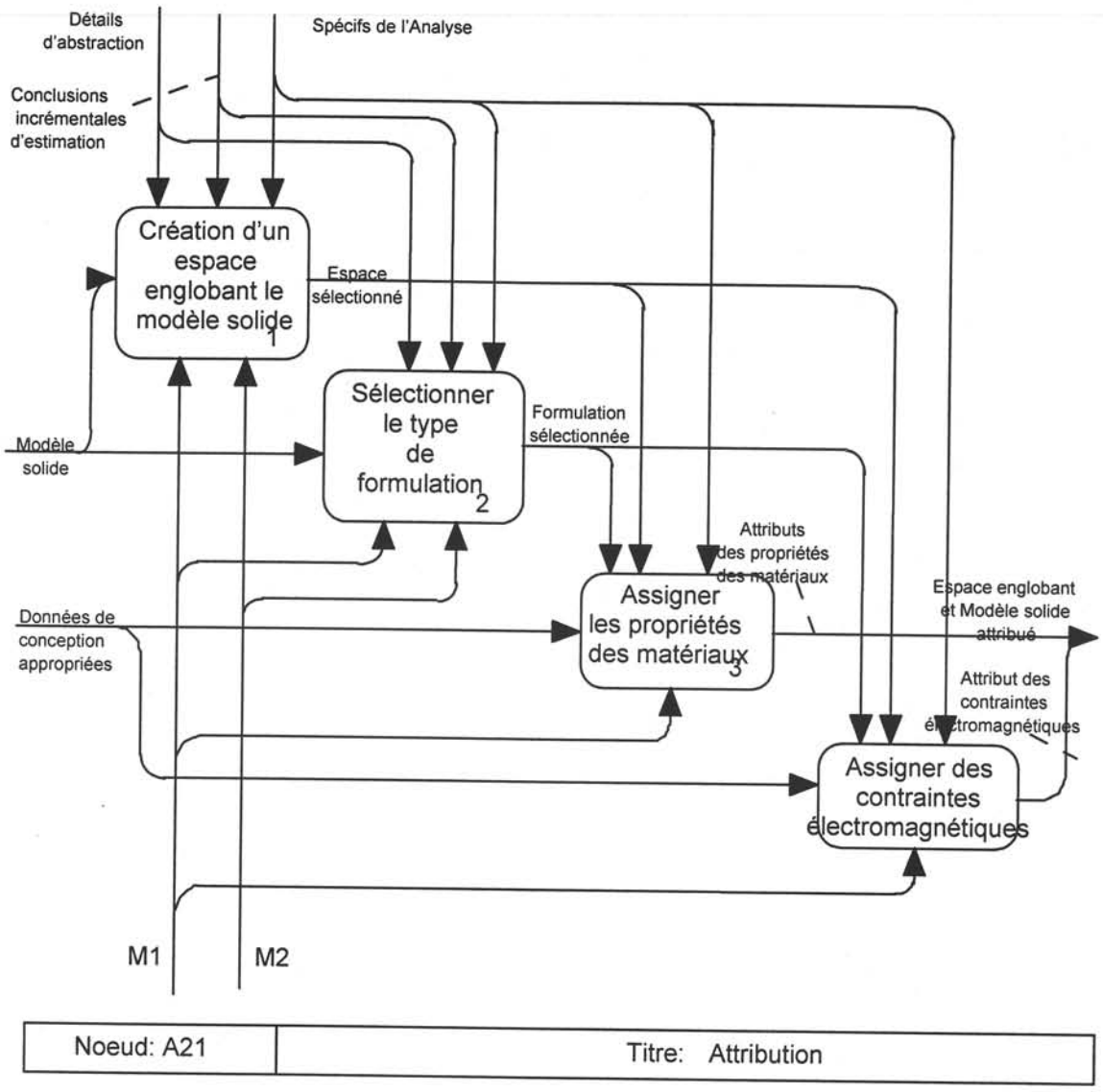


Figure II.5-3 Nœud A21

Lors de cette étape, tout d'abord est défini l'espace englobant représentant l'air dans lequel baigne la pièce à traiter et les inducteurs comme la Figure II.5-4 montre un exemple.

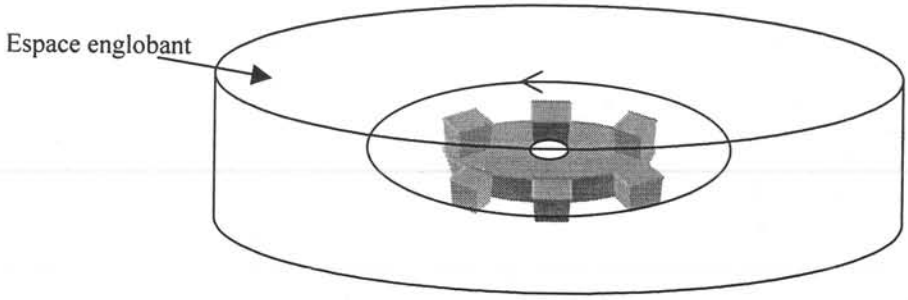


Figure II.5-4 Insertion de l'espace englobant

Ensuite, la formulation est sélectionnée. Dans cet exemple, la formulation A-V magnétodynamique a été choisie.

Après cette étape, vient l'assignation des propriétés au matériau. Dans cet exemple, la pièce à traiter possède les propriétés de l'acier, les inducteurs possèdent les propriétés du cuivre et l'air possède les propriétés du vide.

Enfin, des contraintes électromagnétiques sont assignées au problème, soit le courant passant dans les inducteurs à 200 kHz.

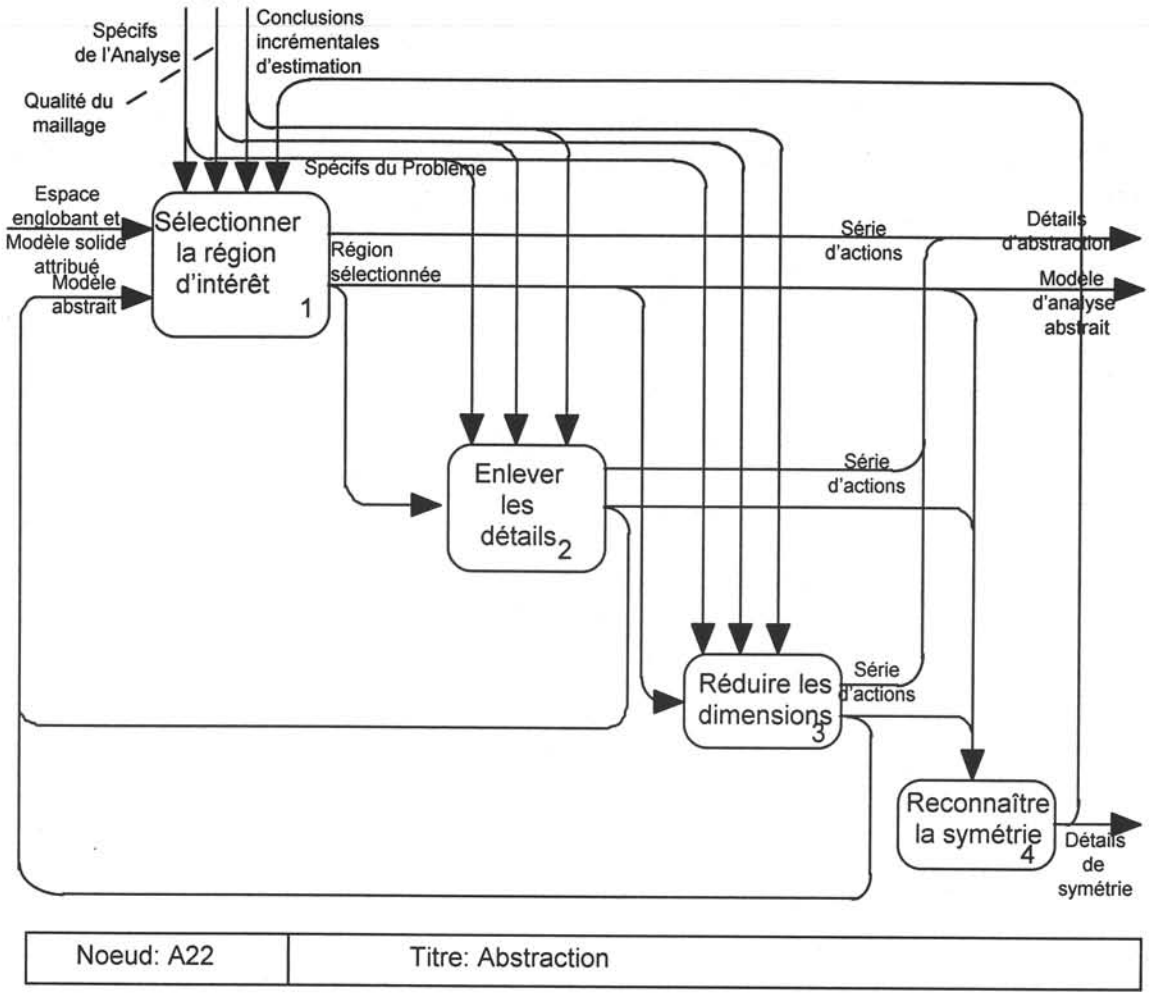


Figure II.5-5 Nœud A22

Chaque région (L'espace englobant, les inducteurs et la pièce à traiter) est étudiée séparément. Les détails sont enlevés comme les congés présents sur les dents pour faciliter le mouvement et comme le trou central de la pièce à traiter laissant passer l'axe. En revanche, il n'y a pas de réduction de dimension car dans le cadre de l'étude, le concepteur désire tenir compte de l'épaisseur aussi bien de la pièce à traiter que de celle des inducteurs.

Enfin, la reconnaissance de la symétrie permet de limiter l'ensemble du problème à l'étude d'une portion de l'espace comme le montre la Figure II.5-6.

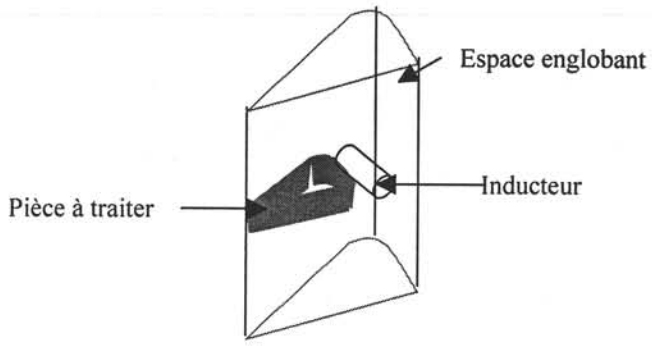


Figure II.5-6 Objet d'étude suite à l'application des symétries

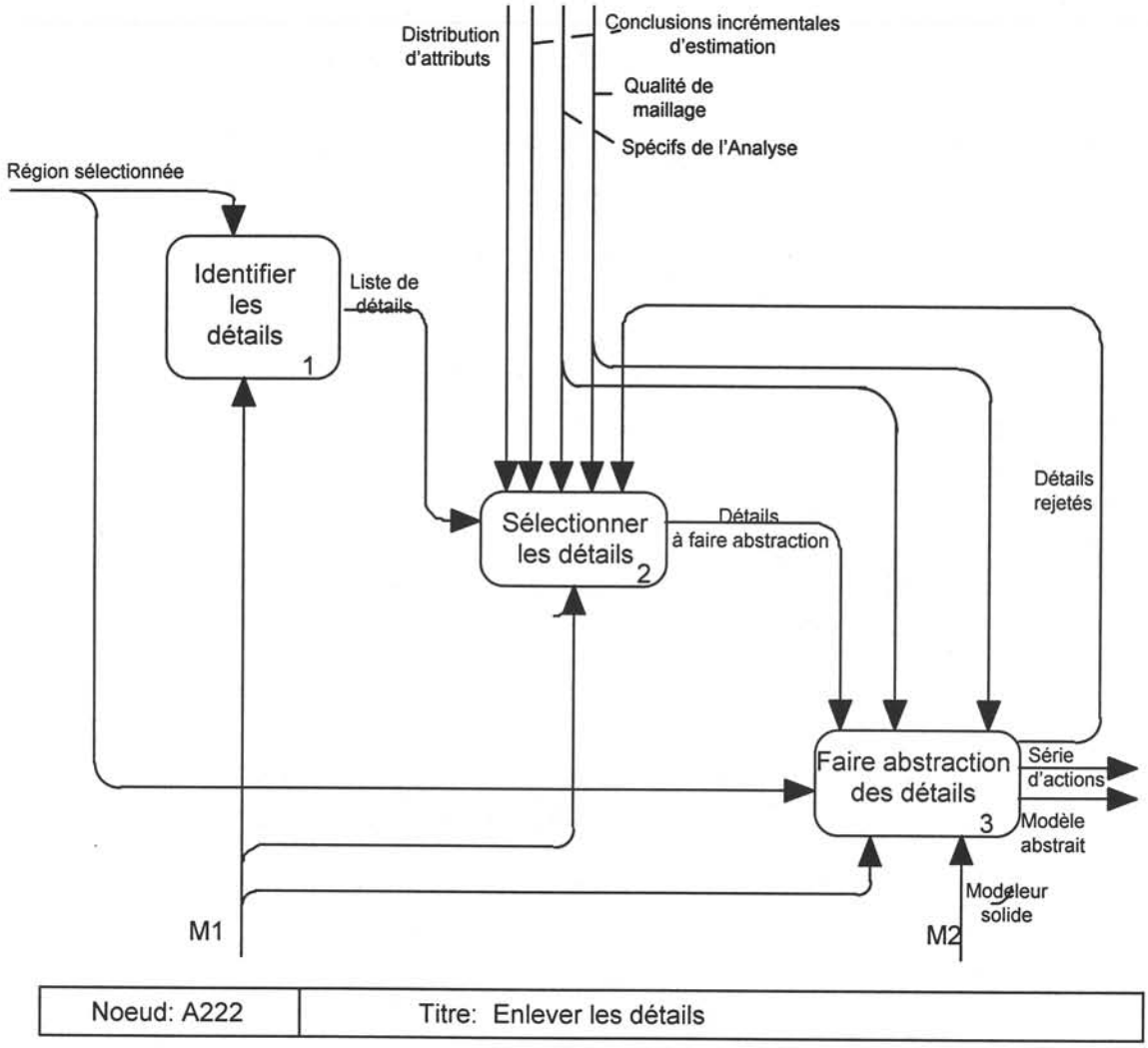


Figure II.5-7 Nœud A222

La Figure II.5-7 détaille le processus d'enlèvement des détails. Ce processus tout d'abord, identifie les détails, ce qui nécessite de qualifier un détail en électromagnétisme. Ensuite une sélection est opérée en fonction du niveau de précision requis par le concepteur. Enfin, un processus d'abstraction des détails est effectué. Dans l'exemple étudié, le trou de la pièce à traiter est remplacé par de l'acier car le concepteur suppose que peu de courant passe par le centre de la pièce et de plus, ce concepteur estime que la simplification géométrique réalisée est plus intéressante que l'éventuelle perte de précision. De plus, les congés sont retirés au niveau des dents car ces congés n'ont qu'une utilité mécanique, assurer le non blocage de dents entre elles. La disparition des congés permet alors une grande simplification géométrique très utile dans la suite des calculs. La Figure II.5-8 illustre le processus.

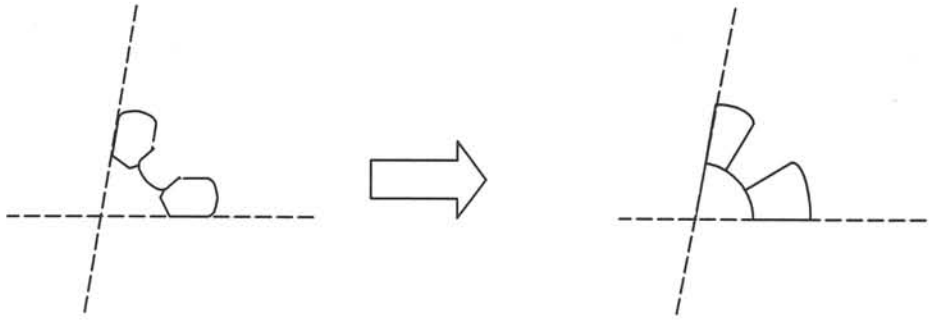


Figure II.5-8 « Enlever les détails » sur une dent

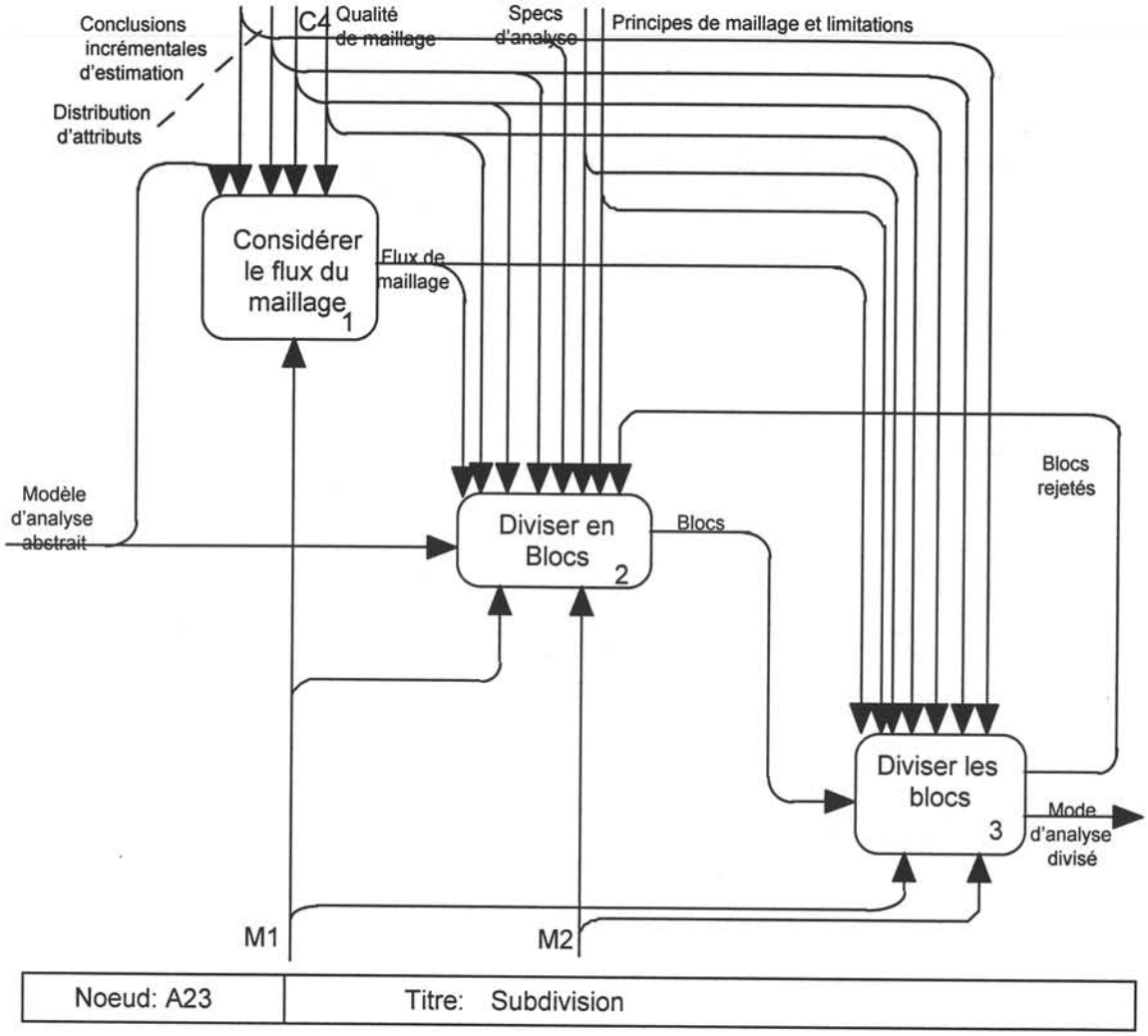


Figure II.5-9 Nœud A23

Dans la Figure II.5-9, est réalisée la subdivision qui détermine des domaines souvent plus petits que les domaines physiques Ces petits domaines nécessitent d'après le concepteur, différents niveaux d'analyse. Tout d'abord, le flux du maillage détermine les régions où par exemple une forte variation des variables physiques, nécessite un maillage plus fin et donc plus précis. Ainsi, dans l'exemple, il est nécessaire de mailler très finement les dents de la pièce à traiter. En effet d'énormes variations de courant induit se réalisent au niveau de ces dents. Ensuite, il devient possible de diviser en blocs le problème étudié. Et enfin, la division de ces blocs permet de créer le niveau de finesse du maillage futur. La Figure II.5-10 illustre cette subdivision pour une dent.

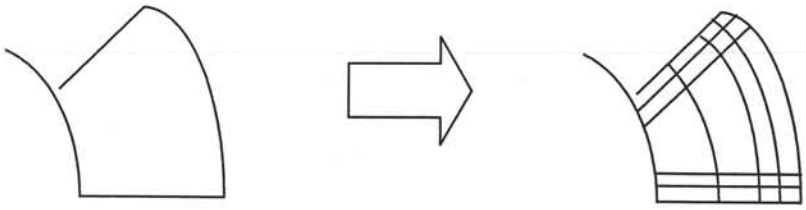


Figure II.5-10 Subdivision sur dent

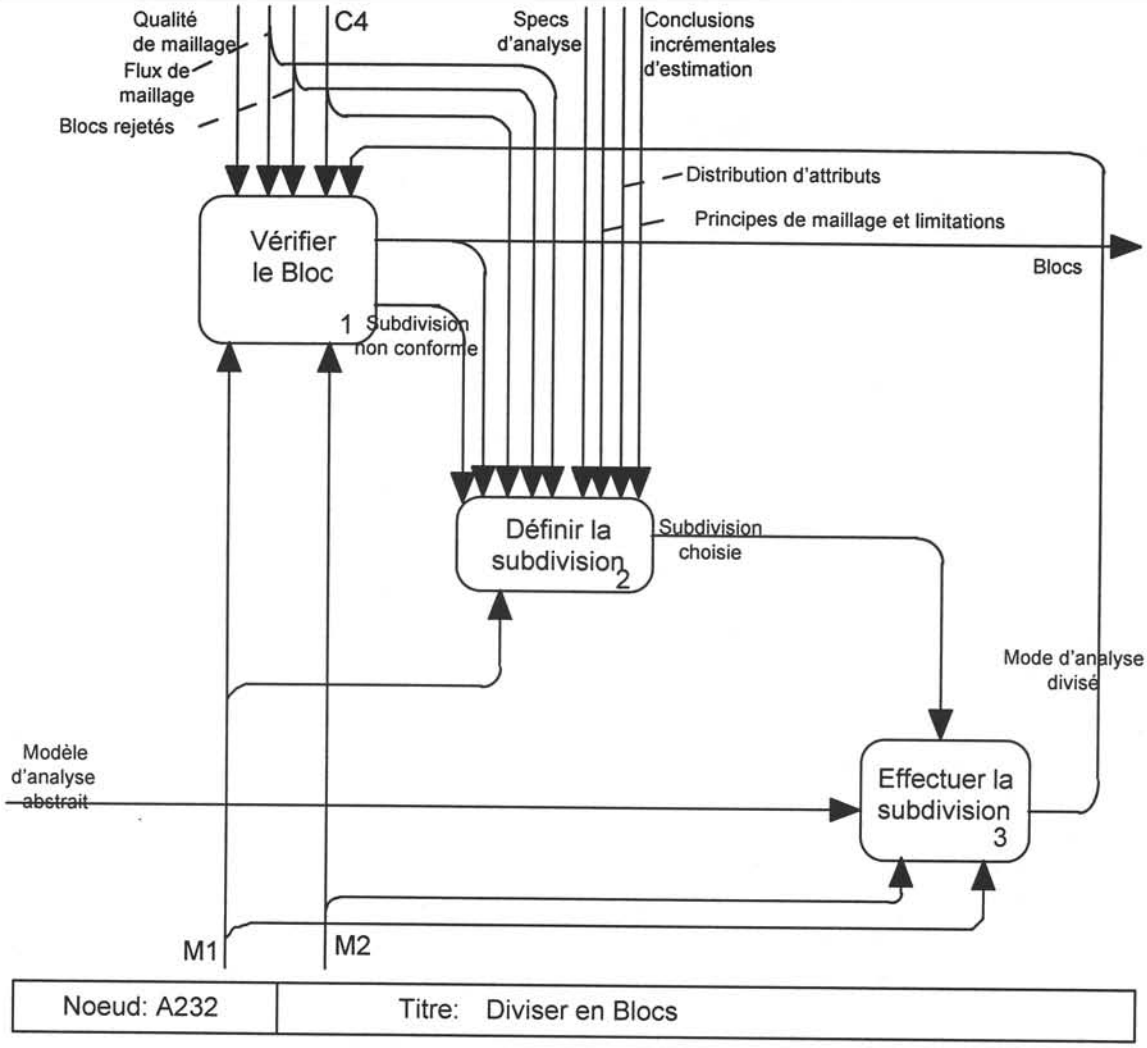


Figure II.5-11 Nœud A232

Dans la Figure II.5-11, est réalisé le processus de division en blocs. Tout d'abord, après une première subdivision, les blocs sont contrôlés pour vérifier plusieurs points comme la connexité et l'intégrité de ceux-ci. Si des points sont à modifier, est redéfinie une meilleure subdivision suivant des critères définis par l'utilisateur. Ensuite une nouvelle subdivision est effectuée. Et si la vérification aboutit à une conclusion positive, les blocs ainsi créés sont admis pour la suite du processus. La Figure II.5-12 illustre la division en blocs sur dent.

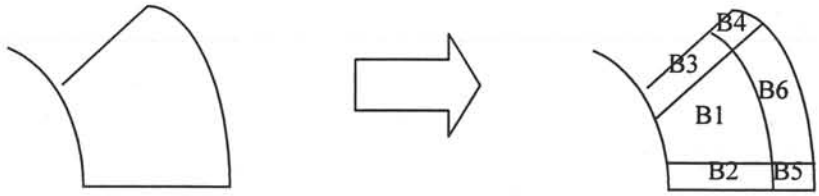


Figure II.5-12 Division en blocs sur dent

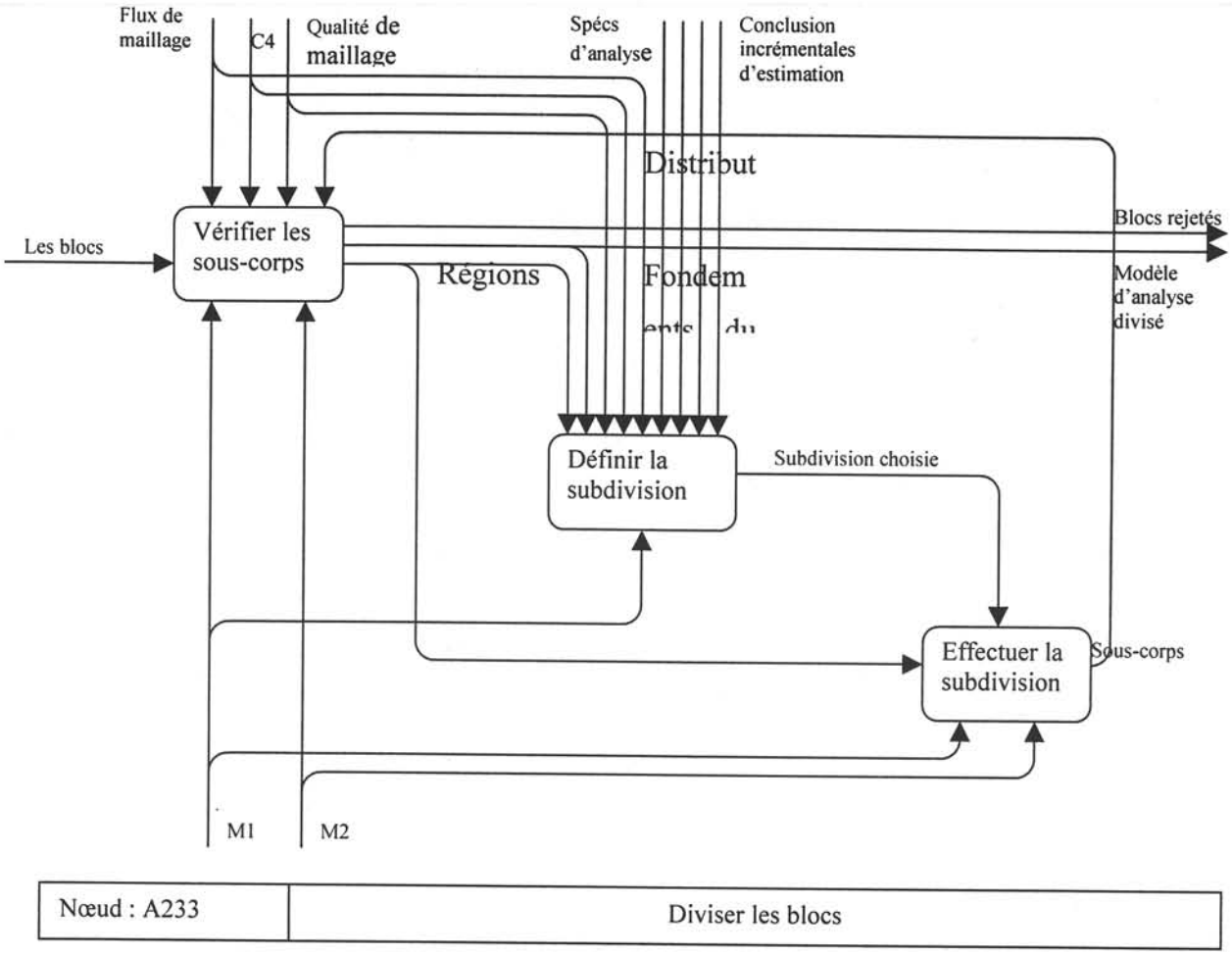


Figure II.5-13 Nœud A233

Dans la Figure II.5-13 Nœud A233, chaque bloc est contrôlé suivant la qualité du maillage demandé et l'état de chaque bloc. On divise alors les blocs restants après la définition de cette division. On obtient alors un espace divisé en blocs. La Figure II.5-14 illustre l'obtention des nœuds suite à la division des blocs.

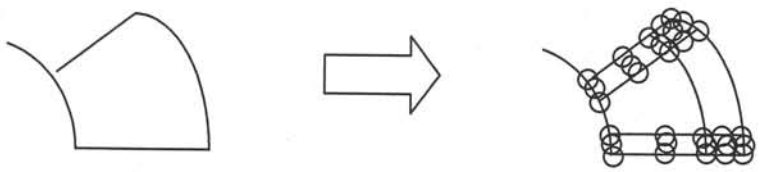


Figure II.5-14 Nœuds obtenus lors de la division des blocs

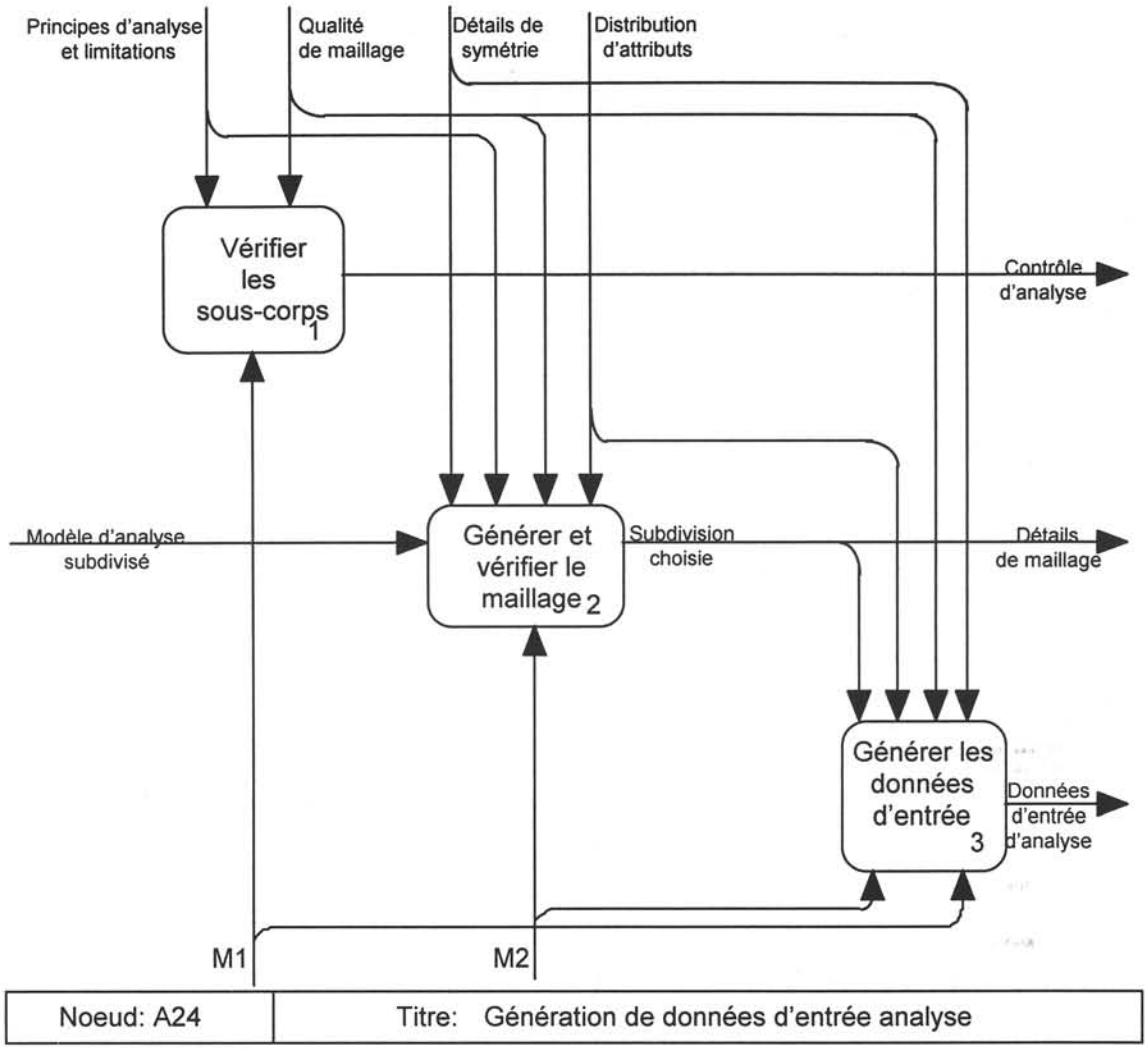


Figure II.5-15 Nœud A24

La Figure II.5-15 représente la dernière étape de préparation de l'analyse. Tout d'abord, les sous-corps sont vérifiés, cela signifie que l'on vérifie la cohérence entre les régions physiques et les blocs déterminés. Ensuite, à partir des blocs et de leurs différents niveaux de précision, est réalisé le maillage. Enfin, toutes les contraintes électromagnétiques et les contraintes de symétrie sont associées aux nœuds ou aux segments du maillage pour aboutir aux données d'entrée d'analyse.

Une étape du processus de dimensionnement a ainsi été résolue, cette étape est désormais bien balisée et publiée dans un article référencé [PEC98].

II.6.Conclusion :

Ainsi, suite à la présentation de la méthode SADT et de son application au domaine de la mécanique des structures, nous avons proposé son adaptation au domaine de l'électromagnétisme. Alors après un récapitulatif général de l'ensemble des points communs mais aussi des différences entre l'électromagnétisme et la mécanique, la méthode SADT est appliquée au domaine électromagnétique accompagné d'un exemple typique en électromagnétisme.

On cherche ici à capitaliser le savoir de l'utilisateur mais pas à le remplacer. Cette nouvelle méthode présentée au paragraphe II.3 permet de guider le processus de résolution de problèmes électromagnétiques.

Cette démarche qui répond parfaitement au cahier des charges définis au paragraphe II.1 a de nombreux avantages :

- Elle est reproductible à d'autres domaines physiques,
- Elle assure un gain de temps appréciable par la lisibilité du formalisme SADT
- Les différents niveaux de détails permettent de s'adapter à différents types d'utilisateurs.

Chapitre III Capitalisation du savoir-faire du concepteur en génie électrique

Au chapitre précédent, nous avons défini un cadre rigoureux et relativement exhaustif pour traiter de nombreux problèmes électromagnétiques. Mais, le processus de dimensionnement en génie électrique n'a pas encore été bien défini car ce processus est long et complexe en regroupant de nombreuses étapes interdépendantes. Il devient nécessaire de mettre en valeur l'expérience de chaque concepteur qui a sa manière de concevoir à partir de son expérience mais aussi de celles des autres concepteurs. En effet, ces concepteurs ont des bases communes dont les contours sont peu marqués.

Ainsi, apparaît un besoin de mieux définir le processus de conception en génie électrique dans l'entreprise. Il apparaît aussi nécessaire de pouvoir y échanger et pérenniser le savoir-faire.

D'où l'objectif de capitalisation et de réutilisation de l'ensemble des informations nécessaires à la conception dans une entreprise pour une gamme de produits.

Dans ce chapitre, nous allons donc tenter de développer cette démarche. Dans un premier temps, nous exprimerons plus précisément notre objectif sous la forme d'un « cahier des charges » de la démarche de capitalisation. Ensuite, nous ferons une analyse de l'existant et en particulier de l'événementiel de Troussier [TRO99] et de son utilisation dans le cadre proche du notre qui est celui de la simulation mécanique. Cette analyse nous permettra de proposer une transposition de cette méthode à notre domaine de l'électromagnétisme.

III.1.Cahier des charges de la démarche de capitalisation :

Il apparaît que cette méthode doit permettre à un utilisateur de capitaliser et de réutiliser l'ensemble des informations nécessaires à la conception de dispositifs en offrant :

- Une approche permettant de rassembler de la manière la plus naturelle possible l'ensemble à la fois des hypothèses d'étude, des choix technologiques, des conséquences pratiques liées à la conception en génie électrique
- Une grande lisibilité pour assurer un cadre plus rigoureux

Ainsi, cette méthode qui fournit un cadre de capitalisation et de réutilisation, doit permettre aussi une certaine liberté de manœuvre au concepteur pour qu'il en fasse son cadre de travail quotidien. L'ensemble des informations collectées est hiérarchisé afin de permettre un traitement a posteriori plus facile pour dégager des règles de conception pour en améliorer l'usage.

III.2.Présentation de la méthode développée pour la mécanique et transposition en génie électrique :

Suivant le travail de Troussier [TRO99], il est possible de décomposer le processus de conception en plusieurs entités :

- le modèle de conception
- le but de simulation
- le modèle physique
- le modèle de simulation
- les résultats
- la conclusion

Nous allons donc présenter les entités utiles de Troussier en transposant son travail lorsque c'est possible du domaine mécanique au domaine du génie électrique.

III.2.1.Le modèle de conception

Les données nécessaires pour effectuer un calcul sont souvent à la fois fonctionnelles, géométriques et technologiques. Cependant, leur proportion et leur définition dépendent de l'état d'avancement de la conception. En début de conception, par exemple, la géométrie sera très mal définie et incertaine. Dans un contexte de conception industrielle, l'environnement d'utilisation du produit est au contraire relativement bien connu dès le début de la conception, même si le Cahier des Charges Fonctionnel n'est pas totalement défini ni stabilisé. Dans ce cadre, indéfini et incertain, des calculs peuvent être réalisés de façon à effectuer des choix de conception. Dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions, le calcul peut être utilisé de façon prospective relativement à des solutions innovantes.

Ainsi, l'entité Modèle de Conception se définit comme étant la description géométrique, technologique et fonctionnelle (même partielle) du produit à un instant donné de la conception.

III.2.2.Le but de simulation

Dans la perspective de favoriser la coopération entre le concepteur et l'analyste, il paraît intéressant d'utiliser le concept d'entité de coopération. En d'autres termes, des entités spécifiques doivent être regroupées pour former des dispositifs de coopération afin de :

- Favoriser le passage d'un problème de conception à un problème de modélisation,
- Assurer une réponse pertinente à ce problème initialement formulé.

Il faut donc définir des entités de coopération sur lesquelles à la fois le concepteur et le spécialiste du calcul puissent avoir des prises, qui permettent de définir un objectif contextualisé de calcul (c'est à dire qui intègre des informations sur le contexte de conception dans lequel vient s'insérer le calcul) et de lui répondre.

Dans cette perspective, l'entité But de Simulation définit le problème qui se pose au calcul. Sa construction requiert à la fois des connaissances sur la conception et sur le calcul. Il doit permettre d'identifier le type de calcul auquel il renvoie (par exemple, « Vérifier » renvoie généralement à un calcul de validation, « Etudier l'influence des paramètres » à un calcul d'aide au choix...). Le système qui fait l'objet de l'étude doit être spécifié ainsi que ses conditions d'utilisation par rapport à son environnement. La grandeur physique à laquelle on s'intéresse doit être citée (au moins implicitement : par exemple le mot tenue signifie habituellement que l'on s'intéresse aux contraintes).

La Figure III.2-1 illustre la formulation de ce but de simulation.

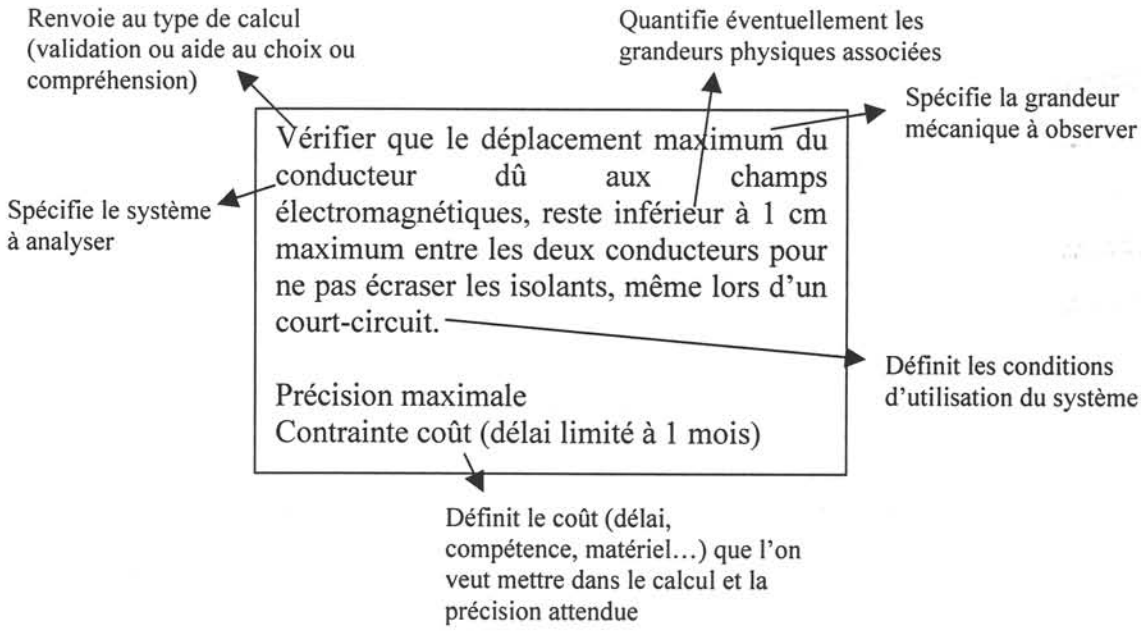


Figure III.2-1 Exemple de structuration du But de Simulation

III.2.3.Le modèle physique

Le modèle physique contient le comportement physique que l'on veut traduire pour répondre au problème posé et les hypothèses associées. Il correspond au croquis et aux quelques notes que les spécialistes du calcul tracent sur un brouillon avant de se lancer dans leur calcul. Il définit le problème à résoudre, au sens de Schön [SCH91]. Dans les pratiques actuelles, ce brouillon disparaît généralement du rapport de calcul, lequel constitue souvent la seule trace

« pérenne » du calcul. Il est donc important de donner un réel statut à ces brouillons, de leur donner un certain formalisme et de les tracer de la même façon que les autres modèles de produit ; c'est dans la construction de ce modèle physique que se trouve une grande partie de la connaissance liée au calcul.

III.2.4.Le modèle de simulation

A partir des informations de conception, l'analyste (que ce soit un concepteur formé au calcul ou un spécialiste du calcul) construit un modèle qui va lui permettre d'effectuer son calcul. Dans le cadre de l'utilisation de méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis, le processeur de calcul requiert un maillage (représentation discrétisée de la structure, choix du type d'éléments finis), des conditions aux limites ou frontières, ainsi que des paramètres d'analyse relatifs aux régions physiques (pour définir le comportement physique du matériau par exemple).

Toutes ces informations nécessaires à la procédure de calcul, sont regroupées sous le nom de Modèle de Simulation.

III.2.5.Les résultats

Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de graphiques, de tableaux, de cartes d'isovaleurs.... L'entité Résultats découle directement des choix faits dans le Modèle de Simulation.

Plus tard dans la conception, le produit sera mieux défini géométriquement, technologiquement et fonctionnellement ce qui pourra conduire à des évaluations plus quantitatives du comportement du produit.

III.2.6.La conclusion

L'entité Conclusion est l'interprétation qui est dressée par l'analyste à partir de l'entité Résultat. Elle est fortement liée à son auteur qui en a la responsabilité et elle doit répondre au But de Simulation. Pour permettre à son auteur de s'exprimer un peu librement, la Conclusion n'est pas une entité structurée par avance.

La conclusion, tout comme le But de Simulation, sont des entités qui doivent être définies par une réelle négociation entre le concepteur demandeur du calcul et l'analyste qui va l'effectuer. C'est essentiellement dans la négociation que ces deux entités apportent à la fois de nouvelles connaissances et permettent l'intégration du calcul physique dans le processus de conception.

III.2.7.Liens entre les entités

Ce formalisme comporte deux types de liens entre entités :

- les liens chronologiques pour la compréhension du processus de conception. (Cf. Figure III.2-).
- Les liens de dépendance pour la réutilisation de ce processus (Cf. Figure III.2-)

La Figure III.2- montre les liens chronologiques entre les entités dans le cas idéal c'est à dire sans échec dû à une impossibilité ou à un changement de stratégie du concepteur. Les flèches épaisses montrent le chemin idéal descendant de conception. Les fines flèches, en revanche, montrent le chemin idéal ascendant lors du processus de conception.

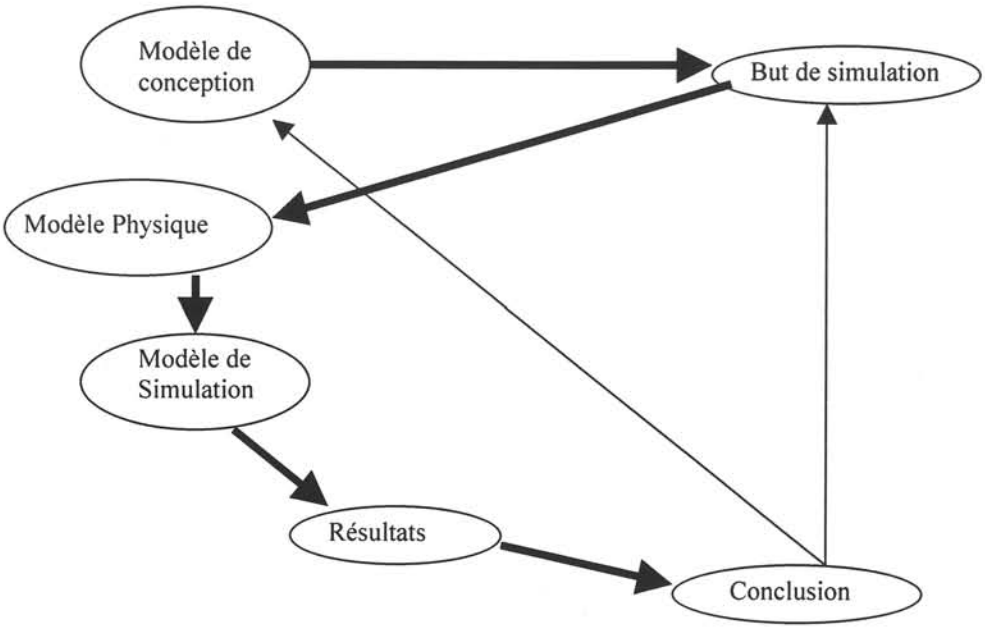


Figure III.2-2 : Chemin idéal et liens chronologiques

On voit dans cette Figure III.2-2 que dans le meilleur des cas, les entités Modèle de conception et But de simulation sont libres d'être choisies par le concepteur à la suite de sa conclusion.

Mais ce chemin ne limite pas au contraire la grande flexibilité de l'événementiel. Ainsi, dans le cas où l'utilisateur réalise que le But de simulation défini au préalable doit être redéfini pour être exploitable, plusieurs chemins sont possibles comme l'illustre la Figure III.2-3.

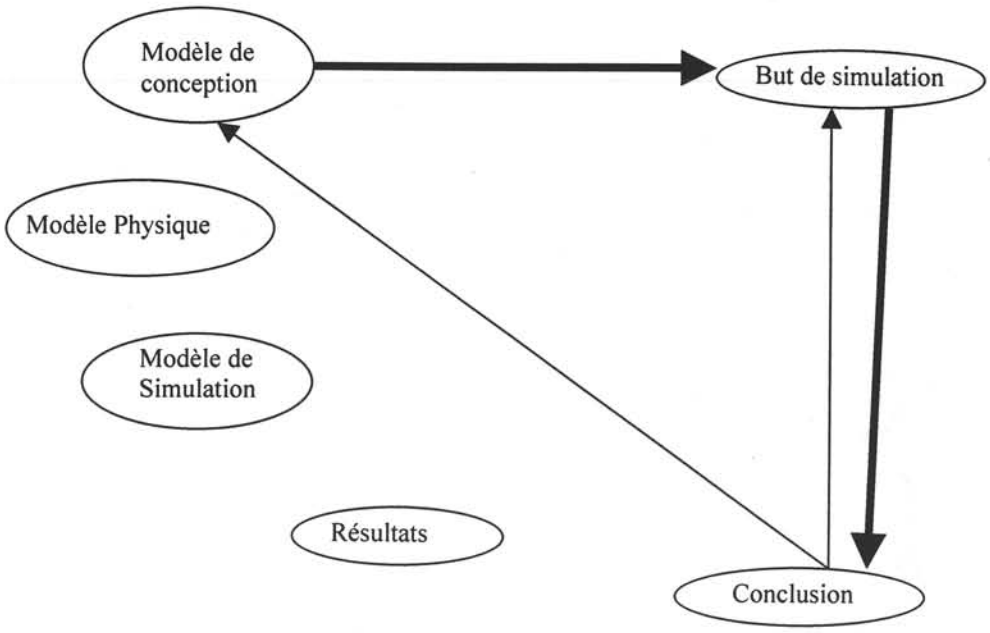


Figure III.2-3 Echec du But de simulation et liens chronologiques

Dans le cas d'un échec au niveau du but de simulation, le concepteur doit obligatoirement rendre compte dans sa conclusion. Et suivant celle-ci, il peut redéfinir un But de simulation ou bien un Modèle de conception pour relancer le chemin idéal qui est son objectif.

D'autres échecs peuvent apparaître comme par exemple le Modèle de simulation dans le cas où des raisons matérielles (Division par zéro,....) empêche le modèle de fonctionner. La Figure III.2-4 illustre ce propos.

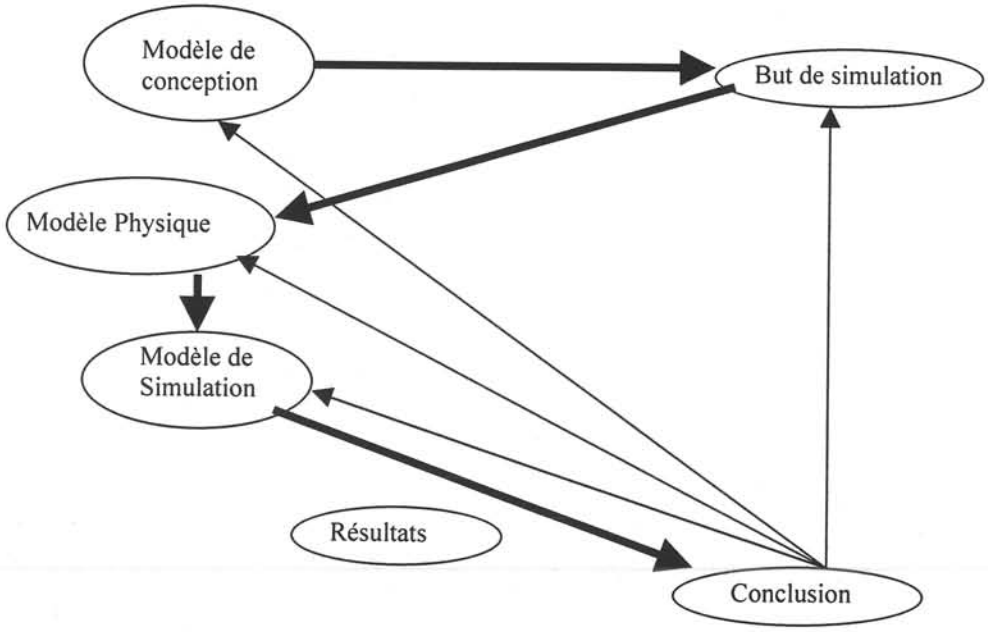


Figure III.2-4 Echec du Modèle de simulation et liens chronologiques

Dans le cas d'un échec au niveau du modèle de simulation, le concepteur doit obligatoirement rendre compte dans sa conclusion. En effet, ces conclusions permettent de capitaliser un précieux savoir-faire pour l'entreprise. Ces conclusions permettent de redéfinir soit le modèle de conception, soit le but de simulation, soit le modèle mécanique, soit le modèle de simulation. Une fois, cette redéfinition réalisée, le concepteur reprend son chemin idéal en cours jusqu'au prochain échec ou la conclusion de son étude.

Mais les liens chronologiques ne suffisent pas, il en apparaît d'autres.
La Figure III.2-5 montre les liens de dépendance entre les entités permettant de réutiliser l'événementiel et surtout de le modifier en maintenant la cohérence du processus de conception.

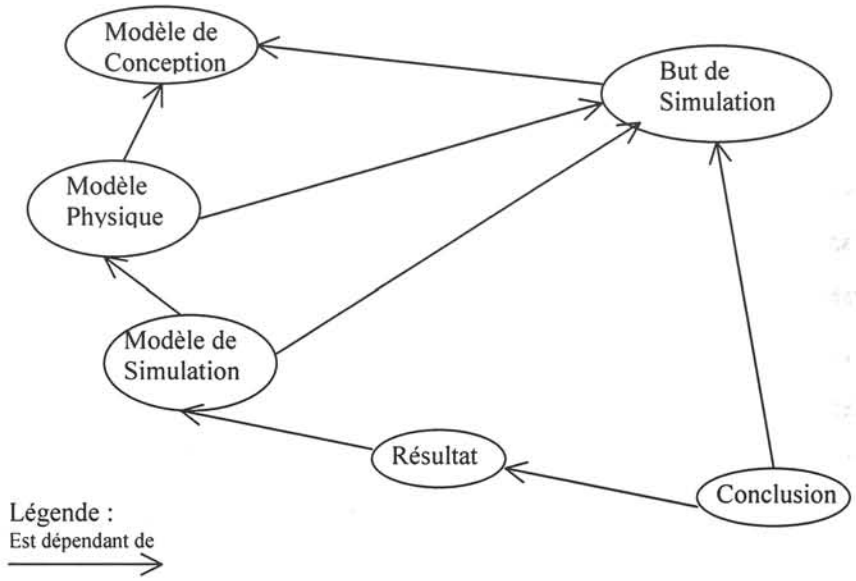


Figure III.2-5 Les liens de dépendance

Ce formalisme est représenté graphiquement sous la forme d'un événementiel, la lecture s'effectuant de gauche à droite et du haut vers le bas, les flèches permettant une plus grande lisibilité, en indiquant la chronologie entre les étapes de conception. La Figure III.2-1 donne un aperçu de ce formalisme.

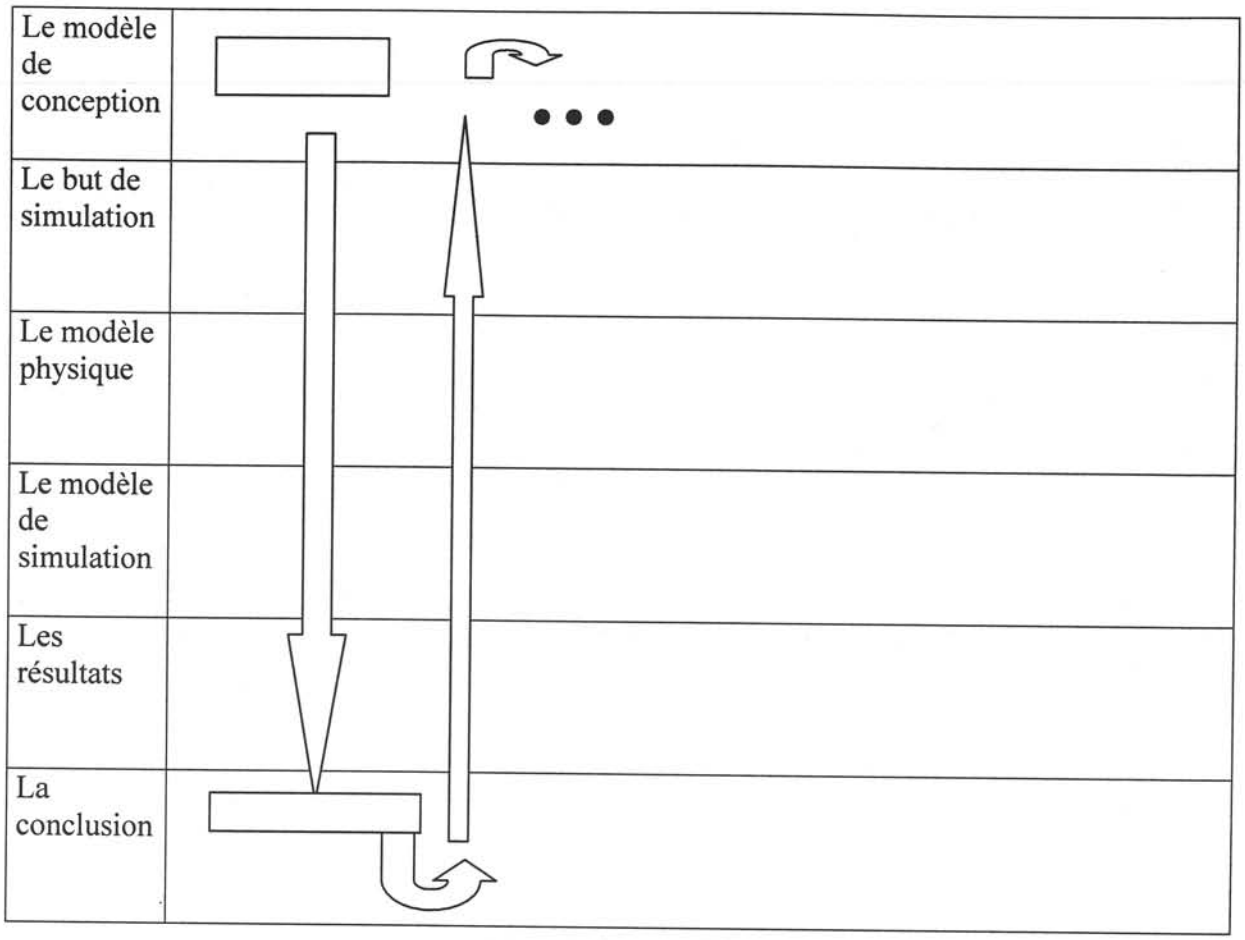


Figure III.2-1 Aperçu du formalisme

III.3.Application dans le cadre du génie électrique :

En tenant compte des remarques formulées au paragraphe du chapitre précédent, il apparaît que la méthode de Troussier est directement transposable sans changement aussi bien aux domaines électromagnétiques, thermiques, mécaniques… qui forment les problèmes couplés extrêmement fréquents en génie électrique.

Ainsi, pour démontrer, l'efficacité du formalisme, il sera utilisé dans deux problèmes à la fois distincts et complémentaires en génie électrique :

- Le premier faisant intervenir des contraintes électromagnétiques, thermiques et mécaniques.
- Le second concernant un problème rassemblant électromagnétisme et mécanique avec un critère de stabilité.

III.3.1.Les problèmes du conducteur haute tension :

On reprend le problème étudié par Kama [KAM99]. L'objet de cette étude porte sur les conducteurs haute tension composés principalement d'un cylindre de métal conducteur électrique. Celui-ci est entouré d'une enveloppe cylindrique métallique qui a pour fonction de réduire la distance d'isolement entre les conducteurs mis côte à côte. Entre l'enveloppe métallique et le conducteur électrique, s'interpose une couche d'air ainsi que trois isolants en céramique pour séparer mécaniquement le conducteur central et son enveloppe protectrice comme le montre la Figure III.3-1.

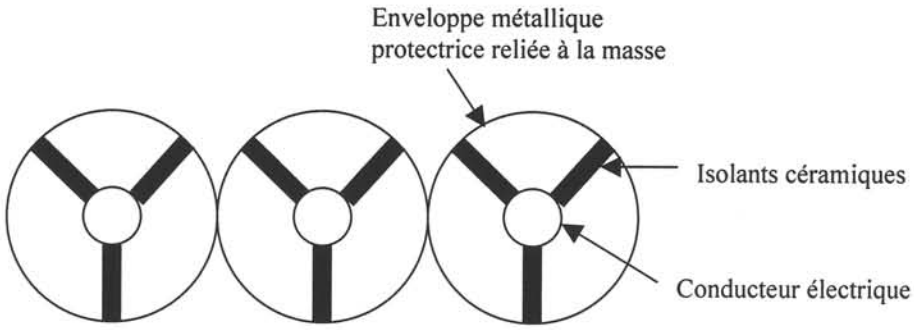


Figure III.3-1 Coupe du système de conducteurs cylindriques triphasés mis côte à côte

Dans le cas de ce système de conducteurs, deux problèmes préoccupent notre concepteur :

- Un problème électromécanique dans le cadre du coude,
- Un problème thermique dans la cas du raccord de conducteurs linéaires.

III.3.1.a Le problème du coude

En présence d'un coude de ce conducteur représenté à la Figure III.3-1, il pourrait se poser un problème en cas de forte charge de courant entraînant une déformation mécanique très importante du conducteur et une destruction des isolateurs. Afin de prévenir ce type de problème, on étudie ce problème en appliquant la méthode présentée dans le paragraphe III.2, afin de connaître son comportement électromécanique pour anticiper toute rupture ou déformation importante.

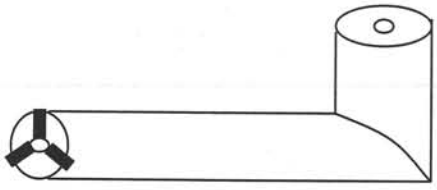
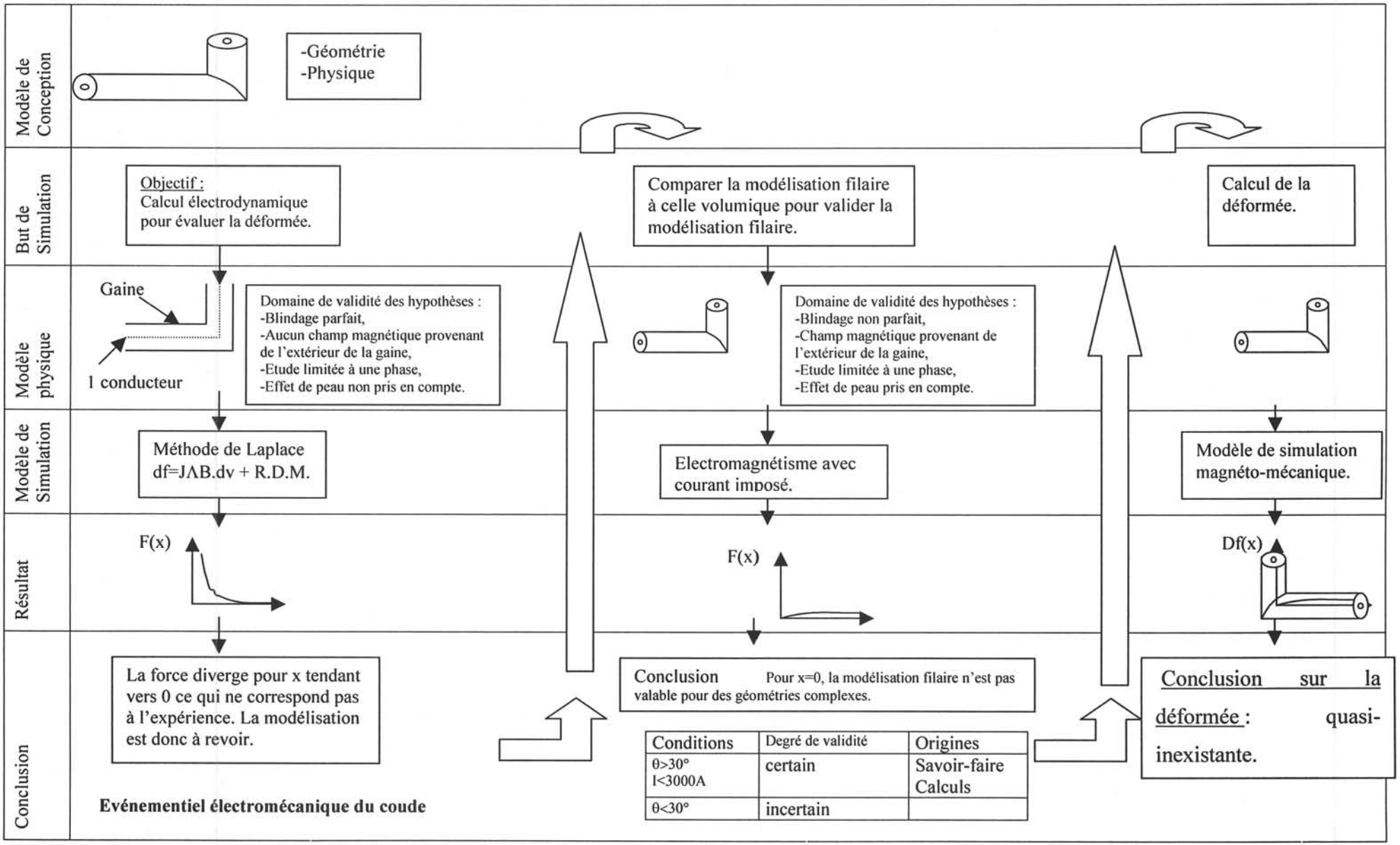


Figure III.3-1 Représentation d'un coude

Pour présenter la méthode d'analyse utilisée, l'événementiel suivant représente l'étude électromécanique.


Modèle de Conception
-Géométrie
-Physique
But de Simulation
Objectif :
Calcul électrodynamique pour évaluer la déformée.
Comparer la modélisation filaire à celle volumique pour valider la modélisation filaire.
Calcul de la déformée.
Modèle physique
Gaine
1 conducteur
Domaine de validité des hypothèses :
-Blindage parfait,
-Aucun champ magnétique provenant de l'extérieur de la gaine,
-Etude limitée à une phase,
-Effet de peau non pris en compte.
Domaine de validité des hypothèses :
-Blindage non parfait,
-Champ magnétique provenant de l'extérieur de la gaine,
-Etude limitée à une phase,
-Effet de peau pris en compte.
Modèle de Simulation
Méthode de Laplace
df=JΛB.dv + R.D.M.
Electromagnétisme avec courant imposé.
Modèle de simulation magnéto-mécanique.
Résultat
F(x)
F(x)
Df(x)
Conclusion
La force diverge pour x tendant vers 0 ce qui ne correspond pas à l'expérience. La modélisation est donc à revoir.
Conclusion Pour x=0, la modélisation filaire n'est pas valable pour des géométries complexes.
Conditions | Degré de validité | Origines
θ>30° I<3000A | certain | Savoir-faire Calculs
θ<30° | incertain |
Conclusion sur la déformée : quasi-inexistante.
Evénementiel électromécanique du coude

Afin de faciliter la lecture de l'événementiel précédent, chaque paragraphe qui suit, va expliciter une colonne d'événements de gauche vers la droite.

III.3.1.b Première colonne : Modélisation filaire du coude

Le concepteur prend le problème dans sa plus simple expression, c'est à dire avec un nombre important d'hypothèses favorables qui limitent les calculs et en utilisant simplement la méthode Laplace df=JΛB.dv + R.D.M.

Le concepteur obtient par cette méthode une force qui tend vers l'infini à l'angle du coude pour x=0. Ce résultat contredit l'aspect expérimental des coudes conducteur d'électricité.

Il apparaît alors un problème de modélisation qui en nécessite une plus fine réalisée dans la deuxième colonne.

III.3.1.c Deuxième colonne : Modélisation volumique du coude par la méthode électromagnétique avec courant imposé

Le concepteur tient compte de la géométrie en trois dimensions du coude. Il utilise une méthode relativement peu coûteuse en calcul, la méthode électromagnétique avec courant imposé. Il obtient, cette fois, une force qui s'annule pour x=0, ce qui correspond plus à la réalité et qui contredit définitivement la méthode filaire qui apparaît comme une méthode peu fiable pour des géométries complexes.

Le concepteur choisit donc la méthode volumique pour évaluer la déformée du coude. Il utilise une méthode assez lourde dans la troisième colonne pour évaluer la déformée.

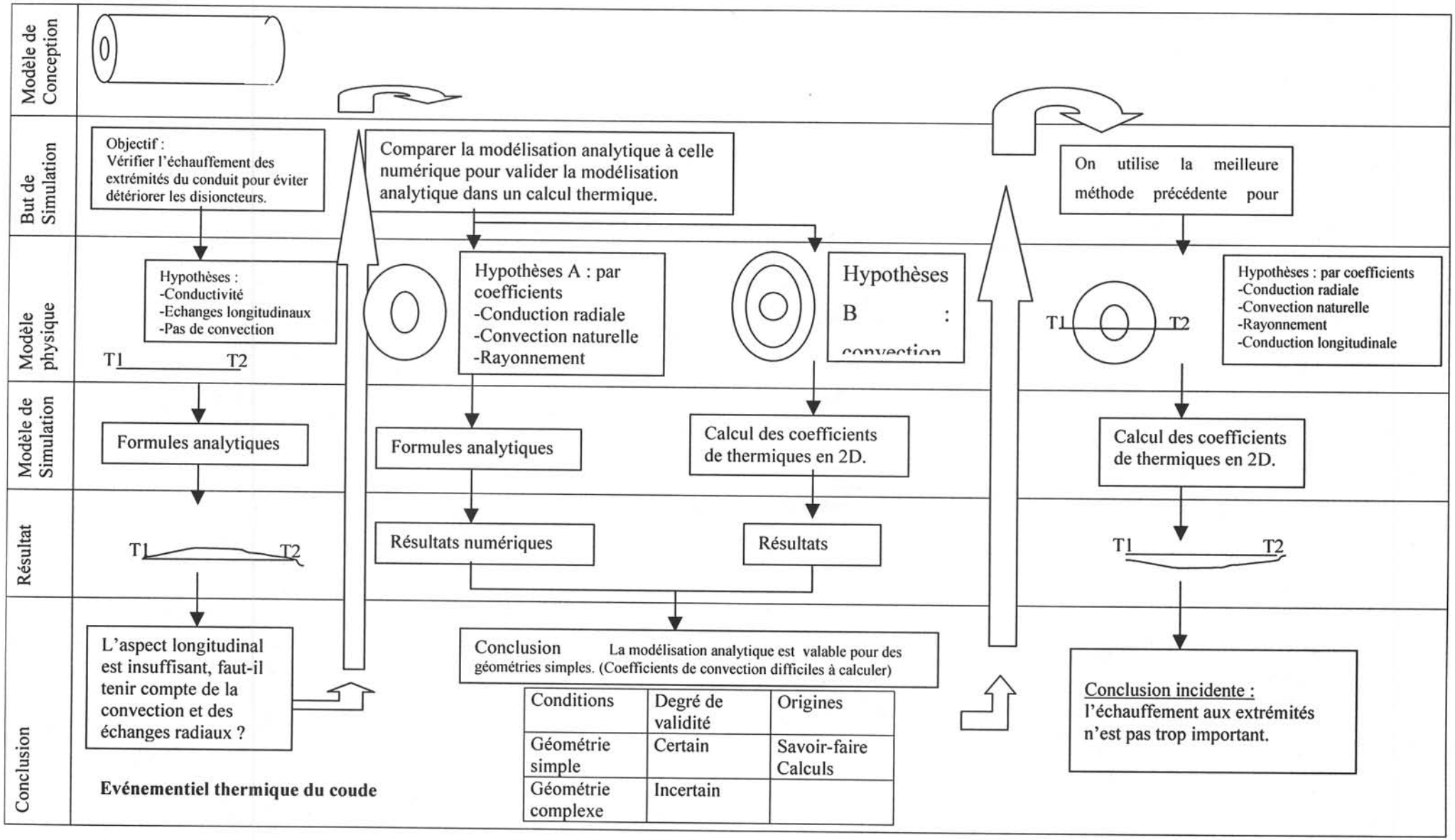
Le tableau de conditions exprime la valeur de la méthode utilisée en fonctions d'hypothèses physiques. Ainsi, le concepteur, d'après son expérience et son savoir faire, peut garantir la validité de ses hypothèse pour un angle de coude θ supérieur à 30 degrés et un courant I inférieur à 3000 ampères. Mais en dehors de ces limites, les méthodes doivent être approfondies pour garantir leur validité. Cette remarque du concepteur donne un repère explicite à tout nouveau concepteur désirant aborder un problème similaire.

III.3.1.d Troisième colonne : Modélisation volumique du coude par la méthode magnéto-mécanique

Le concepteur utilise la méthode magnéto-mécanique pour évaluer la déformée. Par calcul, il remarque que la déformée est en fait négligeable dans le coude. Il en tire une conclusion que le conducteur électrique n'aurait besoin que de deux isolateurs au lieu de trois sans mettre en danger la structure.

III.3.1.e Le problème thermique linéaire

Dans le cas des conducteurs droits placés côte à côte, le concepteur est confronté à un nouveau type de problème lors du raccord de ces conducteurs avec des éléments du réseau plus fragile thermiquement. Ainsi, l'événementiel suivant étudie la variation de température aux extrémités des conducteurs pour éviter un échauffement excessif de celles-ci nuisible aux éléments de raccord.


Modèle de Conception
But de Simulation
Modèle physique
Modèle de Simulation
Résultat
Conclusion
Objectif :
Vérifier l'échauffement des extrémités du conduit pour éviter détériorer les disioncteurs.
Hypothèses :
-Conductivité
-Echanges longitudinaux
-Pas de convection
T1
T2
Formules analytiques
L'aspect longitudinal est insuffisant, faut-il tenir compte de la convection et des échanges radiaux ?
Evénementiel thermique du coude
Comparer la modélisation analytique à celle numérique pour valider la modélisation analytique dans un calcul thermique.
Hypothèses A : par coefficients
-Conduction radiale
-Convection naturelle
-Rayonnement
Formules analytiques
Résultats numériques
Hypothèses B : convection
Calcul des coefficients de thermiques en 2D.
Résultats
Conclusion La modélisation analytique est valable pour des géométries simples. (Coefficients de convection difficiles à calculer)
Conditions
Degré de validité
Origines
Géométrie simple
Certain
Savoir-faire Calculs
Géométrie complexe
Incertain
On utilise la meilleure méthode précédente pour
Hypothèses : par coefficients
-Conduction radiale
-Convection naturelle
-Rayonnement
-Conduction longitudinale
Calcul des coefficients de thermiques en 2D.
Conclusion incidente :
l'échauffement aux extrémités n'est pas trop important.

Afin de faciliter la lecture de l'événementiel précédent, chaque paragraphe qui suit, va expliciter une colonne d'événements de gauche vers la droite.

III.3.1.f Première colonne : Etude thermique linéaire du coude

Le concepteur tient compte uniquement de la conductivité linéaire sans tenir compte de la convection. Il met une source de chaleur à chaque extrémité et désire connaître la répartition de température le long du conducteur. Il utilise des formules analytiques et obtient au milieu du conducteur, une température plus élevée qu'à ses extrémités ce qui contredit totalement les résultats pratiques. Le concepteur abandonne l'étude thermique linéaire pour tenir compte en particulier de la convection.

III.3.1.g Deuxième colonne : Etude thermique par coefficients du coude en 2D

Le concepteur tient compte cette fois-ci de la conduction radiale, de la convection thermique et du rayonnement. Cette méthode utilise des formules analytiques évitant des calculs trop coûteux mais cette méthode est souvent moins précise que les méthodes numériques.

III.3.1.h Troisième colonne : Etude thermique numérique du coude en 2D

L'objectif du concepteur est de tenir compte de la conduction radiale, de la convection thermique et du rayonnement et de comparer la méthode analytique et celle numérique pour déterminer si la méthode analytique moins coûteuse en calcul est assez précise dans le cadre de l'étude du coude. Le concepteur aboutit à la conclusion que la méthode analytique n'est pas fiable dans le cadre de son étude car les coefficients sont difficiles à déterminer.

Le tableau de conditions exprime la valeur de la méthode utilisée en fonctions d'hypothèses physiques. Ainsi, le concepteur, d'après son expérience et son savoir faire, peut garantir la validité de ses hypothèse pour une géométrie simple. Mais pour des géométries complexes, les méthodes doivent être approfondies pour garantir leur validité. Cette remarque du concepteur donne un repère explicite à tout nouveau concepteur désirant aborder un problème similaire.

III.3.1.i Quatrième colonne : Etude thermique du coude en 2D et demi

Le concepteur décide d'utiliser la méthode numérique validée précédemment en 2D pour la généraliser en 2D et demi, c'est à dire en coupant le cylindre en tranches dans lesquelles une étude 2D est réalisée, et en tenant compte de la conduction radiale, de la convection thermique, du rayonnement et de la conduction longitudinale.

Le concepteur aboutit à la conclusion que l'échauffement aux extrémités n'est pas important. En reprenant les deux conclusions provisoires obtenues dans les deux événementiels précédents, on peut conclure que :

- La déformation mécanique est négligeable.
- L'échauffement aux extrémités n'est pas trop important permettant de maintenir les isolateurs disponibles.

III.3.2.Le problème des barres dans un tableau de distribution basse tension :

On étudie un problème [GUI00] couplé électromagnétisme et mécanique d'un jeu de barres qui s'entrecroisent mais ne doivent pas se toucher en cas de courts-circuits. La Figure III.3-1 montre la disposition de ce jeu de barres.

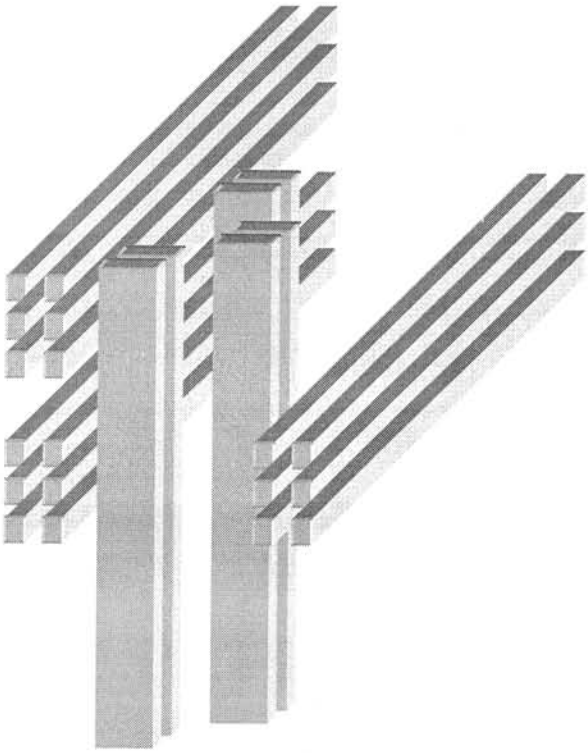
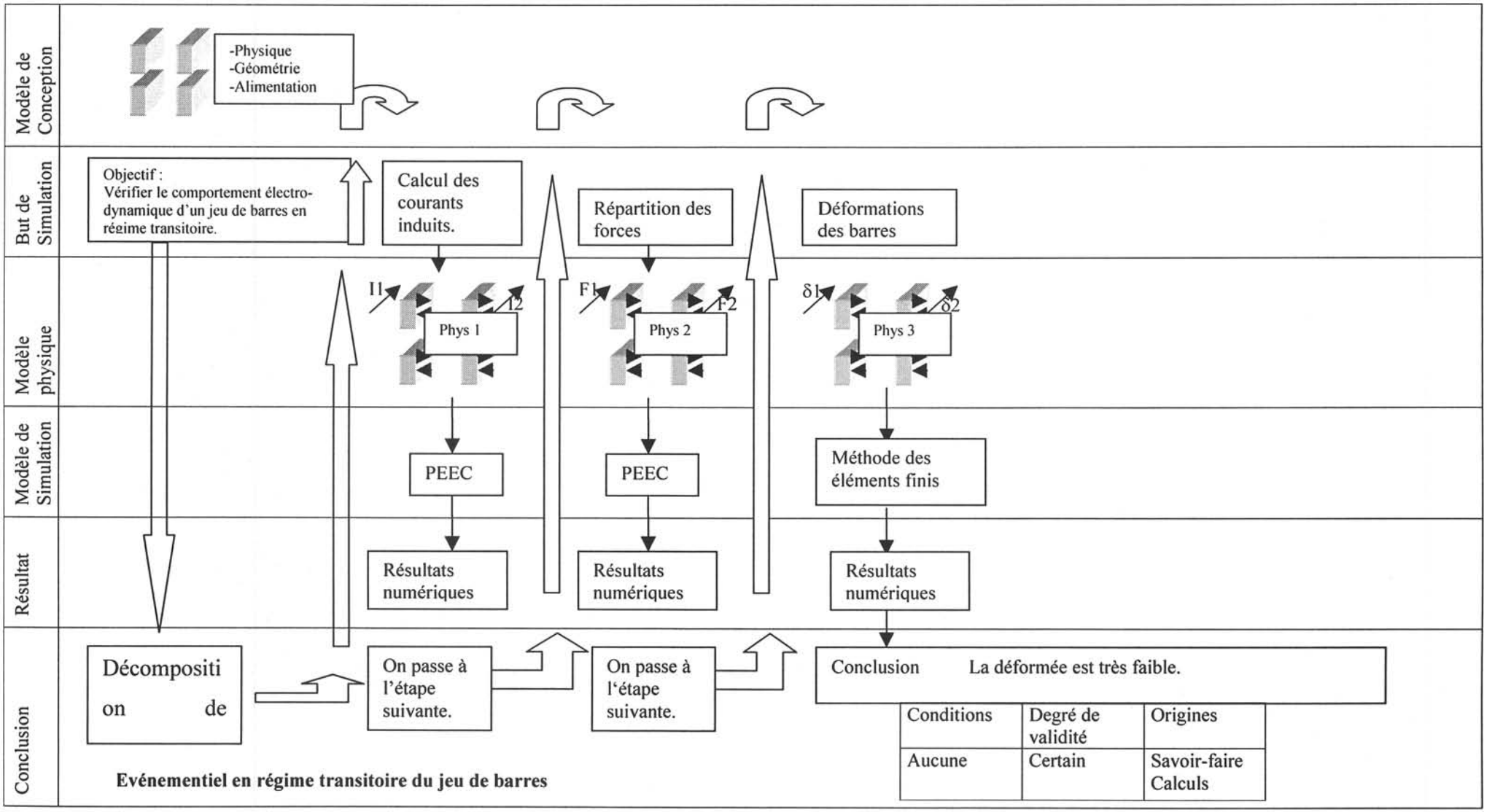


Figure III.3-1 Le jeu de barres

L'objet de cette étude est de déterminer en cas de surcharge, le courant dans ces conducteurs, il risque d'y avoir d'énormes forces électromagnétiques provoquant la destruction de ce croisement, entraînant une coupure du réseau électrique. Afin de mener cette étude les deux événementiels suivants entreprennent une démarche d'étude des cas les plus défavorables pour le réseau en cas de surcharge électrique :

- Le cas du régime transitoire,
- Le cas du régime permanent.



Evénementiel en régime transitoire du jeu de barres

L'événementiel précédent est décomposé en 4 colonnes pour étudier le comportement mécanique du jeu de barres en régime transitoire.

III.3.2.a Première colonne : Décomposition de l'objectif initial en 3 étapes

Le concepteur réalise qu'il doit décomposer son objectif initial en 3 étapes pour résoudre son problème.

III.3.2.b Deuxième colonne : Calcul des courants induits

Le concepteur utilise la méthode PEEC (Partial Element Electrical Circuit) pour déterminer numériquement la répartition du courant induit dans chaque barre suite au régime transitoire dû à la surcharge du courant.

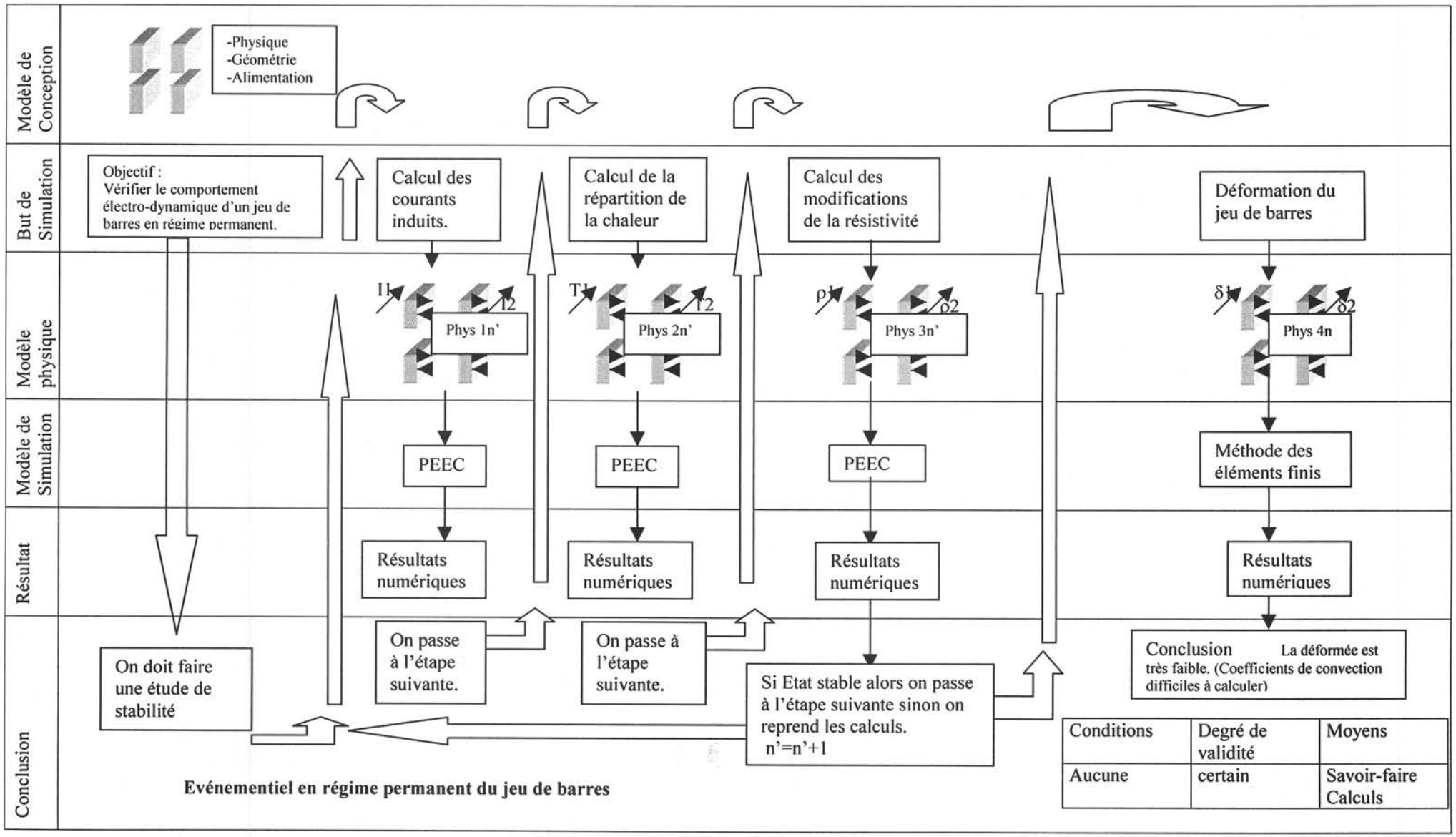
III.3.2.c Troisième colonne : Calcul des forces

Le concepteur utilise la méthode PEEC pour déterminer numériquement la répartition des forces dans les barres, dues au courant induit.

III.3.2.d Quatrième colonne : Calcul de la déformée des barres et conclusion.

Le concepteur utilise la méthode des éléments finis pour déterminer numériquement la déformée sur les barres, dues aux forces calculées précédemment. Le concepteur conclut que cette déformée est négligeable en régime transitoire.

Le tableau de conditions exprime la valeur de la méthode utilisée en fonctions d'hypothèses physiques. Ainsi, le concepteur, d'après son expérience et son savoir faire, peut garantir la validité de ses hypothèse pour a priori toutes les hypothèses associées au jeu de barres, en effet d'après lui, le concepteur a pris en compte le cas le plus défavorable au niveau physique et a dû utiliser les méthodes numériques les plus lourdes pour parvenir à son résultat. Cette remarque du concepteur donne un repère explicite à tout nouveau concepteur désirant aborder un problème similaire. Mais, cela peut être aussi une responsabilité lourde pour le concepteur initial.



Evénementiel en régime permanent du jeu de barres

L'événementiel précédent est décomposé en 5 colonnes pour étudier le comportement mécanique du jeu de barres en régime permanent.

III.3.2.e Première colonne Etude de stabilité.

Le concepteur réalise qu'il doit effectuer une étude de stabilité soit une boucle de convergence pour répondre à l'objectif initial.

III.3.2.f Deuxième colonne Calcul des courants induits

Le concepteur utilise la méthode PEEC pour déterminer numériquement la répartition du courant induit dans chaque barre suite au régime permanent dû à la surcharge du courant.

III.3.2.g Troisième colonne Calcul de la répartition de chaleurs

Le concepteur utilise la méthode PEEC pour déterminer numériquement la répartition de la chaleur dans chaque barre.

III.3.2.h Quatrième colonne Calcul de la répartition de la résistivité

Le concepteur utilise la méthode PEEC pour déterminer numériquement la répartition de la résistivité dans chaque barre. Le concepteur vérifie si les résultats respectent les critères de convergence. Si c'est le cas, le concepteur va à la colonne suivante sinon il reprend les calculs à la deuxième colonne.

III.3.2.i Cinquième colonne Calcul de la déformée et conclusion

Le concepteur utilise la méthode des éléments finis pour déterminer numériquement la déformée de chaque barre. Il conclut que la déformée de chaque barre est très faible. Ce qui ne nécessite pas un nouveau dimensionnement de l'ensemble des barres.

Le tableau de conditions exprime la valeur de la méthode utilisée en fonction d'hypothèses physiques. Ainsi, le concepteur, d'après son expérience et son savoir faire, peut garantir la validité de ses hypothèse pour a priori toutes les hypothèses associées au jeu de barres, en effet d'après lui, le concepteur a pris en compte le cas le plus défavorable au niveau physique et a dû utiliser les méthodes numériques les plus lourdes pour parvenir à son résultat. Cette remarque du concepteur donne un repère explicite à tout nouveau concepteur désirant aborder un problème similaire. Mais, cela peut être aussi une responsabilité lourde pour le concepteur initial.

III.3.3.Conclusion sur ces deux problèmes

Ainsi, la méthode de Troussier appliquée au génie électrique rassemble sous la forme d'un événementiel, l'ensemble des étapes de conception dans l'ordre suivant Modèle de conception, But de simulation, Modèle physique, Modèle de simulation, Résultats et Conclusions. L'étude de ce modèle a mis en valeur sa flexibilité en cas d'échec et l'intérêt d'une entité Conclusions pour sauvegarder les remarques judicieuses du concepteur qui apporte une plus value considérable au savoir-faire d'une entreprise.

Cette nouvelle méthodologie permet la structuration des informations manipulées pour l'utilisation et la réutilisation du calcul électromagnétique en conception. Les deux exemples étudiés ci-dessus révèlent l'intérêt de cette méthode en termes d'utilisation, de traçabilité et de réutilisation du calcul en génie électrique qui est souvent multiphysique, dans un contexte de conception industrielle, tout en insistant sur les aspects de formation et d'accompagnement. L'intérêt de ce travail pour la formation universitaire peut également être souligné de par la contribution qu'il apporte à la formalisation et à la structuration de l'ensemble du processus de calcul dans un contexte de conception industrielle.

Chapitre IV Création d'un formalisme rassemblant le guide de l'utilisateur et la capitalisation du savoir-faire

Au premier chapitre, nous avons étudié un formalisme permettant de décrire de manière relativement exhaustive de nombreux problèmes d'électromagnétisme. Au second chapitre, nous avons vu comment il est désormais possible d'obtenir l'historique du processus de dimensionnement en génie électrique grâce à des événementiels fournissant une décomposition en étapes simples et complètes du dimensionnement. Il devient alors possible de réutiliser une partie des connaissances acquises par d'autres concepteurs. Mais, cet apprentissage et cette réutilisation peuvent être encore améliorés. En effet, les méthodes développées dans les deux chapitres précédents ne sont pas bien adaptées à l'utilisation par l'informatique. Il est possible de mieux intégrer ces deux méthodes au milieu de l'informatique pour pouvoir bénéficier de sa puissance de traitement.

En effet, leur informatisation a un grand intérêt pour le concepteur et l'entreprise :

- Tout d'abord, l'utilisateur concepteur désire connaître l'influence des paramètres dimensionnels, physiques, structurels,...Pour déterminer simplement cette influence, le concepteur a besoin de réaliser des études paramétriques de la manière la plus simple possible. Ainsi, la première retombée sera la paramétrisation d'une étude.
- Ensuite, l'entreprise désire récupérer une étude déjà faite, un dispositif déjà existant afin d'effectuer de légères modifications comme un simple changement de calibre, afin de lui permettre de valoriser le travail existant. L'entreprise peut intrapoler ou extrapoler l'existant. Ainsi, la deuxième retombée sera le calcul de gammes.
- Enfin, cette méthode apportera des gains de temps et de fiabilité.

Dans ce chapitre, nous allons donc tenter de développer cette démarche. Dans un premier temps, nous exprimerons plus précisément notre objectif sous la forme d'un « cahier des charges ». Ensuite, nous ferons une analyse de l'existant et en particulier de la méthodologie objet en prenant pour exemple le graphe Open Inventor et de leur utilisation dans le cadre de la visualisation graphique par ordinateur. Cette analyse nous permettra de proposer une transposition de cette méthode à notre domaine de l'électromagnétisme.

IV.1.Définition du cahier des charges

Selon les objectifs, notre formalisme doit permettre à un utilisateur la paramétrisation de l'analyse, le calcul de gammes et des gains de temps et de fiabilité en offrant :

- Un cadre rigoureux,

- Une grande lisibilité par l'utilisation d'un formalisme graphique,
- Un formalisme bénéficiant de la puissance méthodologique des techniques de programmation pour permettre la réutilisation de procédé et la paramétrisation,
- Un formalisme traduisible rapidement en langage informatique.

Ainsi, cette nouvelle méthode fournira plus qu'un cadre de conception, elle fournira un outil de conception complet et extrêmement puissant. Cet outil bénéficiera d'une hiérarchie prédéfinie et d'une interface utilisateur indépendante des différentes versions des logiciels de simulation, permettant à l'utilisateur de se focaliser essentiellement sur les problèmes de conception et non pas les problèmes informatiques des logiciels de simulation. De plus, elle rendra directement réutilisable les travaux d'autres concepteurs par la puissance informatique.

Afin de répondre au cahier des charges, les deux méthodes suivantes :

- La méthodologie objet
- La représentation Open Inventor [OPEN2]

vont être étudiées car elles nous apporteront des éléments utiles pour notre objectif.

IV.2.La méthodologie objet

Celle-ci consiste à rassembler sous le dénominatif objet, les données ainsi que les méthodes associées. Cette méthodologie se distingue de la méthodologie procédurale qui sépare méthodes et données. Selon Booch [BOO92], un objet a un état, un comportement et une identité ; la structure et le comportement d'objets similaires sont définis dans leur classe commune ; les termes instance et objet sont interchangeables.

Concernant tout d'abord la signification de l'état, celui-ci englobe toutes les propriétés (habituellement statiques) de l'objet, plus les valeurs courantes (habituellement dynamiques) de chacune de ces propriétés.

Ensuite, concernant la signification du comportement, puisque aucun objet n'existe isolément et qu'il y a interactions entre objets, le comportement est la façon dont un objet agit et réagit, en termes de changement de ses états et de circulation de messages. Ainsi, d'après Brodie [BRO84], le comportement d'un objet est complètement défini par ses actions.

Enfin, concernant la signification de l'identité, d'après Khoshafian et Copeland [KHO86], elle est cette propriété d'un objet qui le distingue de tous les autres objets.

La méthodologie objet prouve son efficacité dans la gestion de la complexité des grands projets informatiques. Cette méthodologie ne peut être objet que si elle contient l'ensemble des éléments majeurs suivants :

- L'abstraction,
- L'encapsulation,
- La modularité,
- La hiérarchisation.

Afin de répondre à notre cahier des charges, même si l'efficacité de cette méthodologie pour de gros projets de développements est très intéressante, c'est surtout sur les trois points suivants que des solutions au cahier des charges peuvent être apportées :

- La hiérarchisation qui est un des éléments majeurs de la méthodologie objets,
- La surdéfinition fournie par une grande partie des langages de programmation objet moderne,
- L'encapsulation qui permet plusieurs niveaux de visibilité des données.

IV.2.1. La hiérarchisation :

L'abstraction, qui est un élément majeur de la méthodologie objet, est une bonne chose mais dans la plupart des applications non triviales, on a affaire à un très grand nombre d'entités abstraites différentes qu'il est très difficile d'appréhender. En masquant l'intérieur de ces entités, l'encapsulation, autre élément majeur de la méthodologie objet, aide à contrôler cette complexité. De son côté, la modularité apporte aussi une aide en nous permettant de grouper des entités ayant des rapports logiques. Pourtant, tout ceci n'est pas suffisant et il est possible de simplifier énormément la connaissance d'un problème en identifiant dans une architecture les entités qui forment une hiérarchie. Celle-ci peut être définie de la façon suivante : la hiérarchie est rangement ou un ordonnancement des abstractions.

La hiérarchie la plus importante dans un système complexe est la structure de ses classes (la hiérarchie « genre de »).

L'héritage est le plus important « genre » de hiérarchie et c'est un élément essentiel des systèmes orientés objets. Fondamentalement l'héritage définit entre les classes une relation dans laquelle une classe partage la structure ou le comportement défini dans une ou plusieurs

classes (ce qui s'appelle respectivement héritage simple ou héritage multiple). L'héritage représente par conséquent une hiérarchie d'abstractions, dans laquelle une sous-classe hérite d'une ou plusieurs super classes. Typiquement, une sous-classe enrichit ou redéfinit la structure et le comportement déjà existants de ses super-classes.

Au fur et à mesure qu'évolue la hiérarchie d'héritages, la structure et le comportement qui sont les mêmes pour différentes classes vont tendre à migrer vers des super classes communes. C'est pourquoi, l'héritage est souvent défini comme une hiérarchie de généralisation-spécialisation. Dans certains milieux, l'héritage est appelé la hiérarchie « est un ». Les super-classes représentent des abstractions généralisées, et les sous-classes représentent des spécialisations dans lesquelles les champs et les méthodes de la super-classe sont ajoutés, modifiés ou même occultés. De cette façon, l'héritage permet d'exprimer des abstractions avec une certaine économie d'expression.

Le fait de négliger les hiérarchies « genres de » existantes peut vraiment conduire à des architectures ampoulées et inélégantes. Comme le fait remarquer Cox [COX86], « sans héritage, chaque classe serait une unité isolée et développée à partir de zéro. Les différentes classes ne supporteraient aucune relation les unes avec les autres puisque le développeur de chacune d'elles procure des méthodes à sa convenance. La cohérence entre classes est le résultat d'une certaine discipline de la part des programmeurs. L'héritage rend possible la définition d'un nouveau code de la même façon qu'est introduit un concept à un nouveau venu, en comparant ce concept avec une chose qui lui est déjà familière ».

Ainsi, la hiérarchisation et plus particulièrement l'héritage force l'utilisateur à structurer ses données par la création d'une classe dite père qui rassemble un ensemble de données ou de méthodes. Cet ensemble est transmis intégralement aux classes dites enfants qui peuvent bénéficier d'une base de données et de méthodes par défaut. En fait, cette hiérarchisation simplifie grandement la tâche de l'utilisateur lors de gros projets, lui permettant de modifier une partie du code sans devoir se préoccuper du reste du code.

Le concept de hiérarchisation s'est imposé en programmation objet, nous pensons qu'il peut être utile pour l'objectif que nous nous sommes fixé. La Figure IV.2-1 illustre l'héritage en montrant une de ses applications.

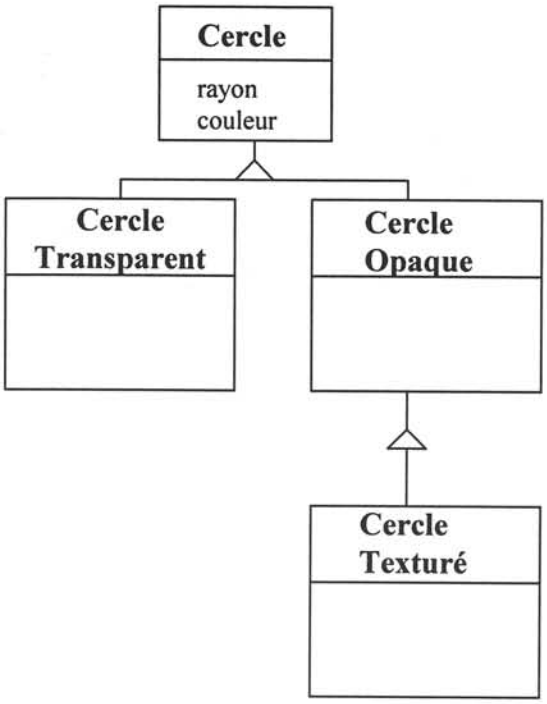


Figure IV.2-1 Une Application de la hiérarchisation

IV.2.2.La surdéfinition

Dans les langages objets (C++, Ada, Java,...), on peut déclarer des procédures et des fonctions avec les mêmes noms tant que leurs invocations peuvent être distinguées par leurs paramètres (A savoir, le nombre et les types des arguments, et par les types de leurs valeurs retournées).

La surdéfinition permet à la fois de tirer partie de la hiérarchisation et de modifier les méthodes d'une classe sans devoir réécrire la classe. Ainsi, il est possible de réutiliser l'ensemble des méthodes d'une classe sans devoir la réécrire totalement, en modifiant juste les méthodes nécessaires au projet en cours. Cette puissance proposée par une grande partie des langages de programmation objet moderne, répond au problème du cahier des charges concernant **la réutilisation de procédés** ainsi que **le paramétrage** qui est très important dans la conception en génie électrique. La Figure IV.2-1 montre un exemple de la surdéfinition dans un modèle objet hiérarchisé.

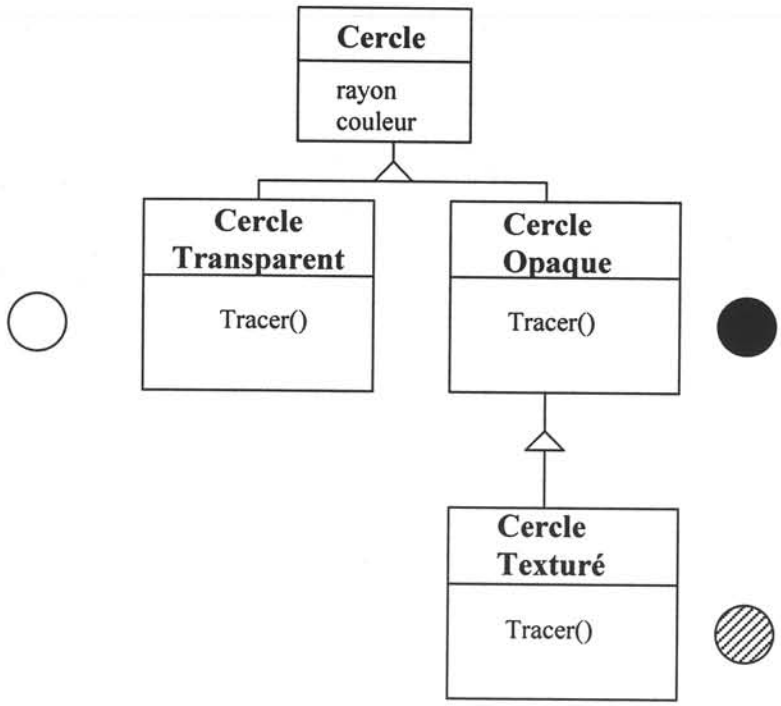


Figure IV.2-1 Exemple de surdéfinition d'une méthode

La Figure IV.2-1 montre un exemple d'application de la surdéfinition en programmation orientée objet.

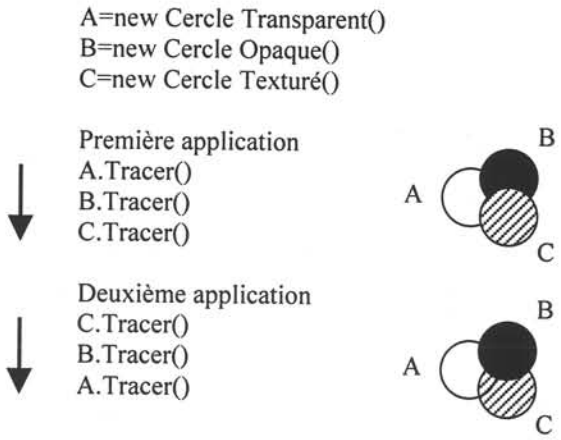


Figure IV.2-2 Exemple d'application de la surdéfinition

Ainsi la surdéfinition de classe dans un ensemble de classes hiérarchisées apporte une grande puissance à un graphe d'objets en supprimant ou améliorant les méthodes qui ne conviennent pas au concepteur.

De plus, dans l'exemple de la Figure IV.2-2, l'ordre d'apparition est très important. Il est d'ailleurs utilisé dans notre méthode.

IV.2.3.L'encapsulation

Une fois l'objet défini, doivent être décidées les implémentations à son sujet. Dès qu'une implémentation est choisie, elle doit être considérée comme secrète est cachée de la plupart des clients. Comme le suggère sagement Ingalls, « Aucune partie d'un système complexe ne doit dépendre des détails internes d'une autre partie » [ING]. Alors que l'abstraction « aide les gens à penser au sujet de ce qu'ils font », l'encapsulation « permet aux modifications de programme d'être faites en toute sécurité et avec un moindre effort » [GAN87].

Pour résumer, l'encapsulation peut être définie comme un procédé qui cache tous les détails d'un objet qui ne font pas partie de ses caractéristiques essentielles. La Figure IV.2-1 illustre ce procédé.

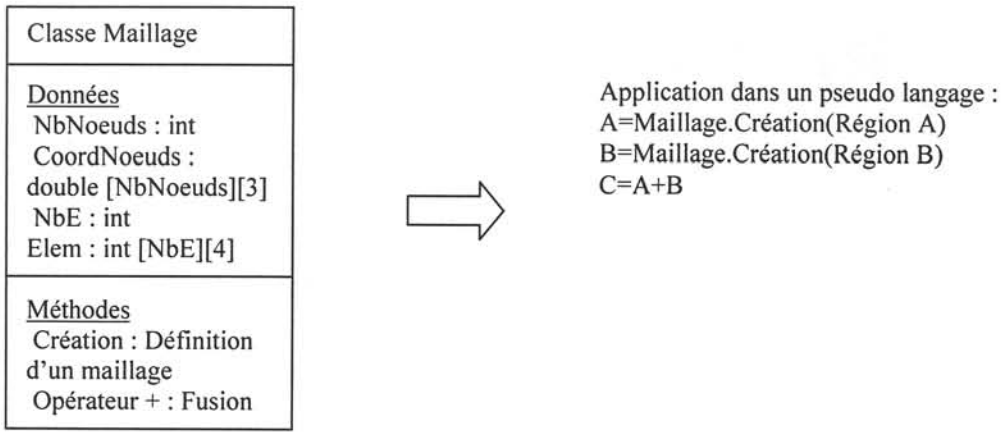


Figure IV.2-1 Exemple d'application de l'encapsulation

La Figure IV.2-1 montre la puissance de l'encapsulation qui enlève à un utilisateur de la classe Maillage, la gestion de tous les nœuds et liens entre eux. En effet, comme le montre l'application de l'encapsulation dans un pseudo-langage, l'utilisateur de la classe Maillage traite les opérations sur celle-ci comme une simple application arithmétique triviale.

Ainsi, la méthodologie objet fournit des concepts extrêmement puissants pour la programmation. Ces concepts peuvent être extrêmement utiles pour le travail de conception.

IV.3.La représentation Open Inventor

La représentation Open Inventor s'appuie sur tous les concepts proposés par la méthodologie objet, à savoir la surdéfinition, la hiérarchisation et l'encapsulation. Mais de plus, elle fournit un véritable outil de conception appliqué à la création de graphiques sur ordinateur.

Cette représentation s'appuie sur un langage déjà existant OpenGL développé pour la représentation graphique en 3D d'objets volumiques pour l'image de synthèse. En fait, Open Inventor est une représentation graphique et interactive du langage OpenGL.

Les principales caractéristiques apportées en plus de la méthodologie objet, par l'outil de conception Open Inventor, pour répondre au cahier des charges sont :

- L'utilisation d'un graphe d'objets,
- L'interactivité de ce graphe.

C'est pour ces deux caractéristiques principales que nous vous présentons cette représentation qui sera pour nous un bon exemple.

IV.3.1. Le graphe d'objets :

Open Inventor a la particularité de représenter sous la forme d'un graphe l'ensemble d'une scène graphique. Il détermine tout d'abord le nœud root qui est la base de tout graphe Open Inventor. Puis à ce nœud root, sont associés des nœuds spécialisés qui possèdent une fonction bien spécifique dans la visualisation d'une scène 3D contenant des objets géométriques. Les nœuds sont décomposés en plusieurs fonctions spécialisées bien distinctes :

- Les nœuds lumières pour éclairer la scène,
- Les nœuds caméras pour positionner l'observateur qui voit la scène,
- Les nœuds objets pour déterminer le type d'objets (Sphère, cube, cylindre,…) ainsi que ses caractéristiques (Couleur, texture,….),
- Les nœuds de déplacement qui positionnent l'ensemble des nœuds précédents les uns par rapport aux autres.
- Les nœuds autres qui proposent de nombreuses fonctionnalités intéressantes comme l'animation de la scène ou des nœuds conditionnels qui permettent par exemple d'afficher des objets qui sont à une certaine distance du nœud caméra.

La Figure IV.3-1 résume l'ensemble des fonctionnalités et la structure du graphe des nœuds d'Open Inventor.

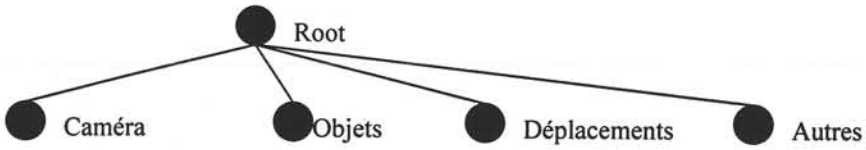


Figure IV.3-1 Organisation des nœuds Open Inventor

Ainsi, par l'utilisation d'un graphe d'objets, l'organisation des projets graphiques deviennent immédiatement plus lisibles pour n'importe quel utilisateur.

IV.3.2. L'interactivité du graphe d'Open Inventor

Ce graphe possède tout d'abord, toutes les grandes fonctionnalités d'édition fournies par tous les éditeurs développés actuellement. En particulier, il permet la copie de nœuds ou ensemble de nœuds associés. Par le clic de la souris, il devient alors possible de modifier rapidement, un détail ou toute une partie d'un projet graphique. De plus, les fonctions avant, après permettent de reprendre l'historique de création de graphe, autorisant un utilisateur intéressé de repérer la construction d'un projet graphique. La Figure IV.3-1 montre l'exemple d'une fonction d'édition appliquée au graphe de nœuds.

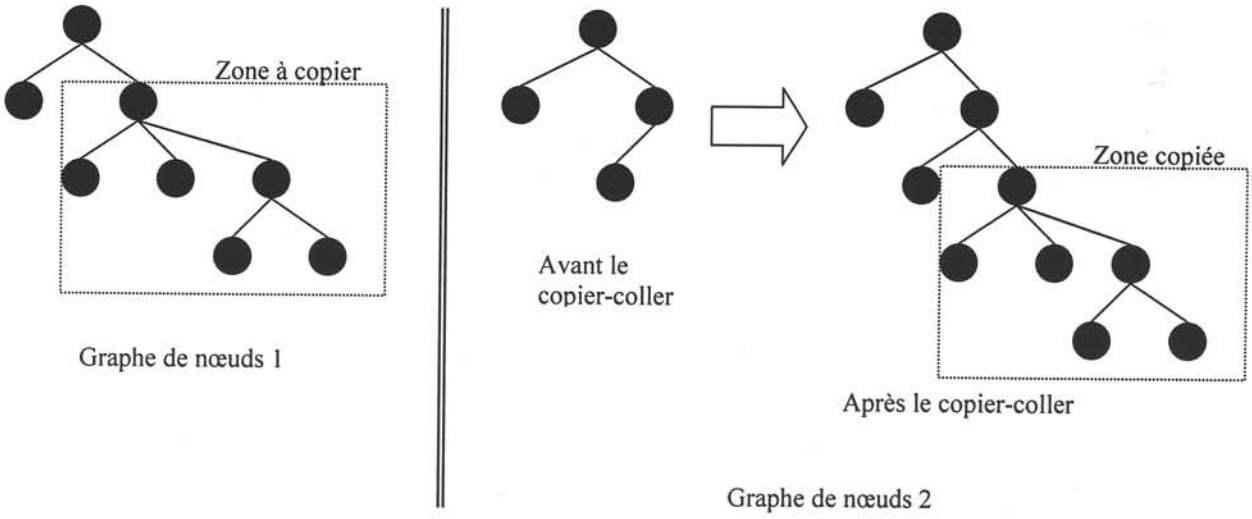


Figure IV.3-1 Les fonctions copier et coller appliquées au graphe de noeuds

Ensuite, Open Inventor permet la mise à jour en temps réel d'un graphe modifié. Ainsi, la modification du paramètre d'un nœud provoque instantanément la modification de la scène graphique. Cela permet à l'utilisateur premièrement de mieux se situer dans le graphe en distinguer par exemple de mêmes objets ayant des positions différentes sur la scène

graphique. Deuxièmement au niveau conceptuel, le fait d'associer immédiatement un graphe à une image reprend le principe du WYSIWYG (What You See Is What You Get) de quasiment tous les logiciels de traitement de texte. Ainsi, de nombreuses erreurs peuvent être repérées dès le début du stade de conception permettant à tout utilisateur un gain de temps appréciable et fondamental dans l'industrie informatique. La Figure IV.3-2 illustre cette interactivité.

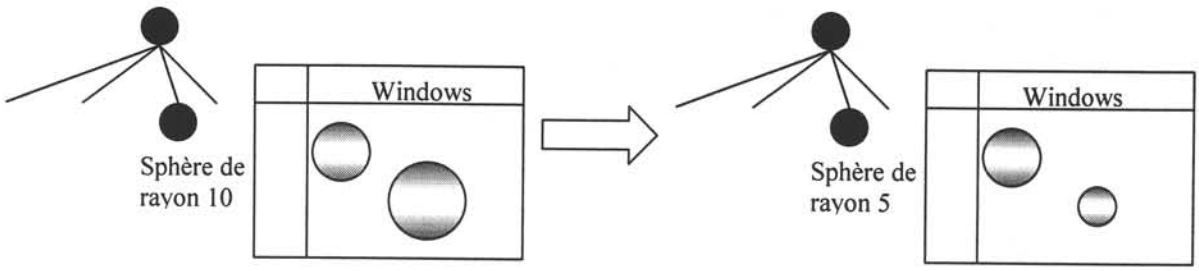


Figure IV.3-2 Exemple d'application du WYSIWYG

Enfin, l'utilisation de la souris et des interfaces graphiques sous forme de fenêtres connaissent un fort développement au niveau de la recherche sur l'interactivité. L'utilisation combinée de la souris, du clavier et d'un moniteur bénéficie des plus récentes avancées au niveau de l'ergonomie assurant une grande longévité de l'interface homme-machine et bénéficiant des dernières découvertes réalisées dans ce domaine. Ainsi, la représentation visuelle sous la forme d'un graphe avec plusieurs niveaux de granularité par la possibilité de détailler ou non un nœud, est intégrée dans le nouveau modèle comme l'illustre la Figure IV.3-3.

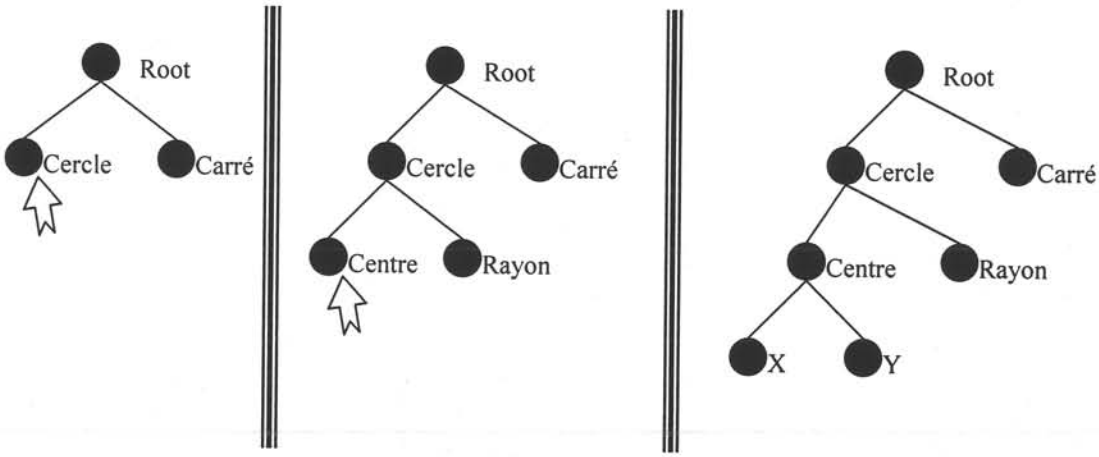


Figure IV.3-3 Développement de nœuds par le pointeur d'une souris

Finalement, l'interactivité d'Open Inventor répond parfaitement au dernier point du cahier des charges car par son avance dans les interfaces homme-machine, elle ne peut que bénéficier de l'évolution future de ces mêmes interfaces.

IV.4.Application de la méthodologie objet à la démarche de simulation en électromagnétisme

IV.4.1.Définition d'un nouveau modèle de représentation électromagnétique

Ce nouveau modèle permettra de traiter tout problème électromagnétique en se basant sur les méthodes existantes développées dans d'autres domaines.

IV.4.1.a Réutilisation de l'existant

Tout d'abord, tout ce qui a été présenté au paragraphe IV.2, est repris, ainsi le principe d'héritage est encouragé afin d'obtenir une structure de données et de méthodes plus simples et accessibles à tout utilisateur. De même, la possibilité de surdéfinition dans la structure des données et des méthodes permet de faire évoluer la méthode présentée à partir d'une méthode préexistante.

Ensuite, les éléments présentés au paragraphe IV.3 sont repris. De même, les fonctionnalités des interfaces utilisateurs homme-machine sont maintenues dans cette nouvelle méthode comme par exemple, la possibilité offerte par Open Inventor de mémoriser les actions effectuées lors de la construction du graphe.

Enfin, certains formalismes utilisés par le formalisme SADT sont réutilisés comme l'indication de changement de pages comme l'illustre la Figure IV.4-1.

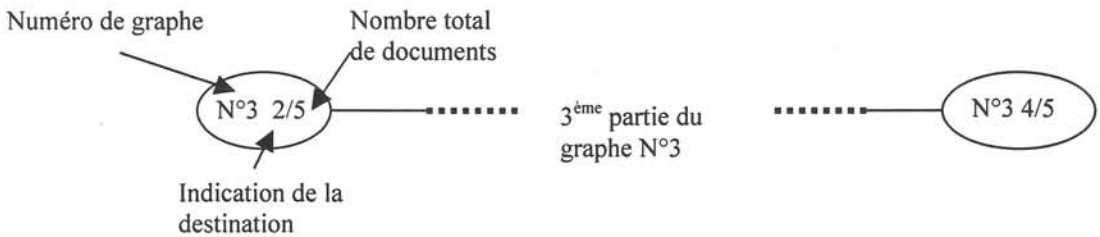


Figure IV.4-1 : Illustration du formalisme SADT pour situer les parties d'un graphe

IV.4.1.b Introduction des concepts électromagnétiques

Dans les simulations réalisées en électromagnétisme, nous avons rencontré un certain nombre d'étapes de description des données de calcul et d'exploitation que nous envisageons de formaliser sous la forme de nœuds. En voici, quelques exemples :

-un nœud matériau,

-un nœud paramètre,

-un nœud structure,

-un nœud topologie physique,

-un nœud maillage,

-un nœud résolution.

IV.4.1.c Introduction des concepts de gestion de projets

Afin d'enrichir le formalisme de la méthode et lui permettre de bénéficier des méthodes de gestion de projets, des nœuds spécifiques sont créés dans le nouveau graphe.

Tout d'abord, un élément très important apporté par de nombreux logiciels de simulation en électromagnétisme est la possibilité d'effectuer du paramétrage de toutes ou partie de données, par la création de variable que l'on peut attribuer à un élément du problème. Ainsi, il est nécessaire de pouvoir bénéficier de cette puissance apportée par ces logiciels en définissant un nœud paramètre dans le nouveau graphe.

Ensuite, l'introduction de nœuds conditionnels permettrait de tenir compte du processus de décision apporté par l'événementiel étudié au chapitre précédent. Ainsi des nœuds de type logique permettent de renforcer la flexibilité du graphe par les nœuds explicites suivants :

- Le nœud switch Xor (Ou exclusif),
- Le nœud switch Or (Ou inclusif),
- Le nœud switch And (Et).

IV.4.1.d Représentation graphique de la nouvelle méthode :

Tout d'abord, un graphique se lit de gauche à droite et de haut en bas. Chaque graphique est indépendant et début par le nœud Root illustré par la Figure IV.4-1.

Figure IV.4-1 Nœuds Root

Ensuite, chaque nœud supplémentaire définit une caractéristique du problème (Paramètres, matériaux,...) selon les besoins. Ces nœuds généralistes peuvent être subdivisés en sous-nœuds qui permettent plusieurs niveaux de détails.

Enfin, la représentation graphique de la Figure IV.4-1 est reprise pour lier les parties du graphe entre elles.

A titre d'exemple, la Figure IV.4-2 suivante illustre le canevas de base de la méthode sur le plan graphique dans le cas d'une résolution par éléments finis. Ainsi, sont représentés de gauche à droite :

- Le nœud Paramètres définit les paramètres de l'étude.
- Le nœud Matériaux définit les caractéristiques physiques des matériaux.
- Le nœud Structure définit les régions.
- Le nœud Géométrie définit les composants géométriques.
- Le nœud Topologie Physique associe les régions définies dans le nœud Structure à des contraintes physiques
- Le nœud Eléments Finis détermine la méthode de résolution ainsi que celle de visualisation.

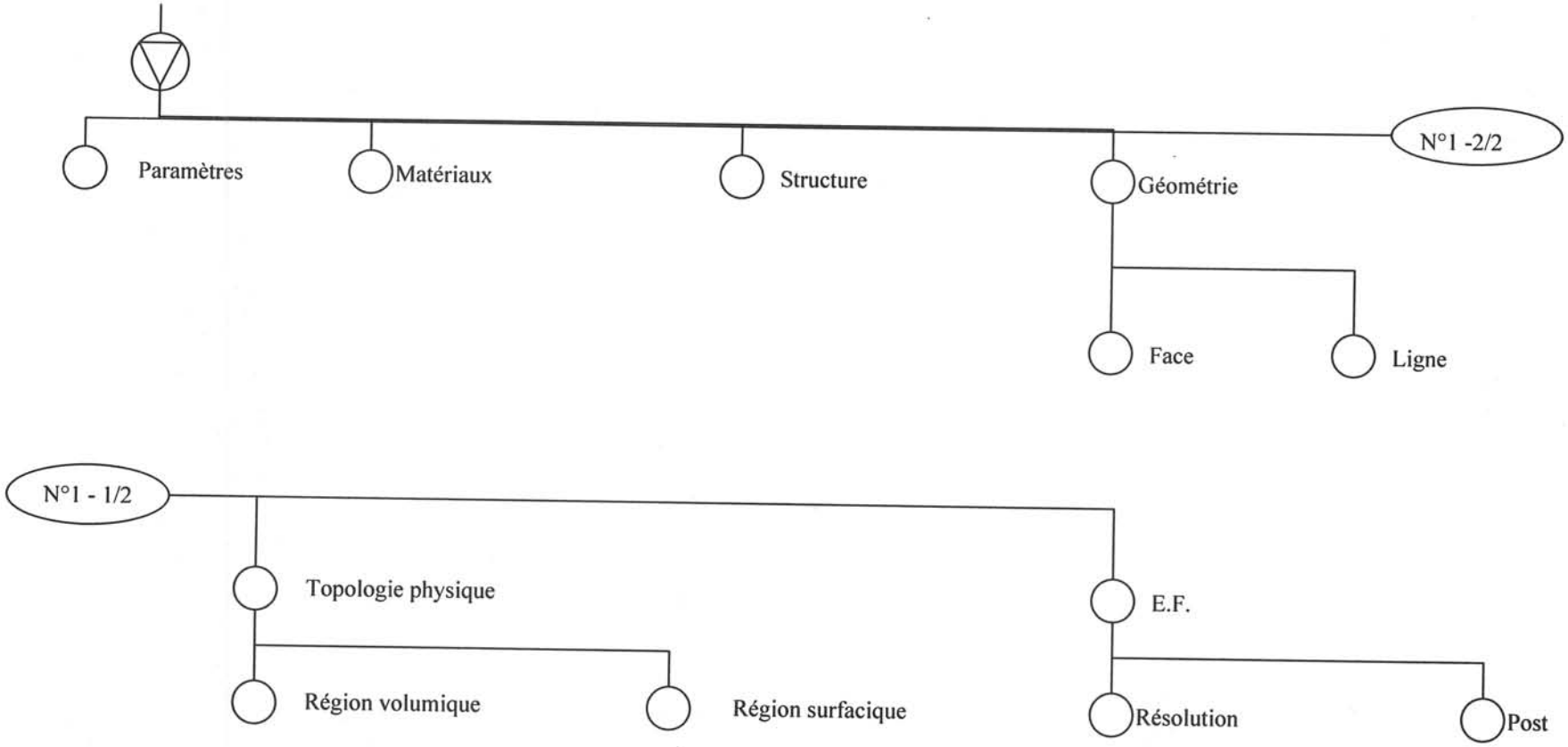


Figure IV.4-2 Canevas graphique de la nouvelle méthode

Des symboles supplémentaires permettent de préciser le type de données en entrée/sortie. Chaque signe de la Figure IV.4-2 possède une signification bien particulière. Pour les plus simples, la Figure IV.4-3 donne leur signification.

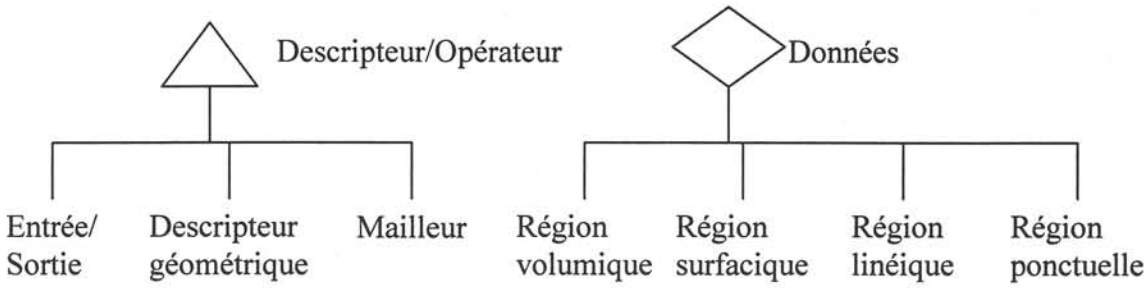


Figure IV.4-3 Descriptif du type des données

En revanche d'autres signes ont une signification bien particulière, comme le montre la Figure IV.4-4.

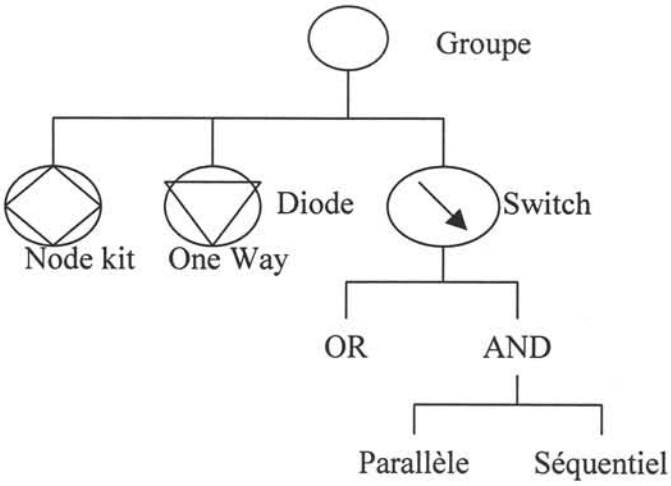


Figure IV.4-4 Signification des structures de contrôle

Ainsi, le symbole Nodekit permet de créer une structure qui oblige tout utilisateur à cadrer sa demande par la création d'un typage fort. En effet, un Nodekit est déterminé par un nom et un ensemble de nœuds dont l'ordre de gauche à droite est déterminant. Cet ensemble de nœuds doit être absolument créé par l'utilisateur pour que le Nodekit fonctionne.

Ensuite, le symbole Oneway permet de créer des encapsulations au niveau du graphe. Ainsi, tous les calculs ou les données présents sous ce symbole, n'interfèrent pas avec ce qui précède celui-ci.

Enfin, le symbole Switch autorise dans le graphe, l'intervention du critère conditionnel permettant de répondre à de nombreux critères de gestion de projet.

Finalement, une fois définie cette nouvelle méthode et son formalisme, il convient désormais de le mettre en pratique dans un cas concret d'électromagnétisme.

IV.4.2.Application de la méthode dans le cas d'un shunt

Le shunt représenté à la Figure IV.4-1, permet de transformer le courant qui le traverse en tension. Les bornes A et B fournissent le courant. Et, les bornes PA et PB, fournissent la tension en sortie. Dans le cas du shunt rectangulaire, la relation tension-courant bien que linéaire, ne peut être calculée simplement par la règle $R=\rho.l/S$. En effet, la distribution du courant s'effectue sur toute la surface du shunt. Il apparaît que le problème du shunt rectangulaire est un problème simple, démonstratif de la démarche de capitalisation et de réutilisation. Ainsi, il permet de mettre en valeur les étapes fondamentales dans tout dimensionnement en génie électrique à savoir :

- Premièrement, l'analyse qui permet l'apprentissage de tous les éléments du problème par tâtonnements.
- Deuxièmement, la mise en forme peut être effectuée afin de capitaliser les connaissances acquises.
- Troisièmement, une réutilisation est possible simplement par la réalisation d'une étude paramétrique.

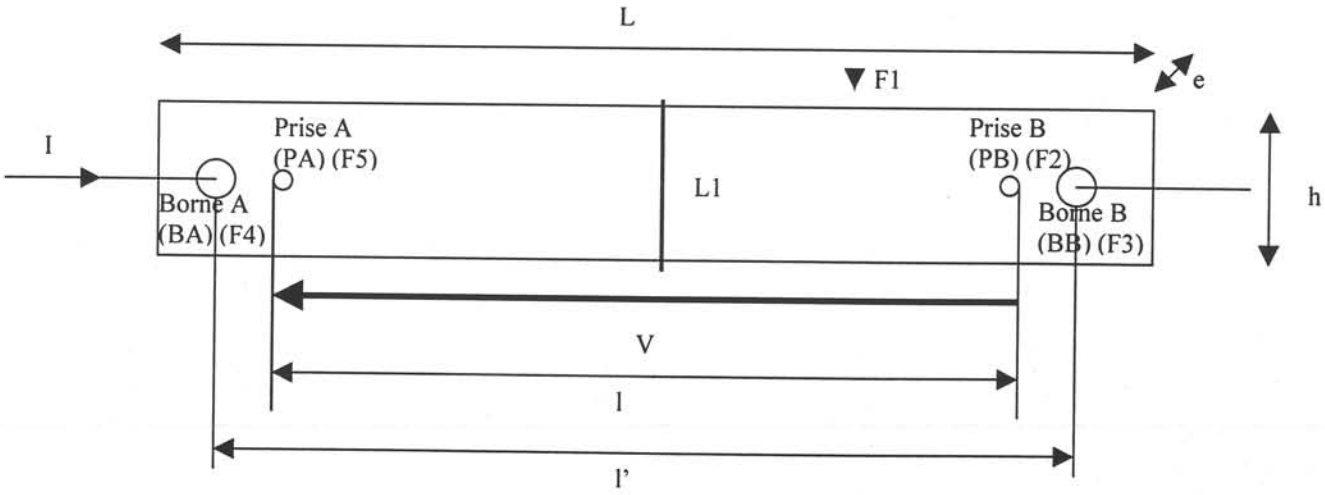


Figure IV.4-1 Shunt rectangulaire

Afin d'entreprendre l'étude de ce shunt, il devient dès lors possible d'utiliser la méthode développée au paragraphe IV.4.1.

C'est ce que nous allons faire tout au long de ce qui va suivre grâce aux étapes suivantes ::

- Définition de la structure.
- Résolution par la méthode des lignes neutres (PA-PB).
- Résolution par la méthode des éléments finis.
- Réutilisation du modèle par un tiers.

IV.4.2.a Définition de la structure du shunt

La Figure IV.4-1 répercute sur la forme d'un graphe le shunt représenté à la Figure IV.4-1 :

- Les paramètres dimensionnels de la Figure IV.4-1 sont repris (L, h, e,...). Ils apparaissent sous la forme de losanges.
- Les paramètres physiques sont précisés (Les résistances,...)
- Le type de matériau du shunt est déterminé (Mailleshort).
- La structure détaille l'ensemble des entités matérielles présentes dans le shunt (Vis, écrou,...).
- La géométrie décrit les éléments géométriques caractérisant le shunt.
- La topologie physique associe les entités matérielles définies dans le nœud structure avec les contraintes physiques.

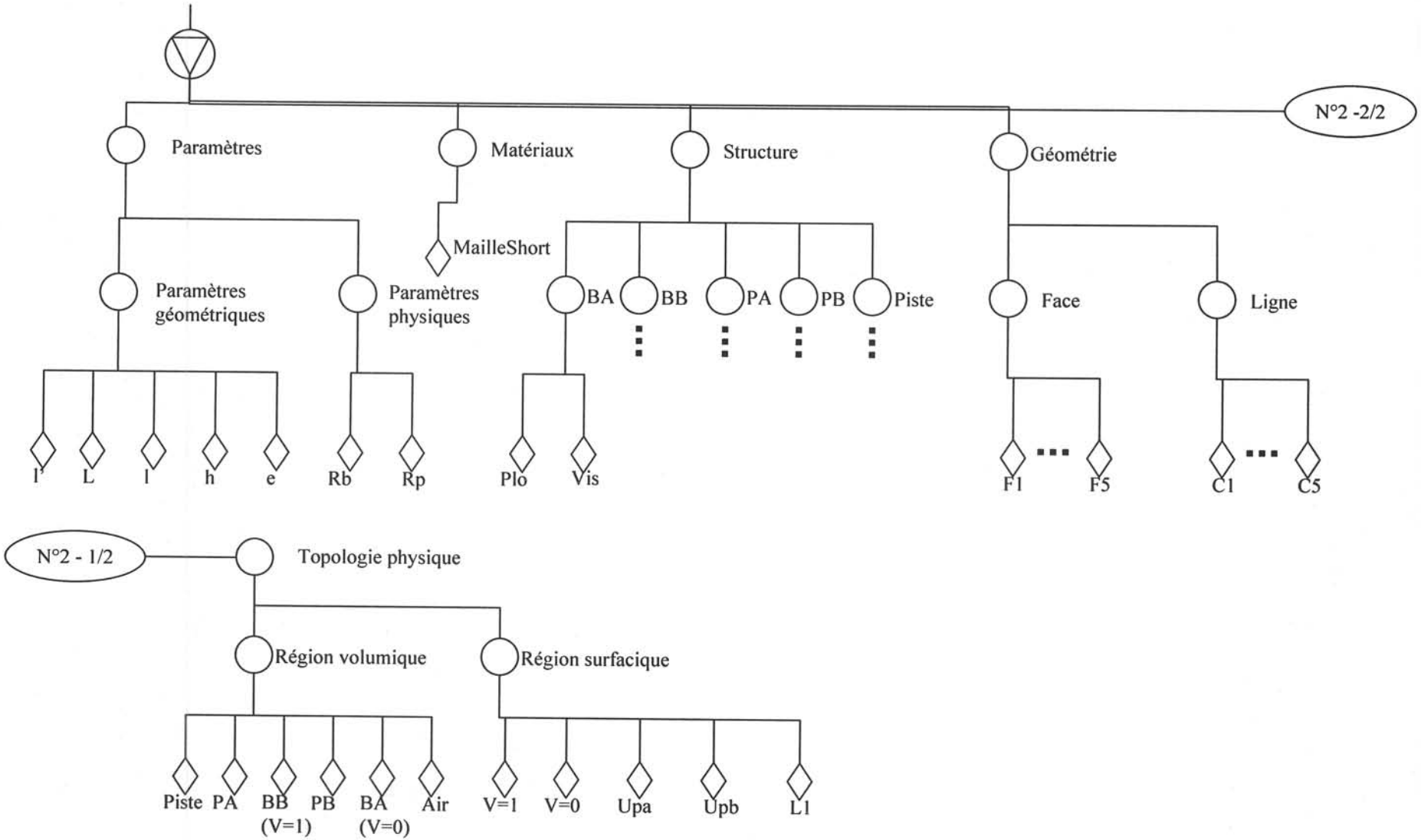


Figure IV.4-1 Représentation de la structure du shunt

IV.4.2.b Résolution du shunt par la méthode des lignes neutres

Une fois la structure du shunt définie, l'étude de celui-ci peut commencer. Tout d'abord, le concepteur va réaliser la résolution par la méthode des lignes neutres à la fois pour avoir une idée du comportement physique du shunt en fonction du courant en particulier, mais aussi, pour vérifier que cette méthode rapide et peu coûteuse en calcul n'est pas suffisante dans le cadre de son étude. Le concepteur vérifie ainsi qu'avant d'utiliser des méthodes numériques difficiles à mettre en œuvre, une méthode plus simple de résolution ne suffirait pas. La méthode étudiée utilise la ligne neutre PA-PB de longueur l. La Figure IV.4-1 illustre cette résolution.

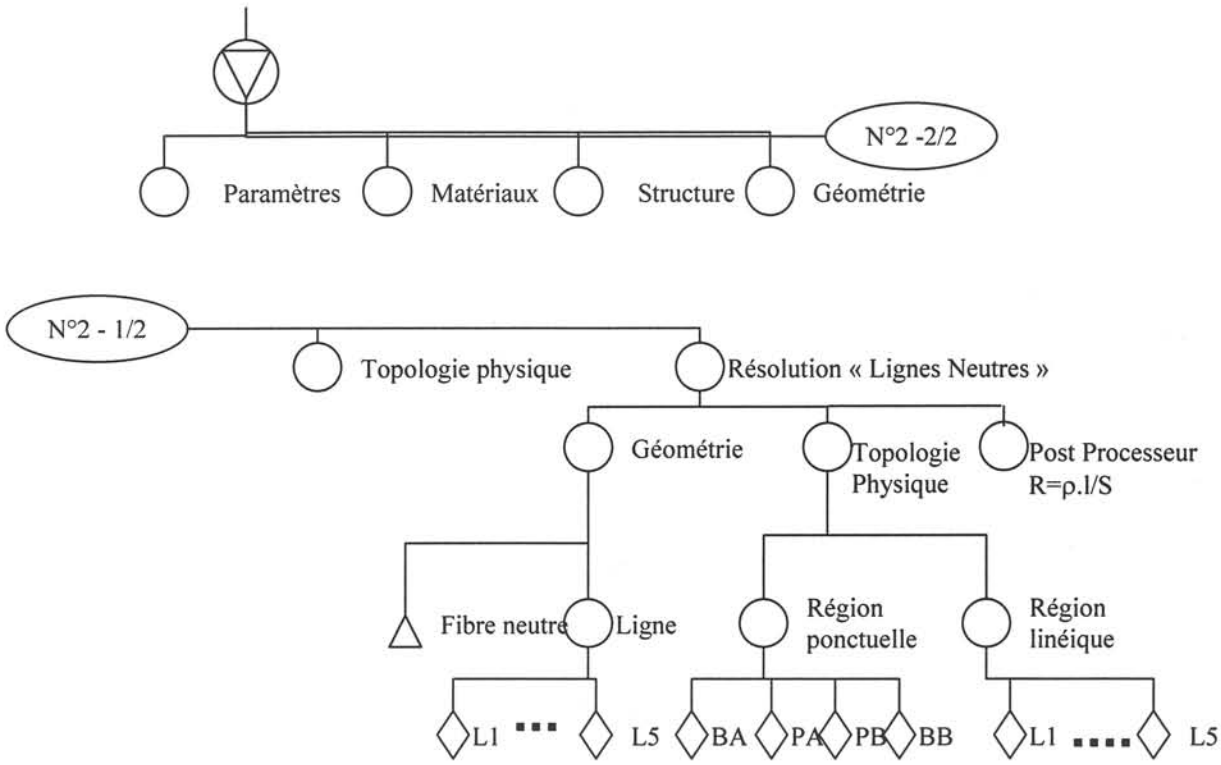


Figure IV.4-1 Représentation de la résolution du shunt par les lignes neutres

Dans la Figure IV.4-1, il apparaît immédiatement la puissance de l'encapsulation qui fait disparaître du graphe les données contingentes de la résolution rendant le graphe immédiatement plus lisible et moins exhaustif.

Ainsi, en plus des nœuds Paramètres, Matériaux, Structure, Géométrie et Topologie physique, apparaît le nœud Résolution qui décrit la méthode des lignes neutres. Cette méthode nécessite :

- La surdéfinition de la géométrie par l'introduction des fibres neutres.

- La surdéfinition des régions ponctuelles et linéiques pour caractériser ces nouvelles fibres neutres.
- L'utilisation du nœud Post Processeur pour identifier et formuler la variable que le concepteur recherche dans son problème à savoir R.

IV.4.2.c Résolution par la méthode des éléments finis

Le concepteur a un doute sur la méthode utilisée qui ne permet peut-être pas une résolution correcte de son problème. En effet, si le shunt est très long, la méthode des lignes neutres est intéressante. En revanche, si le shunt est trop large, cette même méthode peut être imprécise. Pour lever ce doute, il entreprend d'utiliser la méthode numérique par éléments finis comme le montre la Figure IV.4-1.

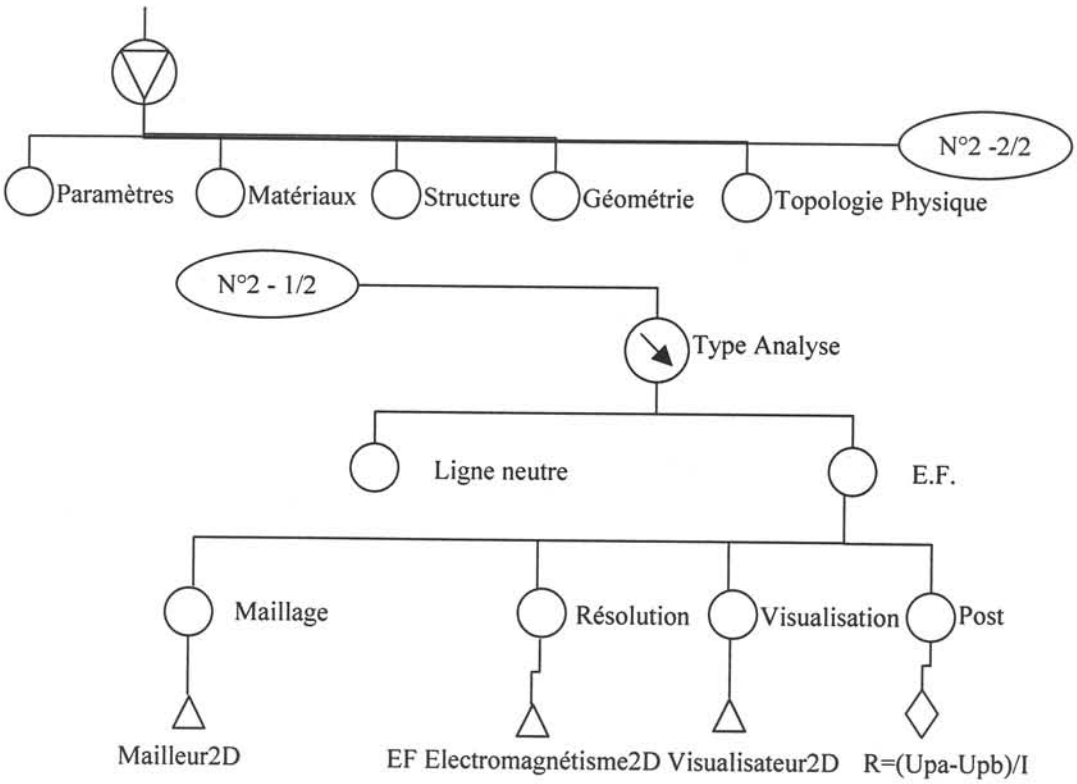


Figure IV.4-1 Représentation de la résolution du shunt par les éléments finis

La Figure IV.4-1 montre que le graphe mémorise les anciennes méthodes utilisées sans pour autant les utiliser grâce aux nœuds définis au paragraphe IV.4.1.d. Ainsi, la méthode de résolution par lignes neutres est conservée en mémoire pour renseigner un futur concepteur que cette voie a déjà été explorée. Ceci permet des gains de conception très appréciables, en

effet, la méthode de résolution par lignes neutres peut être réutilisée dans certaines conditions. Le nœud switch permet de ne pas appliquer la résolution par lignes neutres.

Ainsi, en plus des nœuds Paramètres, Matériaux, Structure, Géométrie, Topologie physique et Résolution apparaît le nœud E.F. qui décrit la méthode des éléments finis. Cette méthode nécessite :

- La définition du maillage par l'utilisation de l'application Mailleur2D.
- La définition de l'application EF Electromagnétisme2D.
- La définition de l'application Visualisateur2D qui représente dans Figure IV.4-2 les lignes de courant.
- L'utilisation du nœud Post Processeur pour identifier et formuler la variable que le concepteur recherche dans son problème à savoir R.

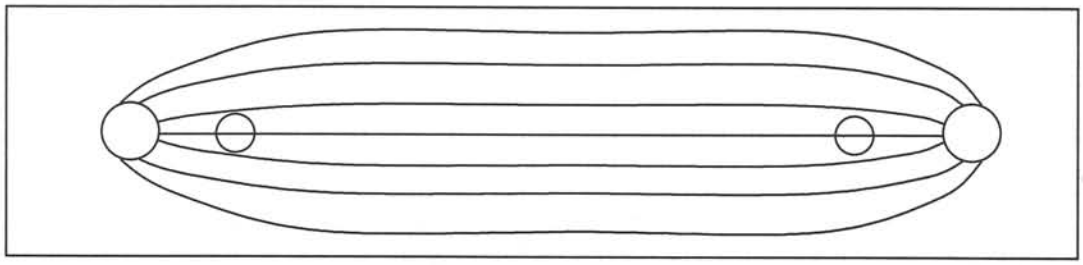


Figure IV.4-2 Représentation des lignes de courant dans le shunt

IV.4.2.d Capitalisation, Mise au propre, Boîte de calcul

Une fois la résolution du shunt achevée, le concepteur qui a terminé son étude, doit la rendre généralisable et applicable à d'autres études similaires qui conservent la structure globale du problème mais avec des variations de paramètres. Pour cette raison, le concepteur doit déterminer de lui-même, les paramètres modifiables par un simple utilisateur sans remettre en cause son étude. Ce cas se distingue nettement d'une nouvelle approche conceptuelle du modèle par un autre concepteur.

Ainsi, le concepteur peut soit :

- Premièrement, définir une boîte très ouverte où tout est paramètré aussi bien le choix de la méthode de résolution que les paramètres.
- Deuxièmement, définir une boîte très fermée limitant le nombre de paramètres comme l'illustre La Figure IV.4-1.

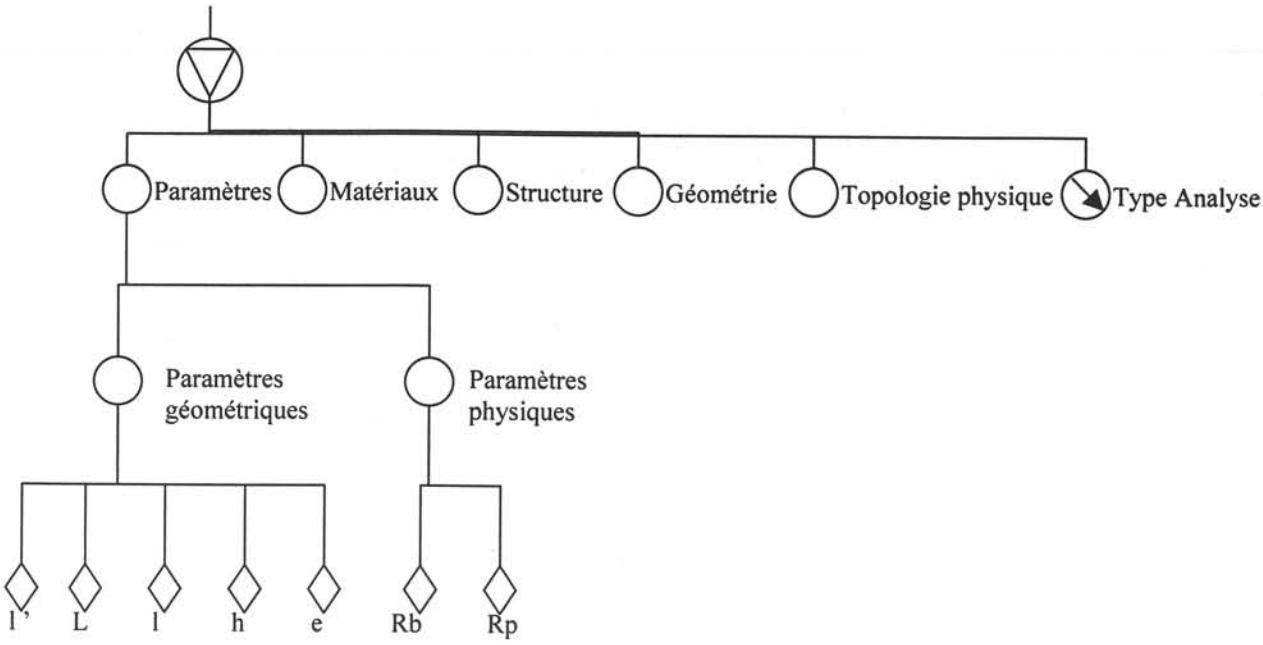


Figure IV.4-1 Exemple de boîte fermée

La Figure IV.4-1 montre que par encapsulation, un utilisateur n'a accès qu'au nœud Paramètres dont il peut modifier les entrées pour connaître les résultats des calculs.

L'ensemble des nœuds Paramètres, Matériaux, Structure, Géométrie et Topologie physique reprennent l'ensemble des données disponibles dans la Figure IV.4-1. En revanche, le nœud Switch Type Analyse permet de choisir la meilleure méthode de simulation, soit celle analytique ou celle par éléments finis.

IV.4.2.e Définition d'un nouveau langage

Une fois réalisée l'étude, il apparaît important de pouvoir la réutiliser facilement sans devoir passer nécessairement par un logiciel particulier qui risque de n'être plus maintenu dans un futur proche. Ainsi, a été définie une représentation du graphe utilisé en langage script inspiré de VRML (Virtual Reality Modelling Language).

Un exemple de programme en langage script est présenté ci-dessous qui représente une partie du graphe de la Figure IV.4-1 :

```
DEF root Group {#
   children [

      DEF paramètres Group {
```

```
        children [
             DEF paramètres_géométriques Group {
              Children [
                   l' ParameterLeaf {
                    name "l'"
                    value 70
                   }
                   L ParameterLeaf {
                    name "L"
                    value 80
                   }
                   l ParameterLeaf {
                    name "l"
                    value 60
                   }
                   h ParameterLeaf {
                    name "h"
                    value 10
                   }
                   e ParameterLeaf {
                    name "e"
                    value 5
                   }
             ]
             DEF paramètres_physiques Group {
              Children [
                   Rb ParameterLeaf {
                    name "Rb"
                    value 10
                   }
                   Rp ParameterLeaf {
                    name "Rp"
                    value 10
                   }
             ]
       DEF matériaux Group {
             Children [
                   MailleShort MaterialLeaf{
                    name "MailleShort"
                    rho 1e7
                    mu 1
                   }
             ]
       }
}
```

IV.5. Conclusion :

Ainsi, comme défini au début du chapitre, nous cherchons une méthode de développement permettant aussi bien la paramétrisation d'une étude, que le calcul de gammes en assurant des gains de temps et de fiabilité.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur l'étude réalisée aux chapitres précédents ainsi que sur la méthodologie objet et la technologie Open Inventor.

Nous avons obtenu une méthode qui permettrait à la fois de guider l'utilisateur dans sa démarche de conception tout en créant un historique comme l'événementiel créé au chapitre

précédent. On espère que cette méthode bénéficiera surtout de la puissance d'une interface machine-utilisateur très puissante de type Open Inventor permettant la réutilisation du code produit par un concepteur dans d'autres domaines d'études.

De plus, afin de pouvoir bénéficier des évolutions syntaxiques de langage standard, cette méthode pourrait être retranscrite intégralement dans le formalisme informatique proche du standard : VRML (Virtual Reality Modeling Language) et adapté à la syntaxe du génie électrique.

Chapitre V Conclusion

Ainsi, le sujet de cette thèse consistait à étudier le problème de la « Modélisation du processus de dimensionnement par la simulation numérique en Génie électrique ».

Il était apparu lors de l'introduction, qu'il fallait atteindre 3 objectifs :

- Tout d'abord, **objectif 1**, de mieux encadrer l'utilisateur dans sa démarche de modélisation d'un problème électromagnétique par un logiciel de simulation par éléments finis ou autres.

- Ensuite, **objectif 2**, de trouver un outil permettant de tenir compte ou au moins de visualiser les choix et hypothèses d'un concepteur électromagnétique afin d'apporter une meilleure disponibilité des connaissances utilisées.

- Enfin, **objectif 3**, de trouver un modèle général du processus de dimensionnement en ayant pour objectif à terme l'automatisation complète ou au moins partielle de celui-ci.

Le premier objectif a été parfaitement atteint grâce à l'utilisation de la méthode SADT qui assure une grande rigueur et lisibilité dans l'encadrement d'un utilisateur dans sa démarche de modélisations.

Le deuxième objectif quant à lui, a été lui aussi parfaitement atteint grâce à l'utilisation d'un évènementiel qui permet d'obtenir une vue globale d'un projet en mémorisant les choix et hypothèses d'un concepteur en génie électrique.

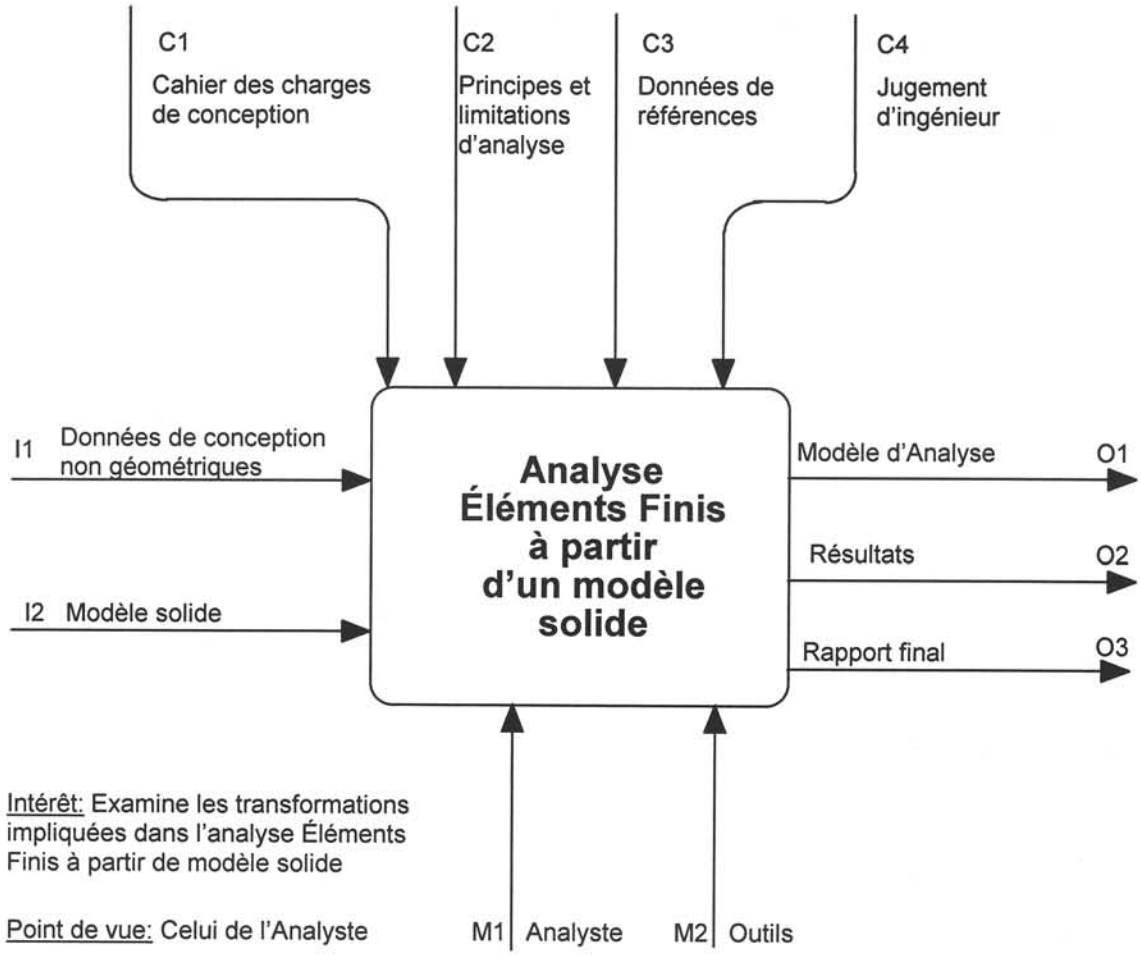
L'objectif 3 a été traité dans le chapitre fusionnant les deux méthodes précédentes. Il apparaît que la nouvelle méthode développée fournirait non seulement une interface homme-machine extrêmement conviviale et puissante, ainsi qu'un langage de développement en langage script du type VRML. Cette nouvelle méthode a été appliquée sur un exemple simple et instructif qui est le shunt. Cette méthode nécessite d'être confrontée à des problèmes plus complexes pour tester sa robustesse. L'objectif de cette thèse a été de présenter les bases de cette nouvelle méthode qui pourra après de nombreuses applications, être validées pour remplacer avantageusement toutes les pratiques informelles.

Cette étude permet de déterminer d'autres perspectives à cette nouvelle méthode afin :

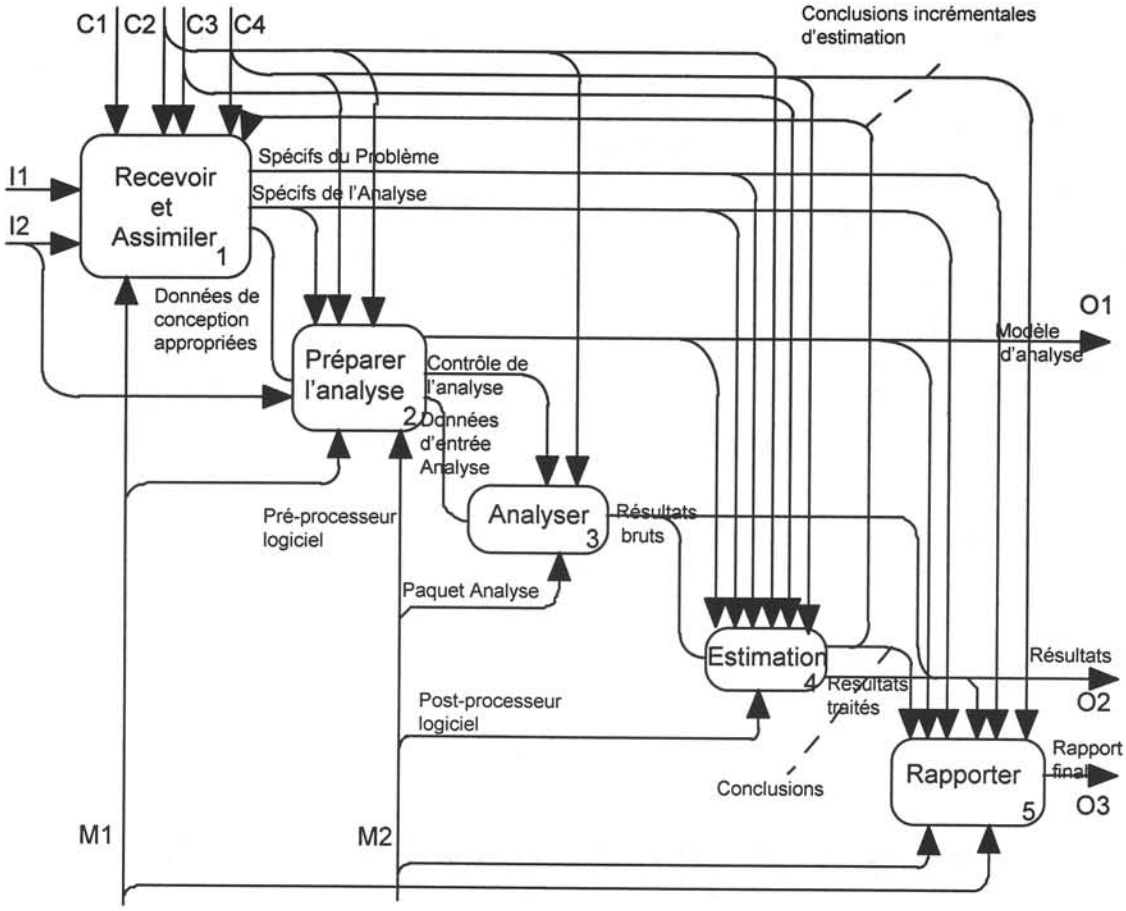
- De tester la robustesse,
- D'enrichir le vocabulaire comme « rejouer », « boucle » pour une étude paramétrique.
- D'affiner le langage de script,
- De réaliser une interface homme-machine.

Ces perspectives permettraient de faire un outil complet, robuste, sûr, convivial…

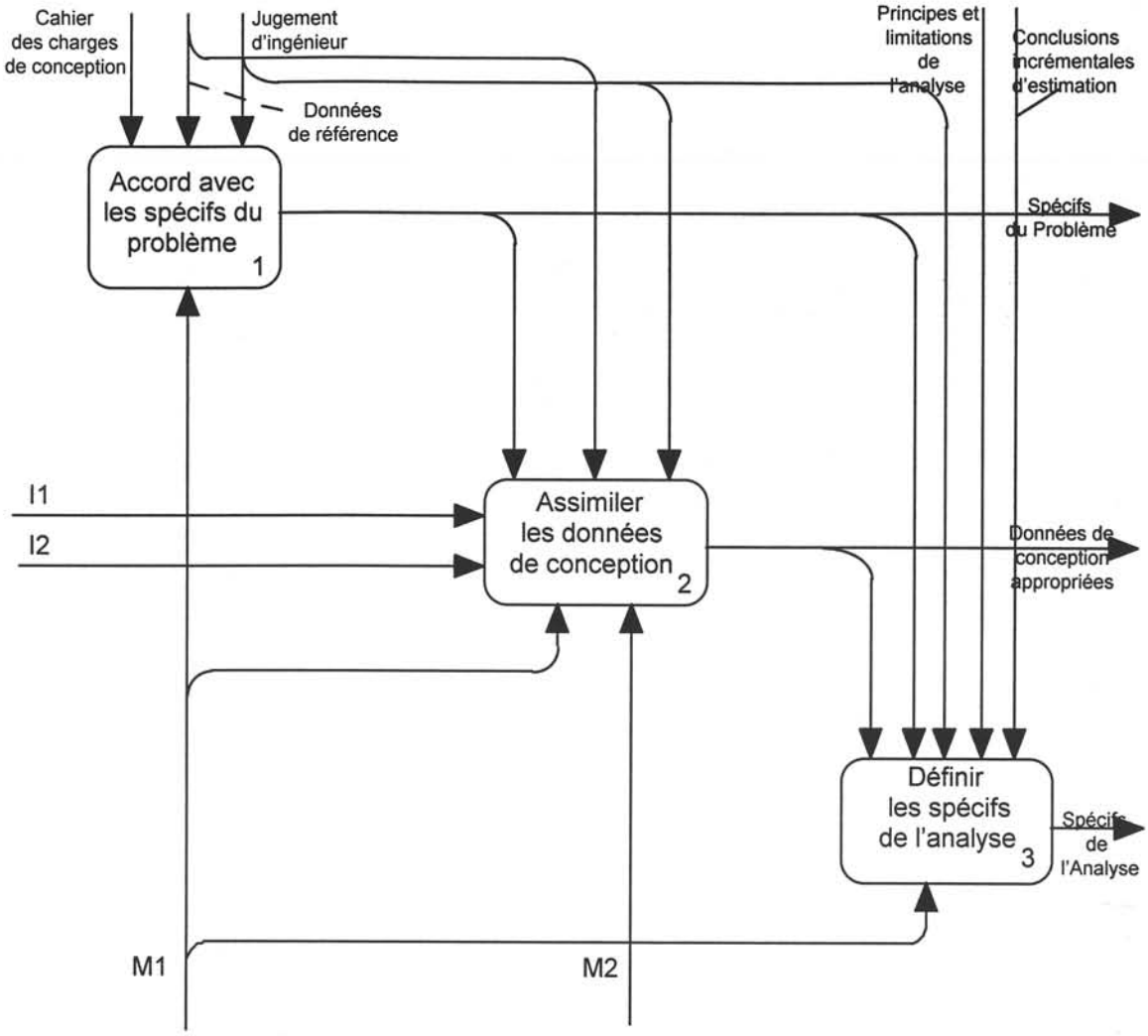
Chapitre VI Annexe 1 : Modélisation par SADT du processus de simulation numérique en génie électrique



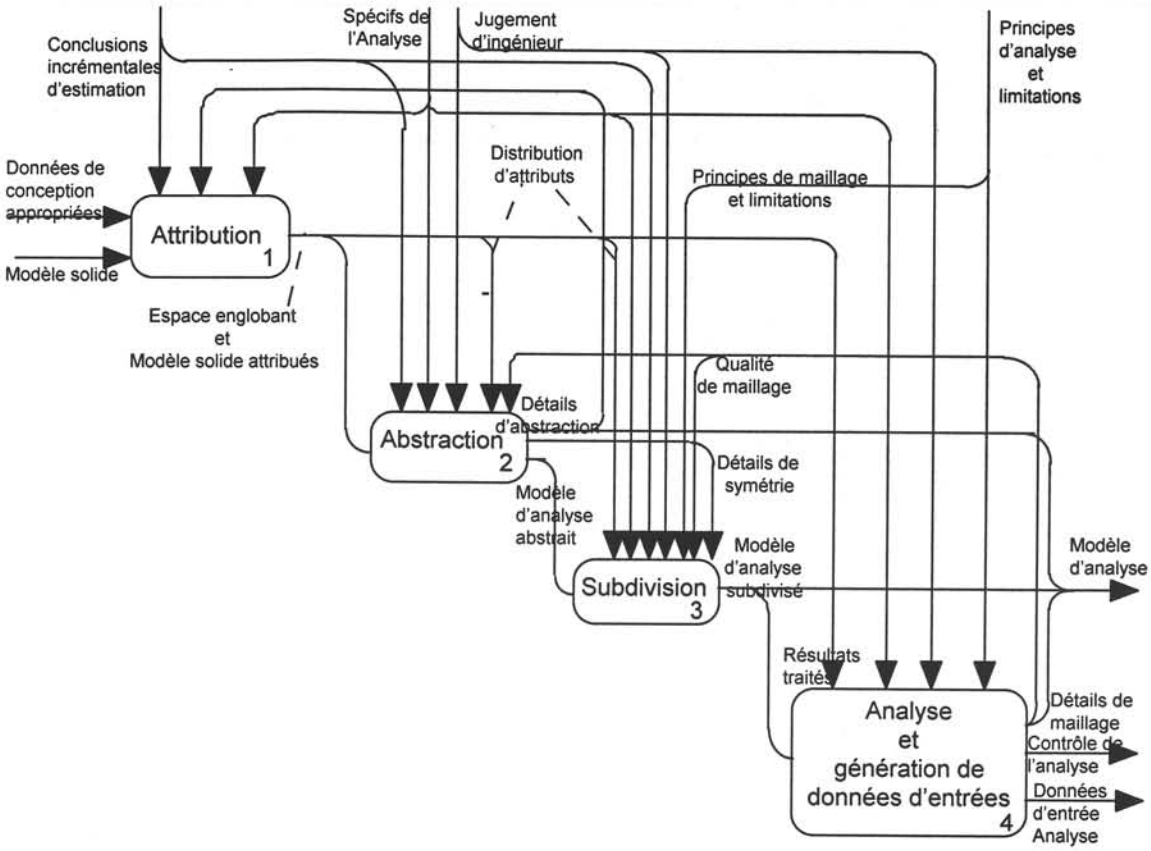
Noeud: A-0	Titre: Analyse Éléments Finis à partir d'un modèle solide - Contexte



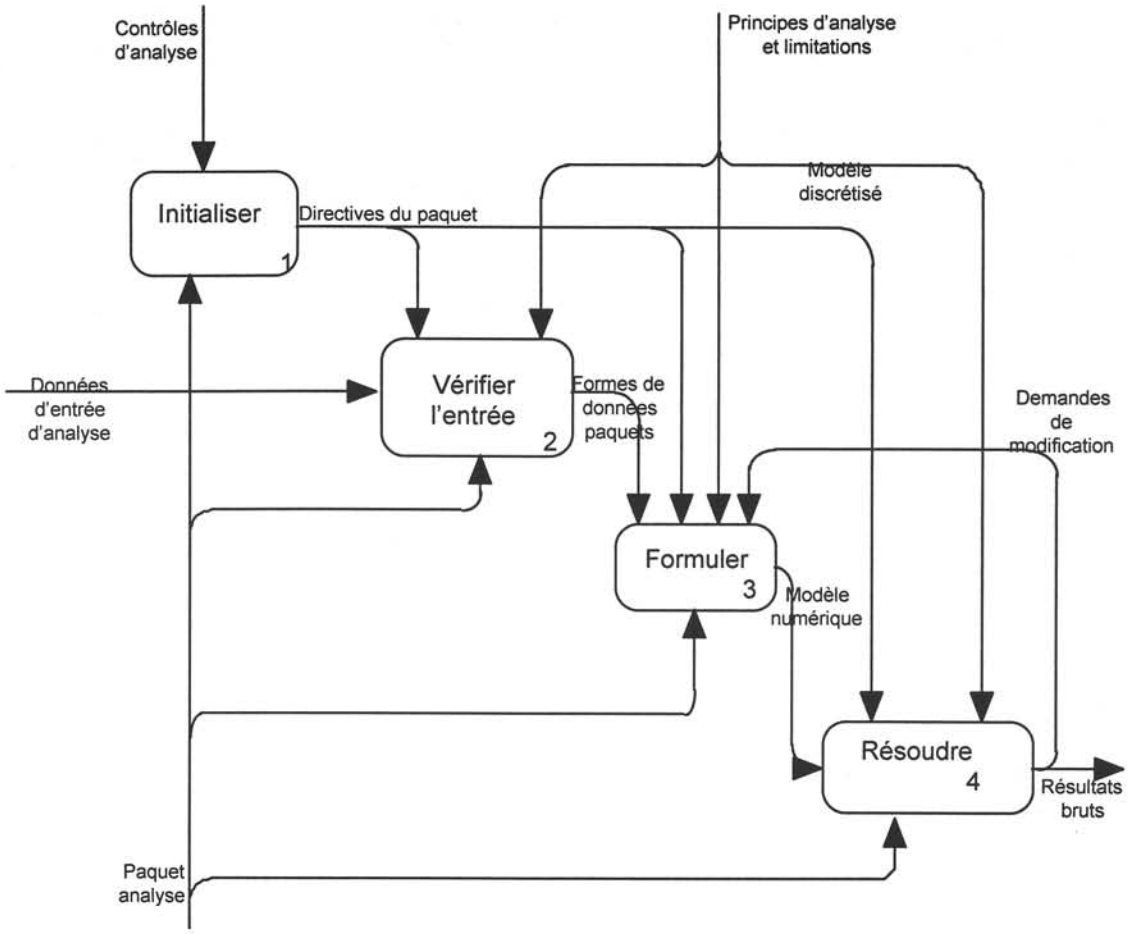
Noeud: A0	Titre: Analyse Éléments finis à partir de modèle solide



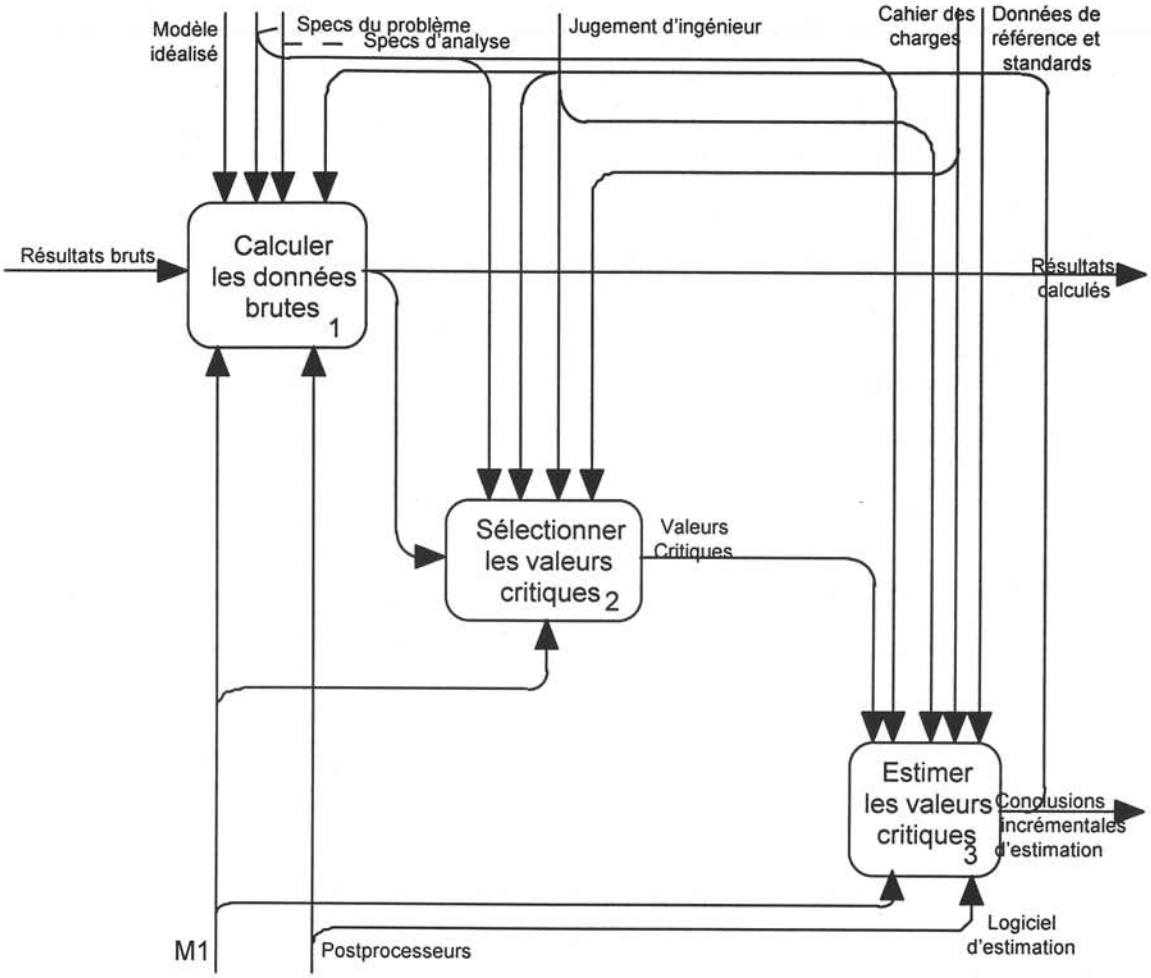
Noeud: A1	Titre: Réception et assimilation



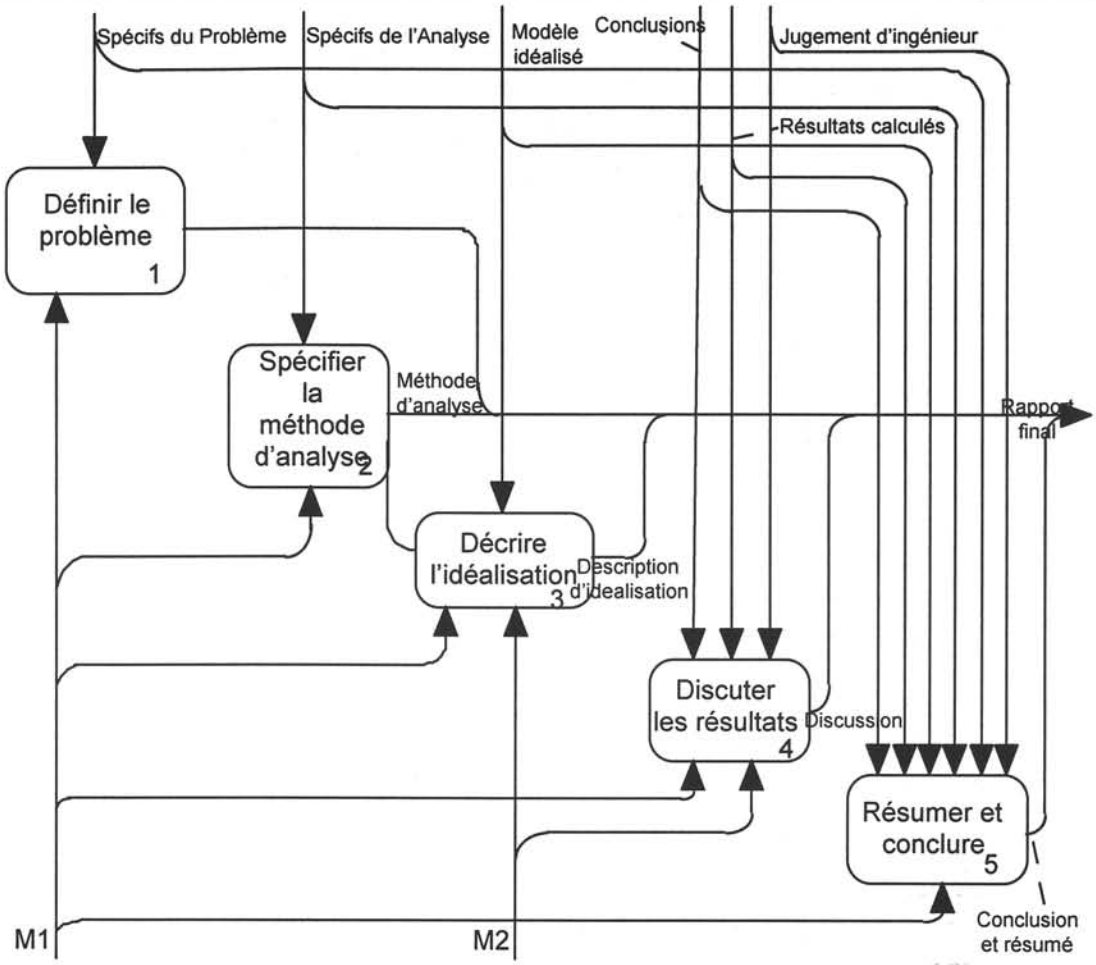
Noeud: A2	Titre: Préparer l'analyse



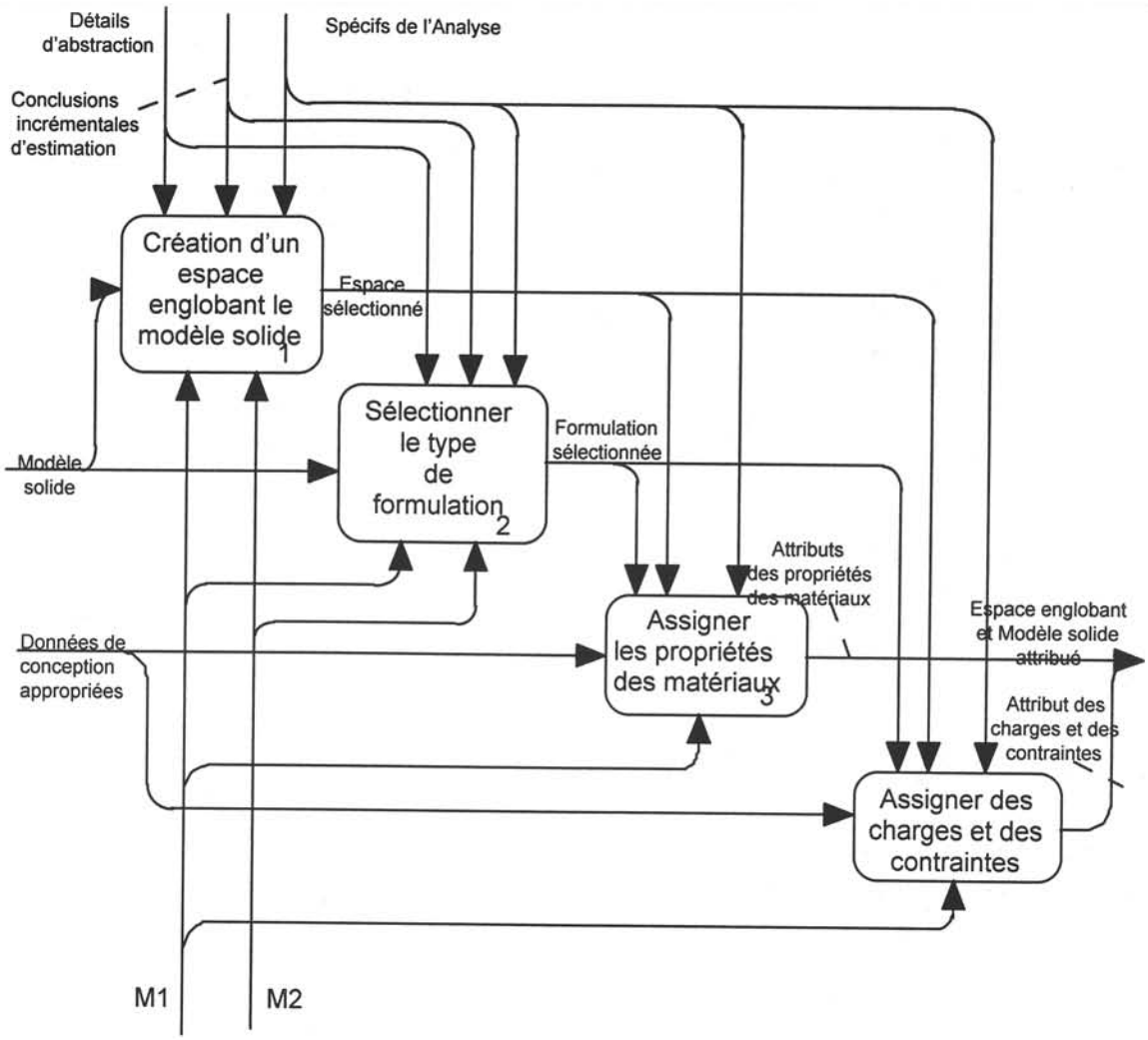
Noeud: A3	Titre: Analyser



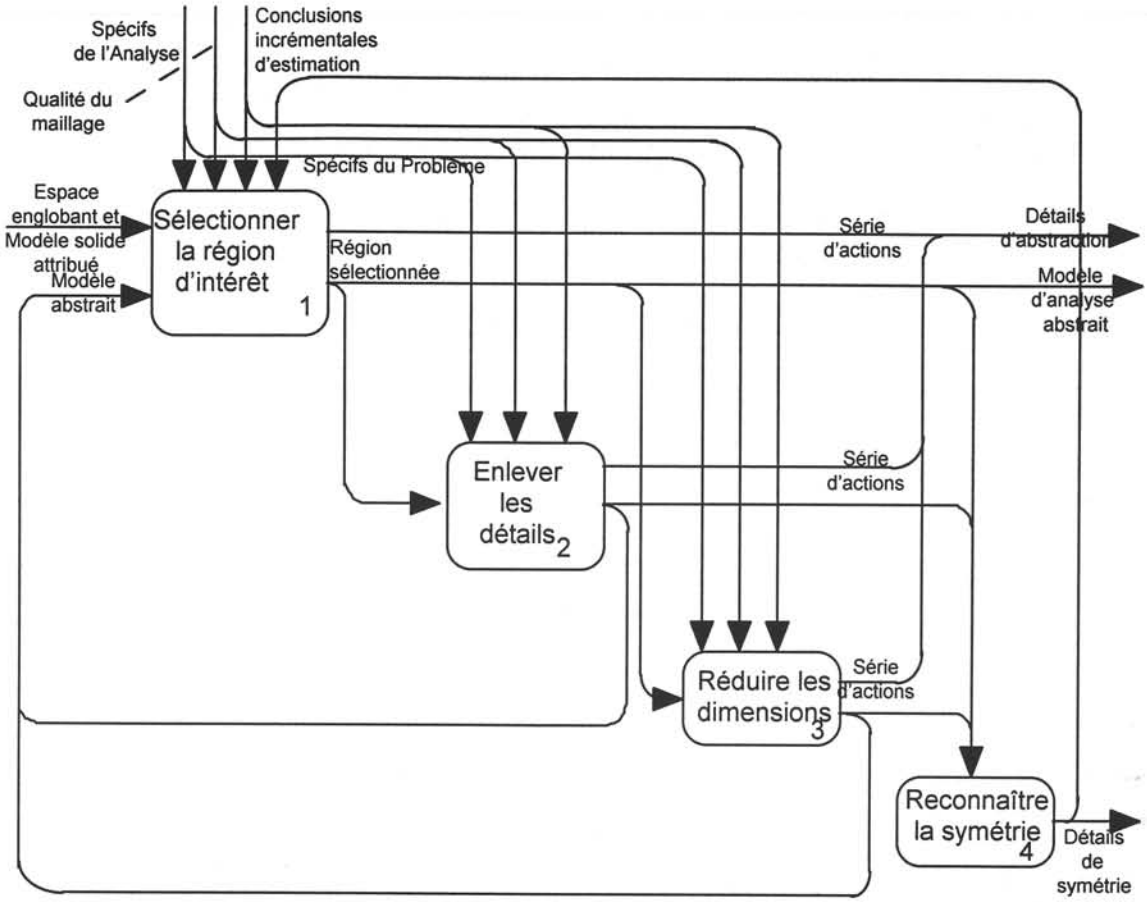
Noeud: A4	Titre: Estimation



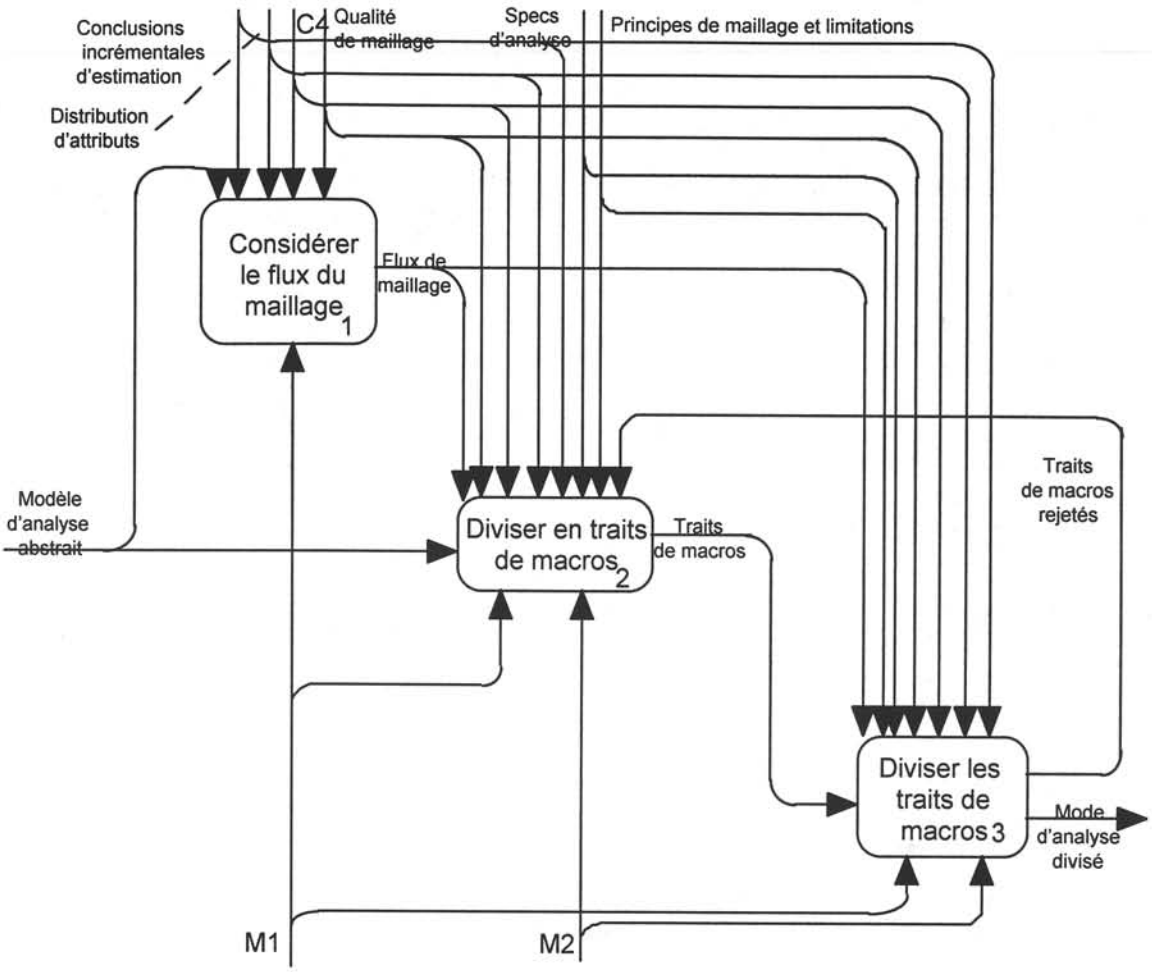
Noeud: A5	Titre: Rapport



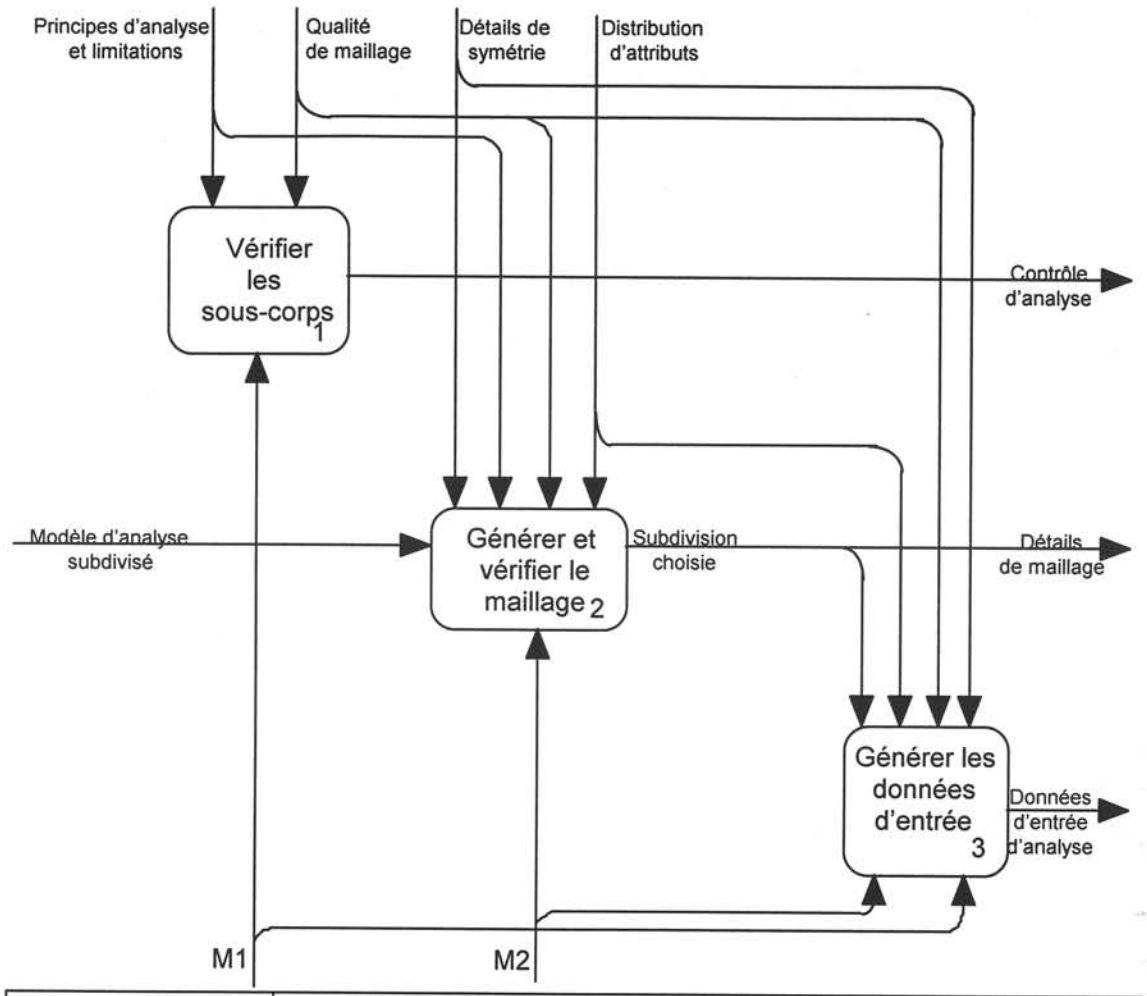
Noeud: A21	Titre: Attribution



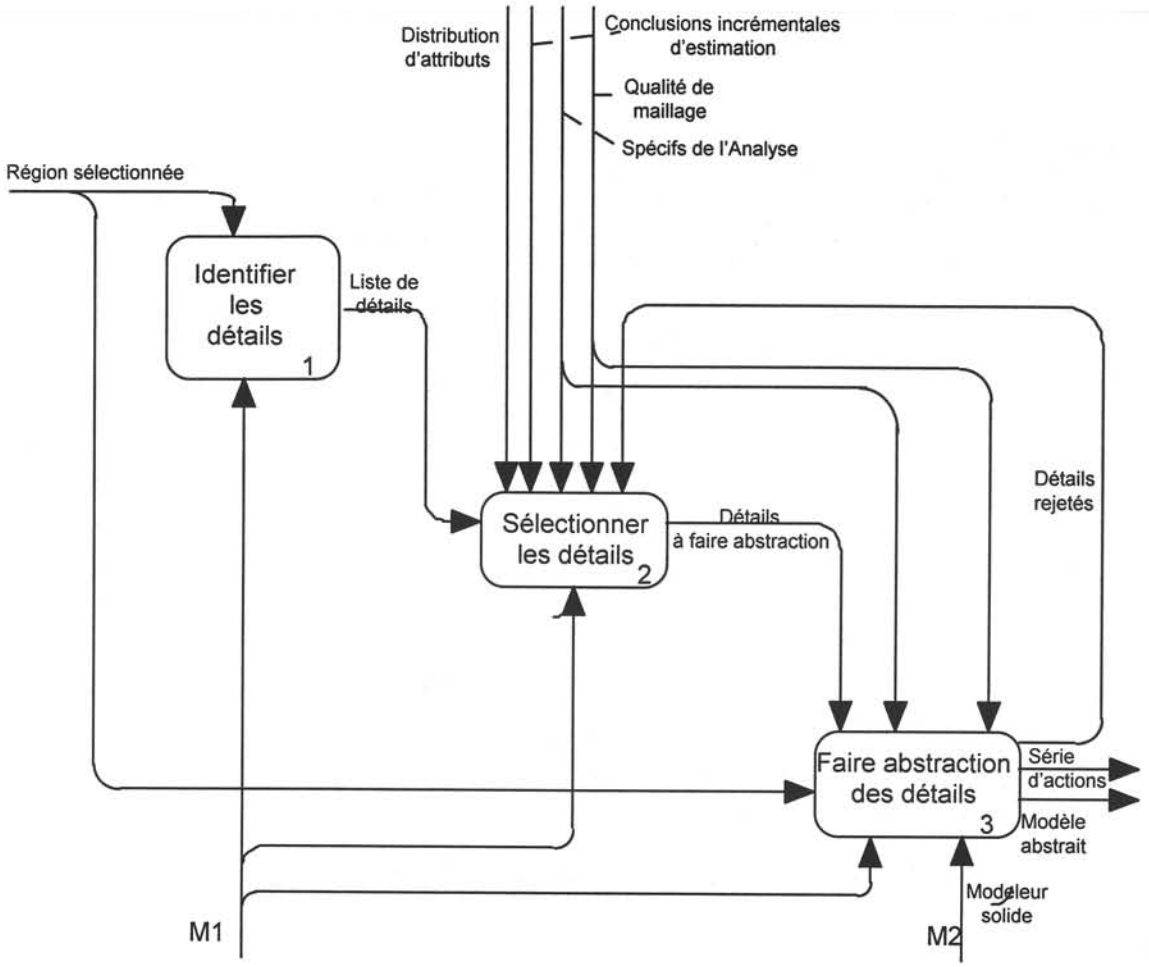
Noeud: A22	Titre: Abstraction



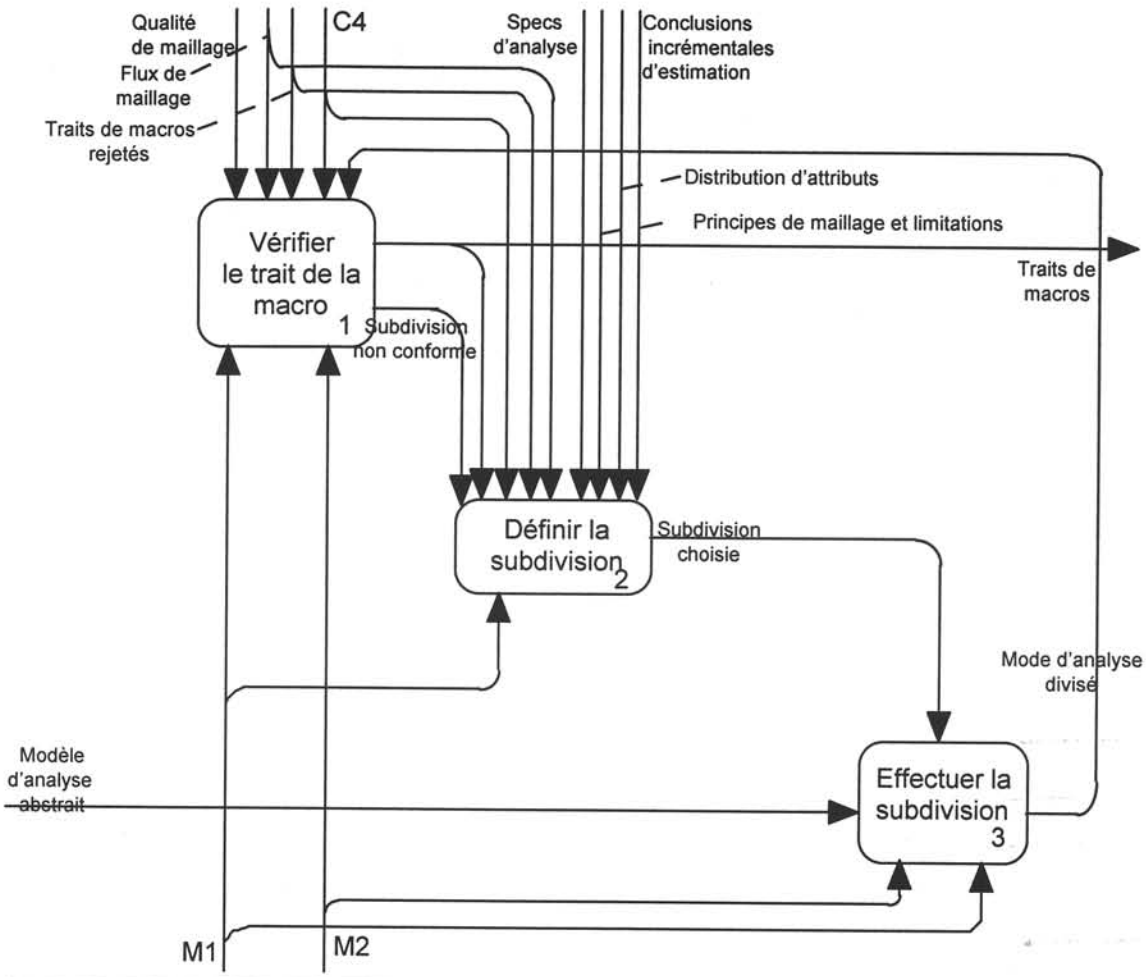
Noeud: A23	Titre: Subdivision



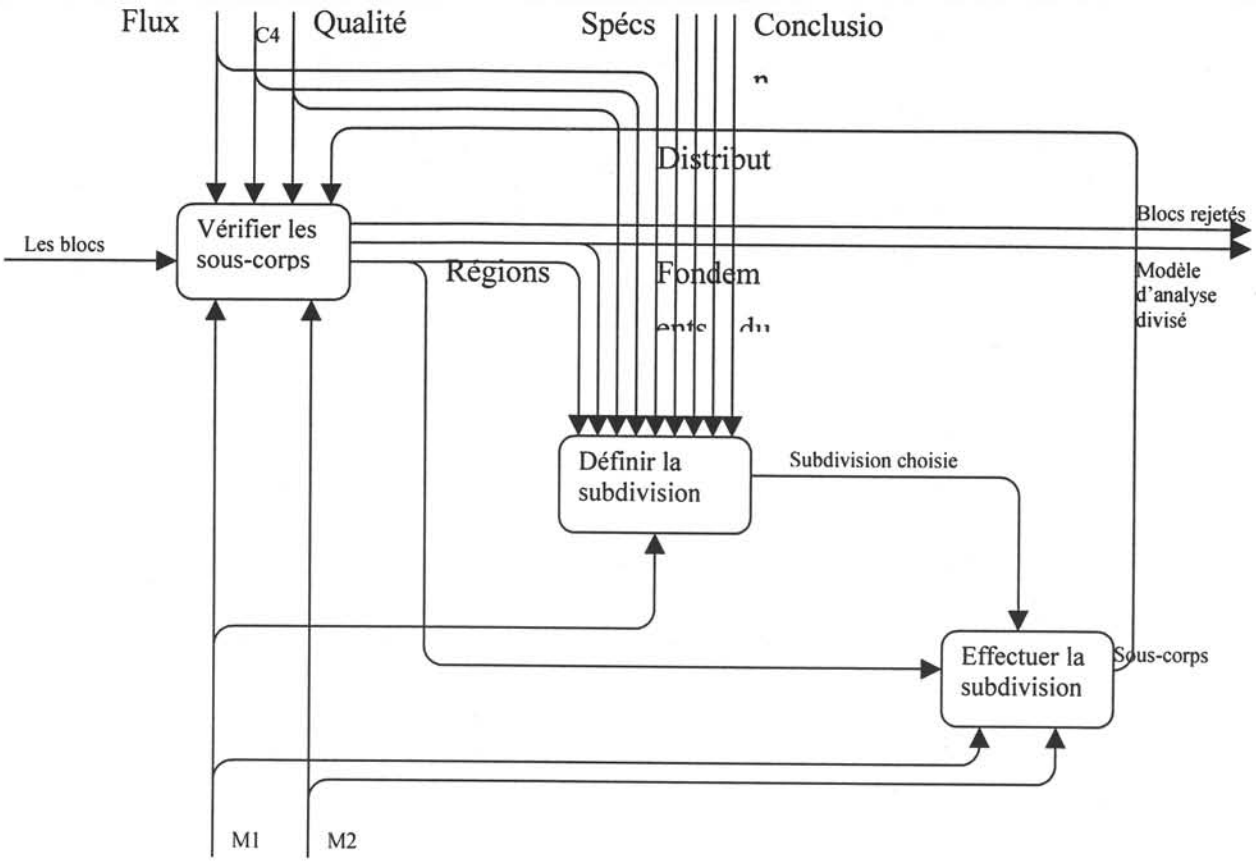
Noeud: A24	Titre: Génération de données d'entrée analyse



Noeud: A222	Titre: Enlever les détails



Noeud: A232	Titre: Diviser en traits de macros



Nœud : A233	Diviser les blocs

Chapitre VII Références

[ARA91] S. Arabashi, D. C. Barton, N. K. Shaw, « Towards integrated design and analysis », Finite Elements in Analysis and Design, Vol.9, pp.271-293, Elsevier Science, 1991.

[BOO92] G. Booch, « Conception orientée objets et applications », Addison-Wesley, France 1992.

[BRO84] M. Brodie, « On Conceptual Modeling : Perspectives from Artificial Intelligence, Databases, and Programming Languages », Springer-Verlag, New York, 1984.

[COX86] B. Cox, « Object-Oriented Programming : An Evolutionary Approach », Addison Wesley, 1986.

[GAN87] J. Gannon, R. Hamlet, H. Mills, « Theory of Modules », IEEE Transactions on Software Engineering, Vol . SE-13, 1987.

[GUI00] J. M. Guichon, E. Clavel, Y. Maréchal, V. Mazauric, «Method to compute current density in power distribution bars», CEFC'00, pp.375, 2000.

[GUI00] J. M. Guichon, E. Clavel, Y. Maréchal, V. Mazauric, «Methodolgy to compute electrodynamics efforts and temperature on power busbar distribution : coupling of finite element and analytical approach», CEFC'00, pp.305, 2000.

[ING] D. Ingalls, « The Smalltalk-76 Programming System Design and Implementation », Proceedings of the Fifth Annual ACM Symposium on Principles of Programming Languages.

[KAM99] T. Kama, « Caractérisation, Validation et Formalisation du dimensionnement des conducteurs blindés », Diplôme d'études Approfondies de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.

[KHO86] S. Khoshafian, G. Copeland, « Object Identity » ,SIGPLAN Notices, Vol.21, 1986.

[OPEN1] Open Cascade, logiciel de développement de Matra Datavision.

[OPEN2] Open Inventor, langage graphique développé par Silicon Graphics.

J. Péchoux, D. A. Lowther, « Kohonen Maps and Automatic Mesh Generation in Two and Three Dimensions », 7th International IGTE Symposium, pp.206-211, 1996.

[PEC98] J. Péchoux, J. L. Coulomb, Y. Maréchal, «Electromagnetic-mechanical coupling in the new Cas.cade environment by Matra Datavision Company», EMF'98, pp.63-68, 1998.

[PEC98] J. Péchoux, J. L. Coulomb, Y. Maréchal, « Automated Electromagnetic Modeling in Order to Make Electromagnetic and Mechanical Coupling », CEFC'98, pp 431, 1998.

[ROS77] D. T. Ross, K. Schoman, Structured analysis for requirements specification, IEEE Trans. Software Eng. 3 (1), pp.6-15, 1977.

[SAMCEF] Logiciel éléments finis de Samtech corporation.

[SCH91] D. A. Schön, « The reflexive practitioner, How professionals think in action », Avebury, Ashgate Publishing, England, 1991.

[TOL98] M. Tollenaere et al., « Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils », Hermes, Paris, 1998.

[TRO99] N. Troussier, « Contribution à l'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits techniques : proposition méthodologique pour l'utilisation et la réutilisation », Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble I, 1999.

[ZGA96] F. X. ZGAINSKI, « Un pré-processeur pour l'électromagnétisme, l'électro-mécanique et l'électro-acoustique », Thèse de Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.