



**HAL**  
open science

# MODELISER ET CONCEVOIR IES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE

Nicolas Retière

► **To cite this version:**

Nicolas Retière. MODELISER ET CONCEVOIR IES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2003. <tel-00408128>

**HAL Id: tel-00408128**

**<https://theses.hal.science/tel-00408128v1>**

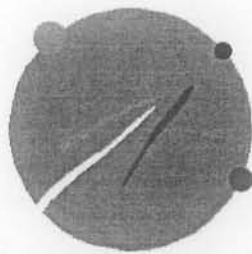
Submitted on 29 Jul 2009

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.



HAL Authorization



L.E.G

# **MODELISER ET CONCEVOIR LES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE**

**Habilitation à diriger des recherches  
de l'Université Joseph Fourier**

**Nicolas Retière**

Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble  
UMR 5529 INPG/UJF-CNRS

**27 novembre 2003**

Composition du jury :

Philippe AURIOL – Président  
Alain OUSTALOUP – Rapporteur  
Laurent PUECH – Rapporteur  
Seddik BACHA – Examineur  
Marcel IVANES – Examineur  
René LE DOEUFF – Examineur  
James ROUDET – Examineur



# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b>	<b>3</b>
<b>EN GUISE D'AVANT PROPOS</b>	<b>5</b>
<b>DU TELEGRAPHE A L'AVION TOUT ELECTRIQUE : Un siècle et demi d'évolution et de ruptures.</b>	<b>9</b>
1. SURVOL HISTORIQUE [1] - [2] - [3]	11
1.1. <i>Les premiers pas</i>	11
1.2. <i>Le règne du continu</i>	11
1.3. <i>Le passage à l'alternatif</i>	11
1.4. <i>Centralisation et concentration</i>	11
1.5. <i>La redéfinition des stratégies électriques</i>	12
2. UNE MUTATION PROBLEMATIQUE	13
2.1. <i>L'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution</i>	13
2.2. <i>Le comportement dynamique des réseaux d'alimentation</i>	20
2.3. <i>Constat d'une insuffisance</i>	22
<b>VERS UNE MODELISATION EN RUPTURE</b>	<b>25</b>
1. POSITION DU PROBLEME	27
1.1. <i>Quelques éléments de spécifications</i>	27
1.2. <i>Premiers travaux</i>	27
2. MODELISATION SIMPLIFIEE DES SYSTEMES ELECTRIQUES	30
2.1. <i>Les différentes approches de simplification de modèle [50]</i>	30
2.2. <i>Un exemple de réduction d'ordre</i>	30
2.3. <i>L'ordre fractionnaire comme outil de simplification structurelle</i>	34
3. MODELISATION FRACTALE	40
3.1. <i>Quelques éléments sur les fractales</i>	40
3.2. <i>Fractales et diffusion</i>	41
3.3. <i>Vers une application aux réseaux électriques</i>	44
4. REFLEXIONS SUR L'INCOMPLETUDE ET L'ALEATOIRE	45
5. QUELLE VALIDATION ?	46
<b>ELEMENTS DE CONCEPTION DES RESEAUX ELECTRIQUES</b>	<b>49</b>
1. LES ENJEUX DE LA CONCEPTION	51
2. PROPOSITION D'UN PROCESSUS DE CONCEPTION	51
2.1. <i>Ebauche de structuration</i>	51
2.2. <i>Un premier processus de conception des réseaux électriques</i>	52
2.3. <i>Pour une conception ensembliste</i>	54
3. MODELES, METHODES ET OUTILS DE CONCEPTION	55
3.1. <i>Les modèles de conception</i>	55
3.2. <i>Les méthodes et outils de conception</i>	56
4. UN EXEMPLE D'APPLICATION : LES RESEAUX ELECTRIQUES DES FUTURS GROS PORTEURS CIVILS	57
4.1. <i>L'avion plus électrique</i>	57
4.2. <i>Eléments de conception d'un réseau de bord</i>	58
<b>CONCLUSION</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>63</b>



## **EN GUISE D'AVANT PROPOS**

Mes remerciements vont aux membres du jury, tout particulièrement aux professeurs S. Bacha, R. LeDoeuff, P. Auriol, A. Oustaloup et L. Puech.

Ils s'adressent aussi à Daniel Roye et Marcel Ivanès deux personnes qui ont largement marqué mes premières années de recherche.

Merci à Jean-Luc, François et Robert pour les bons moments que nous passons ensemble à faire et défaire le monde et plus généralement à toutes les personnes avec qui j'ai travaillé depuis dix ans.

Enfin, ma plus profonde reconnaissance va à James pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordés ces dernières années et pour rendre mon quotidien d'enseignant-chercheur, amusant, exigeant, captivant ... toujours vivant quoi !



Les développements de l'informatique dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> Siècle sont certainement à l'origine de la notion moderne d'intégration entre systèmes distribués [84].

Du "gros" ordinateur des débuts, les systèmes informatiques sont peu à peu passés dans les années 60 à des systèmes temps réel pour la surveillance ou l'exploitation d'installations. La mise en réseau, s'est accentuée dans les années 70 avec le développement des premiers réseaux utilisés pour les transactions et les gestions à distance mais ce sont surtout les années 80 qui ont vu les réseaux informatiques de diverses tailles se multiplier aussi bien à un niveau local qu'à l'échelle mondiale pour les télécommunications. Ce développement semble avoir trouvé une forme d'achèvement dans le réseau global qu'est Internet.

Un corollaire important du développement des réseaux informatique est la distribution qui y règne. Si certaines formes de centralisation peuvent encore subsister localement, le réseau informatique moderne se caractérise comme un ensemble intégré de systèmes distribués et fortement inter-agissant entre eux.

Les réseaux électriques ont une évolution qui peut être comparable. Les petits réseaux locaux du début 20<sup>ème</sup> Siècle ont ainsi été interconnectés petit à petit pour former des réseaux plus vastes. Par contre, certainement à cause d'un manque de maturité technologique et d'une culture sociopolitique largement centralisatrice, cette mise en réseau s'est faite dans une perspective de forte centralisation.

Ce n'est que récemment que les réseaux électriques ont été vus comme systèmes intégrateurs de sous-systèmes décentralisés. Bien sûr, les orientations politiques libérales des vingt dernières années sont en grande partie responsables de cette nouvelle vision. Pourtant, en filigrane, se dessinent des enjeux qui vont bien au-delà de ces orientations. Ils concernent l'autonomie de tout un chacun à disposer de l'énergie dont il a besoin. Ils questionnent notre responsabilité face à la production de l'énergie électrique, son transport, sa distribution. Ils interrogent les modalités d'un développement local qui n'ignore pas la dynamique globale.

La question centrale est peut-être la suivante : comment se réapproprier la maîtrise de l'énergie que nous utilisons face aux logiques des jeux de marchés présents et surtout futurs de l'énergie ?

Ces enjeux peuvent sembler loin du génie électrique. Pourtant, ce sont bien les chercheurs de ce domaine qui sont en première ligne lorsqu'il convient d'anticiper les problèmes concrets posés par cette profonde mutation et d'imaginer les solutions. Ce sont aussi eux qui constituent le vecteur privilégié de la transmission d'une culture scientifique en pleine reformation avec la généralisation de technologies décentralisées de production et d'utilisation de l'énergie électrique.

Pour cela, il faut qu'ils construisent les concepts, les modèles, les méthodes, les outils indispensables à l'accomplissement de leur tâche.

C'est un peu ce que je vais tenter, bien modestement, d'aborder dans ce document. Partant d'un constat historique et scientifique de l'évolution des réseaux électriques, je proposerai quelques éléments de réflexion concernant une modélisation en rupture des réseaux avant de terminer sur l'esquisse d'un processus de conception des réseaux du futur.

Une dernière mise en garde ... si ce document se veut la synthèse de mes travaux et réflexions depuis une petite dizaine d'années, il ne faut pas y voir un programme absolu et globalisant, totalement objectif et non soumis à l'aléatoire des histoires humaines car "c'est là que les programmes généralisés se cassent les dents. Sur des bouts de monde, sur des morceaux d'hommes qui n'en veulent pas, des programmes" (P. Carles et J. L. Comolli - *Free Jazz, hors programme, hors sujet, hors champ*).



**DU TELEGRAPHE A L'AVION TOUT ELECTRIQUE :**  
**Un siècle et demi d'évolution et de ruptures.**



## 1. SURVOL HISTORIQUE [1] - [2] - [3]

### 1.1. Les premiers pas

Le développement de l'électricité accompagna celui des systèmes de production, de communication et de transport. Ainsi, le télégraphe s'avéra être une des premières applications électriques et permit des avancées dans les domaines des matériaux isolants et conducteurs et des appareils de commutation. L'invention du procédé électrochimique de galvanoplastie en 1838 fût aussi à la source du développement des sources d'énergie de forte puissance (batteries) dans les années 1860.

Vers la même époque, de nouveaux besoins d'énergie électrique se firent sentir avec les débuts de l'éclairage (la première expérience d'éclairage public avec des lampes à arc eut lieu en 1844 sur la Place de la Concorde). Ainsi, c'est pour alimenter ces lampes que furent réalisées les premières génératrices magnétoélectriques (inducteur fixe à aimants permanents et induit tournant). Cependant, à cette époque, en l'absence de machines suffisamment puissantes, il fallait une génératrice par lampe ce qui augmentait fortement le coût de revient de l'éclairage électrique au profit de l'éclairage gaz.

On peut déjà noter que c'est essentiellement sous la forme décentralisée que fût tout d'abord utilisée l'énergie électrique. De même, pour la petite histoire, la co-génération (génération simultanée d'électricité et de chaleur qui se développe actuellement pour des raisons d'économie d'énergie puisque le rendement global de l'installation est ainsi fortement augmenté) fit ses premiers pas en 1870 avec la pile thermoélectrique de Clamond qui sous l'effet de la combustion de bois générait de l'électricité tout en produisant de la chaleur pour le chauffage.

### 1.2. Le règne du continu

En 1872, Gramme proposa la première génératrice à courant continu. L'année suivante la réversibilité de la génératrice fût utilisée lors d'une expérience à l'exposition d'Electricité de Vienne. Les développements de la motorisation électrique n'allèrent dès lors plus s'arrêter. En 1879, Siemens proposa l'utilisation d'un moteur à courant continu de son invention pour le transport urbain. La traction électrique s'imposa définitivement dans les années 1885-1890 avec l'invention du bogie-moteur qui permettait de limiter les vibrations du moteur.

Ce n'est qu'au début des années 1880 que le transport de l'énergie électrique pu s'effectuer sur de longues distances. La démonstration décisive eut lieu en 1884 entre Vizille et Grenoble. L'énergie électrique était produite dans une centrale hydraulique à Vizille puis transportée à Grenoble pour alimenter d'une part un circuit d'éclairage installé dans aux Halles de la ville et d'autre part des moteurs électriques entraînant des machines outils.

A la même époque (1879), Edison proposa sa première lampe à incandescence et surtout imagina un système complet de distribution d'énergie électrique pour l'éclairage d'habitations. Ce réseau était constitué de postes sources, de câbles souterrains, d'interrupteurs, de fusibles et même de compteurs pour la tarification de la consommation. Il fut installé et testé à partir de 1881 dans un quartier de New-York.

### 1.3. Le passage à l'alternatif

Une étape importante dans l'utilisation généralisée du courant alternatif fut la conception des premiers transformateurs en 1882 par Gaulard et Gibbs. C'est en 1891 lors de l'exposition d'Electricité de Francfort que le transport eut lieu pour la première fois en triphasé. La tension délivrée par l'alternateur était tout d'abord élevée à 8500 V par un transformateur. L'énergie électrique était ensuite transportée du site de production au lieu de l'exposition par une ligne d'une longueur de 177 km. En bout de ligne 1000 lampes à incandescence et un moteur asynchrone triphasé étaient installés et alimentés sous 65V par des transformateurs abaisseurs. Le rendement global était de 75%.

### 1.4. Centralisation et concentration

A partir du début du 20<sup>ème</sup> Siècle, le rythme de l'électrification et de l'interconnexion des divers réseaux d'énergie et moyens de production s'accélère. Cette tendance lourde à l'interconnexion et à la centralisation répond au besoin d'une rationalisation de la production et de l'utilisation de l'énergie

électrique pour répondre aux besoins énergétiques croissants et prévenir les incidents. En Europe, cette interconnexion des réseaux régionaux de chaque pays s'étendit bientôt aux pays entre eux. Ce mouvement s'accompagna d'une diminution du nombre des opérateurs de réseaux (une vingtaine au début du siècle dans la région parisienne) et du regroupement des opérateurs restant au sein de fédérations. Ceci aboutit à la création d'EDF en 1946.

### 1.5. La redéfinition des stratégies électriques

Paradoxe de l'histoire, on assiste depuis quelques années à un retour à des conceptions et des techniques dont les prémisses étaient apparues dès les premiers pas de l'utilisation de l'énergie électrique. Ce retour se trouve, en grande partie, impulsé par la Communauté Européenne. En décembre 96, la directive européenne 96/92/CE offre en effet le choix à des clients éligibles de choisir leur fournisseur d'énergie et libéralise la production. Ceci induit un mouvement de décentralisation caractérisé par la multiplication des opérateurs réseau, la diversification des sources de production, la diminution de leur taille et leur rapprochement des consommateurs.

Ce mouvement est complété par la directive 01/77/CE parue en 2001 qui indique que la part d'électricité produite par des sources d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'électricité doit être de 22.1% en 2010.

La conjugaison de la décentralisation et de l'intérêt pour les énergies renouvelables amène un intérêt croissant pour les unités de production de petite et de moyenne puissance (microcentrales hydrauliques, unités de microcogénération, éoliennes, piles à combustible ...) raccordées aux réseaux de distribution [4]. Une étude anglaise envisage même la possibilité d'installer un million de microcogénérateurs (puissance électrique inférieure à 3 kW) par an à travers l'Europe [5]. Effet d'annonce ou pas, de tels chiffres traduisent avec netteté la redéfinition radicale des stratégies électriques qui s'est amorcée ces dernières années.

Cette redéfinition ne se limite pas aux réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. En effet, l'énergie électrique est de plus en plus souvent utilisée pour des applications dans lesquels l'hydraulique, le pneumatique, le thermique étaient encore omniprésents il y a peu. C'est ainsi que le début des années 90 a vu éclore les concepts de véhicule routier tout électrique mais aussi de navire et d'avion tout électrique, voire de maison tout électrique avec l'explosion de la domotique [6] - [7] - [8]. Enfin, le développement de l'électronique et du numérique grand public renforce la place privilégiée tenue par les dispositifs électriques dans de nombreux domaines : industriels, tertiaire ou domestique. Si ces domaines étaient traditionnellement rattachés à une compétence électronique, la multiplication de ces dispositifs et l'accroissement de leurs performances nécessitent de faire appel à des technologies dérivées des applications plus fortes puissances et étend d'autant le champ d'interventions possibles de l'électrotechnicien.

Une telle généralisation de l'électricité se trouve justifiée par les points suivants :

- ✓ le haut rendement offert par l'ensemble de la chaîne de conversion de l'énergie de la source primaire à l'utilisateur final (et plus particulièrement la possibilité d'ajuster le fonctionnement pour obtenir un rendement maximal dans toutes les conditions) ;
- ✓ la simplicité et la continuité offerte dans la transmission et la conversion de l'énergie électrique ;
- ✓ la faculté d'intégrer dans un même dispositif, intelligence et puissance puisqu'il n'y a pas de changement de nature entre l'information et l'action mais simplement une conversion.

Bien entendu, cette généralisation n'a pu être envisagée qu'avec les progrès constants de l'électronique de puissance depuis l'apparition du thyristor en 1957 jusqu'à celle de l'IGBT en 1983 [8].

Cependant, la mutation ne pourra être complète sans une réflexion sur les problèmes posés par la mise en réseau d'un nombre croissant de dispositifs électriques, de plus en plus complexes, et le refus simultané d'une centralisation excessive. Ainsi, qu'en est-il réellement de l'intérêt énergétique de tels

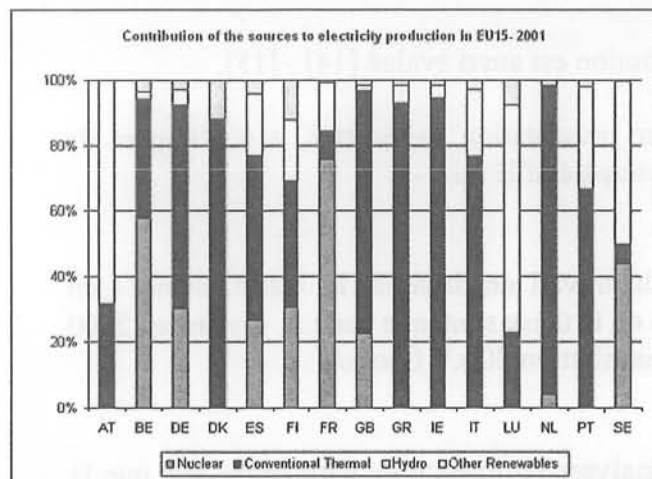
systèmes, de leur fiabilité, de leur sûreté, de leur conduite, de leur maintenance et plus généralement de leur conception ? Autant de questions auxquelles peu de réponses sont encore apportées.

## 2. UNE MUTATION PROBLEMATIQUE

### 2.1. L'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution

#### 2.1.1. Quelques éléments sur la production décentralisée

L'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution MT et BT, notamment européens, est de plus en plus importante. Cette nouvelle production est qualifiée de décentralisée par opposition à la production classiquement regroupée au niveau du réseau de transport ou de répartition. Même si la situation française n'est pas obligatoirement très typique du fait notamment d'une forte centralisation historique de la production et d'un parc de producteurs nucléaires très peu polluant au sens du Protocole de Kyoto (cf. Figure 1), l'insertion concerne aussi la France. Ainsi, l'augmentation importante du parc d'installations de cogénération, en partie raccordées sur le réseau de distribution, et celle non négligeable de la production à partir de sources d'énergie renouvelable (plus particulièrement l'éolien et le bio-gaz) sont là pour prouver le réel essor de la production décentralisée (cf. Tableau 1 et Tableau 2).



	1995	1996	1997	1998
Nombre d'installations	67	94	149	638
Puissance électrique totale (MW)	249	330	562	4407

Tableau 1 : Nombre d'installations de cogénération en France [10].

Figure 1 : contribution des sources d'énergie à la production électrique européenne en 2001 [9].

	1999		2000		2001	
	Elec.	Chal.	Elec.	Chal.	Elec.	Chal.
Hydraulique	78543	x	73432	x	80068	x
Eolien	49	x	92	x	142	x
Solaire	9	33	11	33	11	34
Géothermie	20	117	21	124	20	139
Déchets urbains	1449	629	1700	628	2000	611
Déchets de bois	1466	9298	1510	8949	1502	9013
Déchets de récolte	378	201	370	192	370	192
Biogaz (issu de décharges, boues agricoles, effluents industries agro-alimentaires)	213	62	346	63	350	63

Tableau 2 : Production combinée d'énergie en France (Electrique en GWh et Chaleur en kTEP - 1 GWh = 0.222 kTEP) [11]

## 2.1.2. Etude d'impact

### a. Pourquoi une étude d'impact ?

La conception des réseaux de distribution n'a pas été prévue pour l'accueil de production. Il est donc devenu indispensable de procéder à une évaluation des impacts que peut avoir l'insertion de producteurs décentralisés dans les réseaux de distribution. Cela se fait depuis le milieu des années 90 pour :

- ✓ Les impacts sur le niveau de tension MT de l'insertion de producteurs en MT [12] à [17] ;
- ✓ Les impacts sur le niveau de tension BT de l'insertion de producteurs en BT [18] ;
- ✓ Et dernièrement, les impacts sur le niveau de tension HTA de l'insertion de producteurs en BT [19] à [28];

Les points d'étude abordés sont récurrents :

- ✓ Le plan de tension ;
- ✓ Les niveaux de courants de court-circuit ;
- ✓ Le plan de protection ;
- ✓ La qualité de la tension où peuvent être distingués les harmoniques, les déséquilibres, les flickers, les creux de tension et les surtensions, les coupures ;
- ✓ La transmission tarifaire ;
- ✓ La stabilité des générateurs.

Récemment, l'impact sur la fiabilité des réseaux de distribution est aussi évalué [14] - [15].

La multiplicité des cas d'étude ne permettant pas leur présentation exhaustive, seul l'impact de l'insertion de producteurs BT sur le plan de tension HTA sera détaillé ici.

### b. Principe de l'étude d'impact sur le plan de tension

Les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre du travail de thèse de R. Caire (débutée en novembre 2001) dont la première partie constitue la suite de la thèse soutenue par J.F. Canard en 2000 [16]. Ils portent sur deux types de départ d'un réseau de distribution 20 kV français :

- ✓ un départ HTA urbain ;
- ✓ un départ HTA rural.

Considérer deux départs de nature différente permet d'analyser l'influence de paramètres tels que la structure du réseau (cf. Figure 2), la nature de ses conducteurs, la charge, la longueur ...

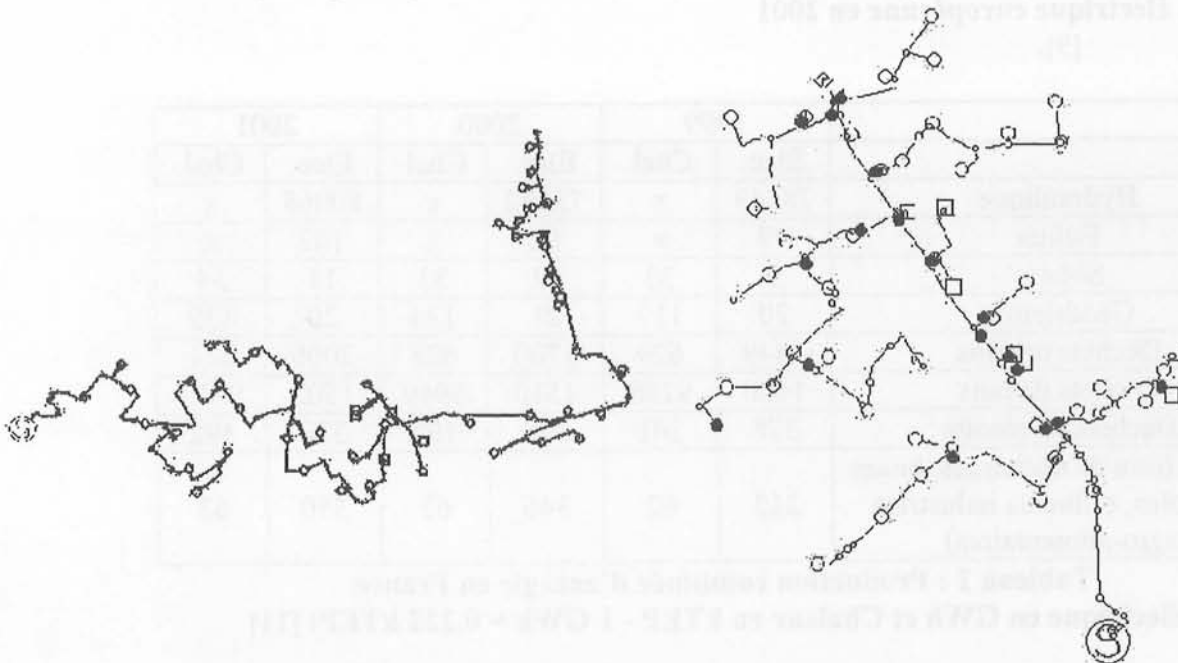


Figure 2 : Structure des départs urbain (à gauche) et rural (à droite).

Les caractéristiques de chaque départ sont données dans le tableau ci-dessous :

	Départ rural	Départ urbain
Nombre de clients BT	898	5587
Nombre de clients HTA	7	6
Puissance apparente totale du départ (kVA)	2286	4458
Puissance du transformateur de poste source	20 MVA	36 MVA
Proportion de câble souterrain (% de la longueur totale)	14.78	100
Longueur totale du départ (km)	55.2	15.65
Chute de tension maximale (%)	1.06	1.32
Courant à vide du départ (sous 20 kV)	22.78	37.2

Tableau 3 : Caractéristiques des départs urbain et rural.

Pour chaque départ, les impacts sur le plan de tension de l'insertion de producteurs (aussi nommés GED pour Générateur d'Energie Dispersé) en BT ont été évalués en regard de certains critères définis par les réglementations existantes pour les réseaux de distribution [29]. Un critère immédiat est bien entendu le respect des gabarits de tension :

- ✓ 230 V à -10% / +6% en BT ;
- ✓ tension de référence (20 kV généralement) à ±5% en HTA.

Par contre, le taux d'insertion de GED en BT n'a pas été limité aux valeurs réglementaires afin de permettre une extension des conclusions de l'étude aux cas d'insertion massive qu'il sera possible de rencontrer dans la décennie à venir. Ces limites réglementaires sont [29] :

- ✓ la puissance apparente des unités de production triphasée raccordées en BT ne doit pas être supérieure à 250 kVA (Art. 4) ;
- ✓ la puissance apparente d'une unité monophasée raccordée en BT doit être inférieure ou égale à 18 kVA (Art. 4) ;
- ✓ d'un point de vue général, « le raccordement de l'installation de production ne doit pas entraîner en situation de défaut de dépassement du courant de court-circuit au-delà de la limite pour les matériels HTA ou BT des postes et du réseau » (Art. 5).

A noter que la puissance limite d'une installation sur le réseau de distribution HTA est fixée à 12 MW.

L'analyse a ensuite été menée très simplement à l'aide de la formule simplifiée de la chute de tension le long d'un réseau radial en fonction des puissances qui y sont transitées [22].

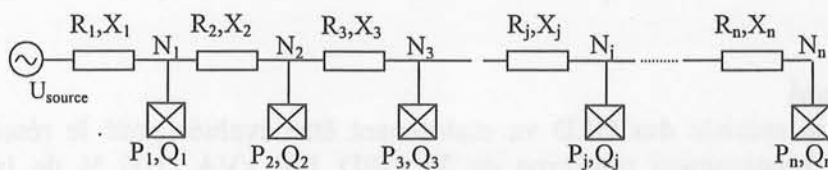


Figure 3 : définition d'un réseau radial.

( $R_i$  et  $X_i$  sont respectivement la résistance et la réactance série du tronçon  $n^o i$ ,  $P_i$  et  $Q_i$  sont respectivement les puissances active et réactive de la charge raccordée au nœud  $N_i$ ,  $U_{source}$  est la tension de la source)

Sous l'hypothèse de Kapp (courant à vide négligeable et colinéarité des tensions aux différents nœuds du réseau), la chute de tension au nœud  $N_j$  du réseau de la Figure 3 ( $j$  étant compris entre 1 et  $n$ ) est ainsi définie par :

$$\Delta U(N_j) = \frac{\sum_{k=1}^n \left( \sum_{l=1}^{\min(k,j)} R_l \right) P_k + \sum_{k=1}^n \left( \sum_{l=1}^{\min(k,j)} X_l \right) Q_k}{U_{source}} \quad (1)$$

Inversant les flux de puissance active, et dans certains cas réactive, l'insertion de production décentralisée va donc modifier le plan de tension.

#### c. Impacts sur le départ urbain

On considère une insertion massive de 19 générateurs synchrones d'une puissance unitaire de 250 kVA. La puissance apparente totale des producteurs est égale à 100% de la puissance apparente totale du départ. L'influence de la répartition spatiale des générateurs est évaluée en considérant les deux cas de la Figure 4.

Le plan de tension est ensuite tracé pour la consommation minimale du réseau (soit une puissance apparente des charges de 892 kVA). Une comparaison est effectuée avec le cas de référence sans aucune production décentralisée (cf. Figure 5).

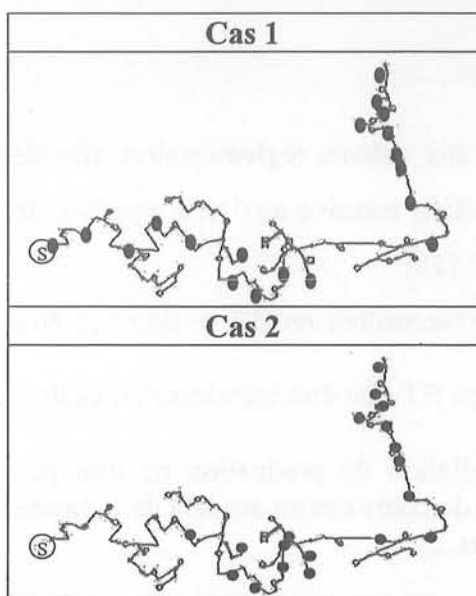


Figure 4 : répartition des générateurs.

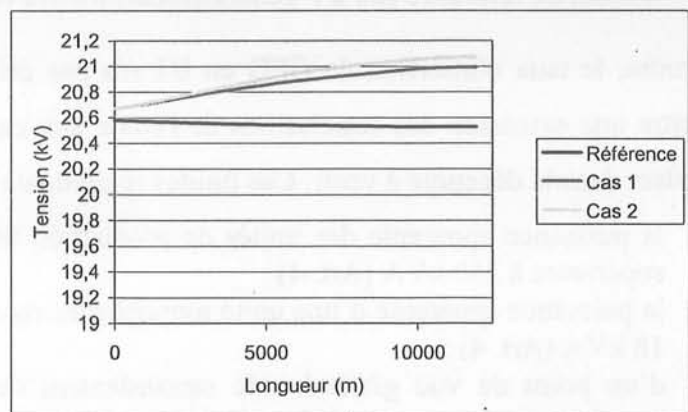


Figure 5 : plan de tension le long du départ urbain.

On vérifie d'une part l'élévation de tension avec l'insertion de production. D'autre part, l'éloignement de la production par rapport au poste source accroît son impact sur le plan de tension ce que confirme la formule de la chute de tension (1). Ainsi, alors que pour le premier cas, la tension est à la limite du dépassement de la tension haute autorisée (21 kV), le deuxième induit un dépassement dès le milieu du départ HTA.

#### d. Impacts sur le départ rural

L'influence de la répartition spatiale des GED va maintenant être évaluée pour le réseau rural en comparant une répartition relativement uniforme de 23 GED 100 kVA (100 % de la puissance maximale consommée) à une répartition par zone de production (cf. Figure 6).

Le plan de tension est tracé selon plusieurs artères dont la numérotation est donnée Figure 7.

La différence essentielle par rapport au réseau urbain tient à la plus grande arborescence. Ainsi, l'insertion concentrée de la production a tendance à relever le plan de tension de la zone où elle est concentrée. D'autre part, des artères proches voient leur plan de tension augmenter de concert. Ainsi, l'artère 4 voit son plan de tension dépasser la limite haute lors d'une insertion sur l'artère 6 (cas 3).

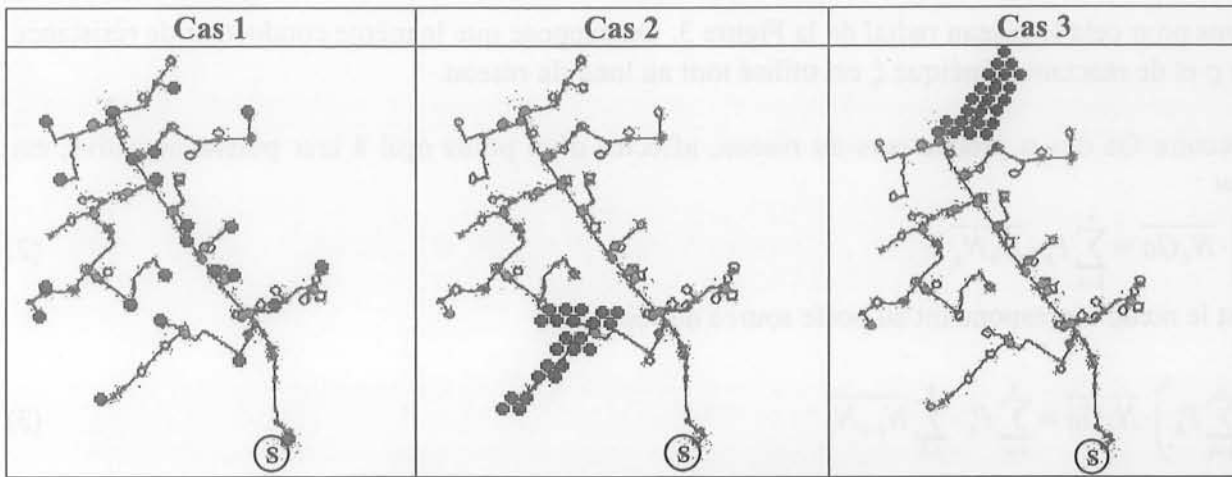


Figure 6 : répartition des générateurs.

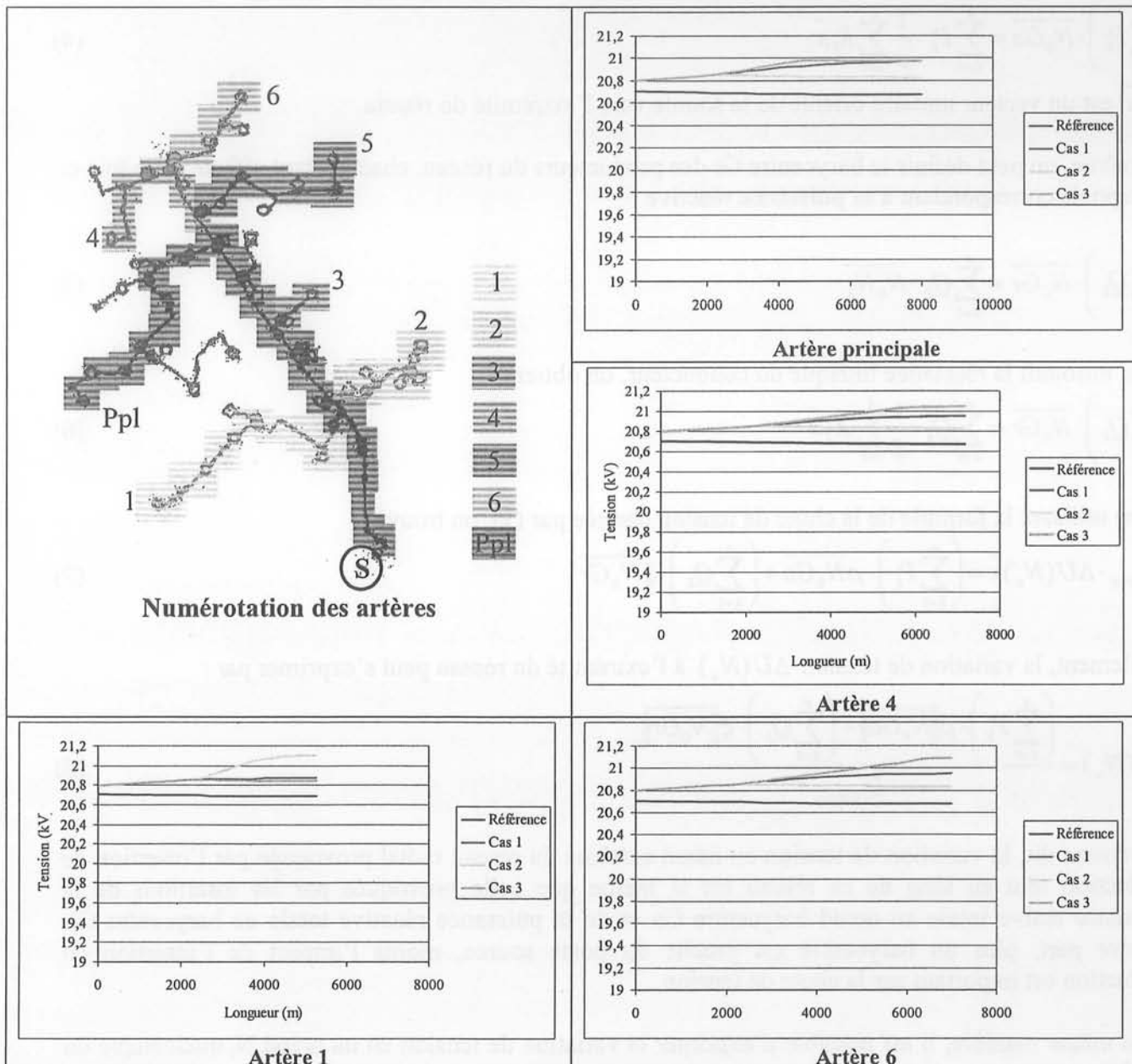


Figure 7 : plan de tension le long du départ rural.

e. Interprétation géométrique

R. Caire propose dans [22] une approche barycentrique permettant de mieux comprendre les liens croisés entre puissance transitée, localisation et plan de tension.

Reprenons pour cela le réseau radial de la Figure 3. On suppose que le même conducteur de résistance linéique  $\rho$  et de réactance linéique  $\xi$  est utilisé tout au long du réseau.

Le barycentre  $G_a$  des  $n$  producteurs du réseau, affectés d'un poids égal à leur puissance active, est défini par :

$$\left( \sum_{k=1}^n P_k \right) \cdot \overrightarrow{N_0 G_a} = \sum_{k=1}^n P_k \cdot \overrightarrow{N_0 N_k} \quad (2)$$

où  $N_0$  est le nœud correspondant au poste source du réseau.

$$\text{Soit : } \left( \sum_{k=1}^n P_k \right) \cdot \overrightarrow{N_0 G_a} = \sum_{k=1}^n P_k \cdot \sum_{l=1}^k \overrightarrow{N_{l-1} N_l} \quad (3)$$

On peut exprimer le barycentre  $G_a$  en fonction de la résistance linéique. Ainsi :

$$\left( \sum_{k=1}^n P_k \right) \cdot \overrightarrow{N_0 G_a} = \sum_{k=1}^n P_k \cdot \frac{1}{\rho} \sum_{l=1}^k R_l \vec{x} \quad (4)$$

où  $\vec{x}$  est un vecteur unitaire orienté de la source vers l'extrémité du réseau.

De même, on peut définir le barycentre  $G_r$  des producteurs du réseau, chacun étant affecté cette fois-ci d'un poids correspondant à sa puissance réactive :

$$\left( \sum_{k=1}^n Q_k \right) \cdot \overrightarrow{N_0 G_r} = \sum_{k=1}^n Q_k \cdot \overrightarrow{N_0 N_k} \quad (5)$$

Si on introduit la réactance linéique du conducteur, on obtient :

$$\left( \sum_{k=1}^n Q_k \right) \cdot \overrightarrow{N_0 G_r} = \sum_{k=1}^n Q_k \cdot \frac{1}{\xi} \sum_{l=1}^k X_l \vec{x} \quad (6)$$

Et, en utilisant la formule de la chute de tension donnée par (1), on trouve :

$$U_{source} \cdot \Delta U(N_n) \vec{x} = \left( \sum_{k=1}^n P_k \right) \cdot \rho \overrightarrow{N_0 G_a} + \left( \sum_{k=1}^n Q_k \right) \cdot \xi \overrightarrow{N_0 G_r} \quad (7)$$

Finalement, la variation de tension  $\Delta U(N_n)$  à l'extrémité du réseau peut s'exprimer par :

$$\Delta U(N_n) = \frac{\left( \sum_{k=1}^n P_k \right) \cdot \rho \|\overrightarrow{N_0 G_a}\| + \left( \sum_{k=1}^n Q_k \right) \cdot \xi \|\overrightarrow{N_0 G_r}\|}{U_{source}} \quad (8)$$

Autrement dit, la variation de tension au nœud extrême du réseau radial provoquée par l'insertion de production tout au long de ce réseau est la même que celle provoquée par les insertions de la puissance active totale au nœud barycentre  $G_a$  et de la puissance réactive totale au barycentre  $G_r$ . D'autre part, plus un barycentre est proche du poste source, moins l'impact de l'insertion de production est important sur la chute de tension.

De la même manière, il est possible d'exprimer la variation de tension en un nœud  $N_j$  quelconque du réseau par :

$$\Delta U(N_j) = \frac{\left( \sum_{k=1}^j P_k \right) \cdot \rho \|\overrightarrow{N_0 G_{ja}}\| + \left( \sum_{k=j+1}^n P_k \right) \cdot \rho \|\overrightarrow{N_0 N_j}\| + \left( \sum_{k=1}^j Q_k \right) \cdot \xi \|\overrightarrow{N_0 G_{jr}}\| + \left( \sum_{k=j+1}^n Q_k \right) \cdot \xi \|\overrightarrow{N_0 N_j}\|}{U_{source}} \quad (9)$$

où  $G_{ja}$  et  $G_{jr}$  correspondent aux barycentres des producteurs situés en amont du nœud  $N_j$ .

Cette dernière relation montre l'influence respective des puissances raccordées en amont et en aval d'un nœud sur la chute de tension en ce nœud. Ainsi :

- pour une répartition donnée de la puissance entre l'amont et l'aval de  $N_j$  : plus un barycentre est proche du poste source, moins la variation de tension en  $N_j$  est importante ;
- pour un barycentre donné : plus la puissance raccordée en aval de  $N_j$  est importante plus la variation de tension est grande.

Si cette rapide étude barycentrique est menée sur un réseau radial élémentaire, les résultats corroborent bien ceux fournis par les deux études d'impact précédentes. Finalement, l'approche barycentrique fournit un outil d'analyse géométrique simple des impacts du raccordement de producteur sur le plan de tension.

### 2.1.3. Conclusions sur l'étude d'impact

Les résultats présentés pour le plan de tension ainsi que ceux fournis par les autres études (présentés dans [19] à [28]) permettent de conclure à une absence d'impact significatif sur le réseau HTA de la production décentralisée BT pour les niveaux d'insertion tels qu'ils sont actuellement recommandés par la réglementation.

Cette conclusion, plutôt rassurante, est toutefois à nuancer par les points suivants :

- ✓ On peut raisonnablement envisager une évolution de la réglementation pour permettre un raccordement accru de petits producteurs BT ;
- ✓ Dans tous les cas, les impacts sont certains sur les réseaux de distribution BT pour des taux d'insertion de l'ordre de grandeur des taux réglementairement acceptés. C'est notamment ce qu'a montré R. Caire dans [22] et [23]. Ceci s'explique simplement par une forte diminution de la tension et une conservation de caractéristiques électriques des conducteurs entre les réseaux HTA et BT. Ainsi, à puissance transitée donnée, l'impact sur la chute de tension est bien supérieur en BT qu'en HTA ;
- ✓ J.F. Canard a relevé dans sa thèse des impacts non négligeables de l'insertion de générateurs HTA sur le plan de tension et la stabilité des réseaux de distribution HTA [16]. Et bien sûr, la combinaison d'une insertion massive de GED en BT et de producteurs décentralisés en HTA n'ira pas dans le bon sens !

C'est pour ces raisons que, même si les résultats présentés ont le caractère rassurant d'une prospective à moyen terme, il convient dès maintenant d'envisager des solutions qui permettront, dans le futur, l'intégration optimale des générateurs décentralisés dans les réseaux de distribution BT et HTA. Les pistes de solution sont variées :

- ✓ Renforcement du réseau (construction de lignes supplémentaires et/ou changement des matériels réseaux trop justement dimensionnés). Cette solution structurelle est très peu séduisante car elle a un coût économique et environnemental très élevé ;
- ✓ Adoption d'une nouvelle architecture du réseau de distribution par le rebouclage de certaines portions. Ceci reviendrait à un maillage analogue à celui du réseau de transport. Les avantages sont principalement : une moindre impédance du réseau, une meilleure continuité de service et une harmonisation des réseaux de transport et de distribution. Le coût de cette solution n'est pas évident. En effet, s'il est possible de mailler le réseau de distribution par la fermeture des boucles ouvertes qui y sont présentes actuellement, il n'est pas garanti que la construction de nouveaux ouvrages ne soit pas nécessaire. De toutes façons, cela nécessitera une re-conception complète des stratégies de conduite et de protection ;
- ✓ Mise en place de services systèmes. Par exemple, certains producteurs pourraient s'engager à participer au réglage de la tension. Une telle solution aurait l'immense avantage de ne pas nécessiter de renforcement du réseau électrique. Par contre, une réflexion est nécessaire concernant les stratégies et les moyens matériels et logiciels indispensables à cette coordination des producteurs indépendants. Elle est au cœur de la deuxième partie du travail de thèse de R. Caire [85].

Trouver la solution optimale d'un point de vue technique, économique et environnemental ne peut être le fruit d'un tâtonnement empirique mais d'une démarche systématique de re-conception des réseaux de distribution électrique. Ce point sera abordé plus longuement dans la troisième partie du mémoire.

## 2.2. Le comportement dynamique des réseaux d'alimentation

### 2.2.1. Définition d'un réseau d'alimentation

Afin de clarifier la terminologie employée dans ce mémoire, je qualifierai de réseau d'alimentation par opposition à réseau de distribution, tout réseau à très faible puissance de court-circuit qui permet localement l'alimentation d'un système autonome. Ce système peut-être une voiture, un avion, un navire, un bâtiment tertiaire ou une usine, un réseau ferroviaire ou de tramway, un réseau d'aéroport, etc. Même si ces réseaux sont dans certains cas interconnectés au réseau public, ils s'en distinguent par leur possibilité de fonctionnement isolé et par les fortes interactions qui s'y exercent. Ces réseaux d'alimentation présentent d'autre part une forte non-linéarité qui va s'accroissant avec le temps. Elle est essentiellement due à la multiplication des structures d'électronique de puissance utilisées tant pour la conversion de l'énergie que pour la réalisation d'actions spécifiques sur certaines grandeurs du réseau (cas des filtres actifs).

### 2.2.2. Les réseaux d'alimentation par le sol des tramways

Un exemple particulièrement symptomatique est celui proposé par ALSTOM pour l'alimentation des tramways par le sol. Le concept d'alimentation par le sol semble être apparu à la suite de travaux menés par la société italienne ANSALDO. Il est essentiellement motivé par le souhait de supprimer les lignes aériennes de contact des centres-villes. Un des premiers problèmes est d'assurer la sécurité des personnes en empêchant qu'elles puissent entrer en contact avec un conducteur sous tension. Pour cela, il existe actuellement trois procédés qui chacun propose une mise sous tension de secteurs conducteurs au passage du tramway [30]. La captation du courant s'effectue systématiquement à l'aide d'un contact entre un frotteur et un secteur conducteur. Le procédé STREAM d'ANSALDO propose très schématiquement une mise sous tension des secteurs conducteurs par un système d'aimants portés par la rame et qui attire le conducteur positif (feeder +) de l'alimentation vers les secteurs conducteurs. Lorsque la rame est passée, le conducteur positif retombe par gravité et rompt la mise sous tension. Ce procédé est appliqué pour le tramway de Trieste (cf. Figure 8).

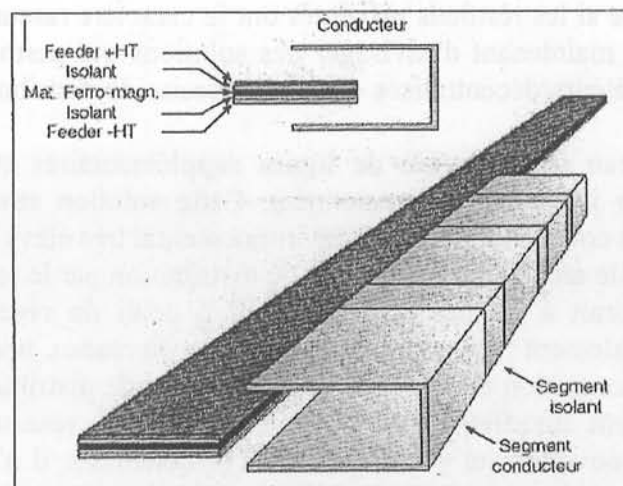


Figure 8 : schéma du procédé STREAM [30].

Pour Bordeaux, INNORAIL propose une mise sous tension à l'aide de contacteurs électromécaniques. La commande des contacteurs est déterminée par la rame grâce à l'émission d'un signal détecté et interprété au sol.

Le procédé ALISS breveté par ALSTOM en 1998 est assez proche de celui d'INNORAIL si ce n'est qu'il utilise un bras d'onduleur à IGBT pour la mise sous tension au passage du frotteur et la mise hors tension une fois la rame passée [31].

Les spécificités de ce réseau d'alimentation tiennent donc à la présence d'un très grand nombre de bras d'onduleur et à la succession de transitions du frotteur d'un bras à l'autre. Il faut pourtant toujours qu'il reste sûr (pour les matériels et les personnes) et de qualité (c'est-à-dire que son principe même n'entraîne pas une dégradation des performances de l'ensemble). Le problème est particulièrement crucial pour les IGBT car leur dimensionnement doit tenir compte des surtensions qui pourraient apparaître lors de certains régimes de fonctionnement : manœuvre, courts-circuits ... Il ne faudrait notamment pas qu'une surtension puisse se propager le long du réseau et occasionne des dégâts en série. La réponse à ces interrogations fait l'objet des travaux que mène E. Morin dans le cadre de sa thèse débutée en octobre 2001.

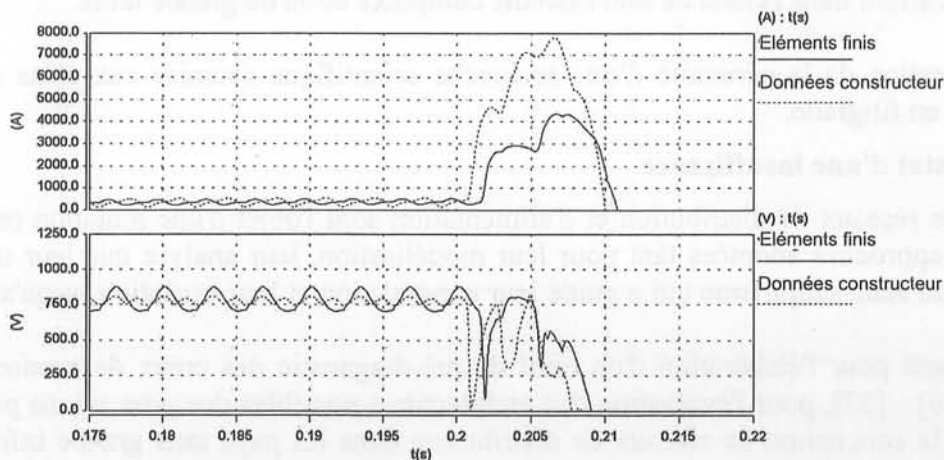
2.2.3. Modélisation du réseau d'alimentation

L'étude du comportement dynamique d'un réseau d'alimentation par le sol de tramways pose la question de sa simulation et donc de sa modélisation. Cette dernière est toutefois loin d'être aisée car elle nécessite une caractérisation :

- ✓ des conducteurs dans leur environnement proche ;
- ✓ des IGBT à l'état passant ;
- ✓ du contact frotteur-secteur.

La pose des conducteurs dans un boîtier métallique, la proximité du sol et des rails, la présence d'éléments magnétiques, la complexité de la géométrie interdit l'emploi des caractéristiques linéiques fournies par les constructeurs pour le calcul des impédances des conducteurs. Pour calculer la matrice inductance de l'ensemble et en déduire les paramètres utiles à la simulation de la transition, il faut donc avoir recours à une formulation type lignes de transmission et à sa résolution par la méthode des éléments finis [31] - [32].

La caractérisation des IGBT n'est pas aussi problématique, les travaux d'E. Clavel ayant montré que les données constructeur suffisaient [33].



**Figure 9 : courant et tension (de haut en bas) de la sous-station d'alimentation du réseau.  
 FEM : calcul des paramètres réseau par la méthode des éléments finis  
 Linear : calcul des paramètres réseau à partir des données constructeur de câbles**

Par contre, la modélisation du contact frotteur-secteur est loin d'être immédiate. Une approche est toutefois possible en s'inspirant de la formulation développée par Holm [34] - [35]. Son principe repose sur la détermination du nombre de points de contacts électriques entre deux pièces jointes. La caractérisation nécessite alors une connaissance précise des matériaux constituant les pièces tant d'un point de vue électrique (résistivité superficielle) que mécanique (dureté). Le fait remarquable auquel conduit cette approche est la forte décroissance du courant dans les dernières microsecondes du contact, le frotteur abordant un nouveau secteur. Ceci amène la question de l'éventuelle apparition

d'un arc électrique et, si la réponse s'avérait positive, de la modélisation orientée circuit de l'arc et de ses conséquences (notamment sur les tensions aux bornes des IGBT).

Cette partie du travail n'a malheureusement pas abouti. En effet, le projet ALISS ayant été abandonné par ALSTOM pour des raisons financières, les objectifs de la thèse d'E.Morin ont été redéfinis.

Malgré tout, une première modélisation du réseau est possible hors changement de secteurs. Elle conduit à une première évaluation en simulation des performances du réseau de tramways. La figure suivante présente par exemple le régime transitoire induit par un court-circuit en extrémité du réseau par rapport à la sous-station. Le résultat de simulation est comparé à celui que donne une modélisation des conducteurs, beaucoup plus simple, basée sur l'utilisation des données constructeur des câbles. L'environnement des conducteurs n'est donc absolument pas pris en compte.

On constate une nette différence entre la simulation éléments finis (pour laquelle les paramètres réseau sont calculés par la méthode des éléments finis) et celle où les paramètres sont calculés à partir des données constructeur de câbles. Elle s'explique par la prise en compte de l'environnement ferromagnétique dans l'approche éléments finis qui a tendance à augmenter les inductances. Dans le cas où les données constructeur sont utilisées, le calcul conduit donc à un surdimensionnement des matériels vis à vis des courants de court-circuit. Ceci n'est pas dramatique pour la tenue des matériels mais grève leur coût. En outre, cela conduit à une surestimation des seuils de réglage des protections du réseau et donc à leur éventuel non-déclenchement lors de défauts. Ce qui est beaucoup plus grave.

Bien sûr, une validation expérimentale des résultats aurait été nécessaire. Cela était prévu initialement sous la forme d'une expérimentation grandeur nature sur le réseau d'essai de tramways de La Rochelle. Malheureusement, l'abandon du projet d'ALISS a définitivement compromis cette phase des travaux.

En définitive, s'il est possible d'obtenir une modélisation beaucoup plus fine du réseau d'alimentation, le problème de la validation fiable et reproductible des résultats reste entier. C'est un problème particulièrement récurrent dans l'étude de tout système complexe et/ou de grande taille.

D'autre part, la question de la pérennité d'une recherche scientifique soumise aux aléas du monde industriel est posée en filigrane.

### **2.3. Constat d'une insuffisance**

Alors même que les réseaux de distribution et d'alimentation sont l'objet d'une mutation profonde et problématique, les approches adoptées tant pour leur modélisation, leur analyse que leur conception restent empreintes du semi-empirisme qui a guidé leur construction et leur évolution jusqu'aux années 80.

Pourtant que cela soit pour l'élaboration d'un outil de pré-diagnostic des creux de tension dans un réseau industriel [36] - [37], pour l'évaluation des architectures possibles des gros avions porteurs du futur [38] ou pour la conception de réseaux de distribution dans les pays sans grande infrastructure électrique [39] - [40], les démarches semi-empiriques (combinaison de relations mathématiques simples et de règles heuristiques) trouvent leurs limites [41]. Si elles sont capables de proposer une solution au cas par cas, elles ne permettent pas l'investigation exhaustive d'un problème et par là même ne sont pas aptes à l'analyse systématique et au dimensionnement optimal (en termes de coût et de performances) d'un système.

Cette insuffisance tient en grande partie à la possibilité limitée de représentation simple et valide des réseaux de distribution et d'alimentation émergents tout en tenant compte de :

- ✓ leur complexité structurelle : les réseaux d'énergie électrique sont par essence la mise en relation de composants les plus divers (moyens de stockage, de production, zones de consommation, transformateurs, convertisseurs d'électronique de puissance...);
- ✓ leur caractère multiphysique : l'électricité est très souvent un moyen de transport et de conversion d'une énergie produite sous une autre forme (thermique, hydraulique, éolienne, électrochimique ...) et utilisée encore sous une forme différente ;

- ✓ de leurs interactions internes : si pendant longtemps les réseaux ont été fortement hiérarchisés du producteur vers l'utilisateur, la décentralisation multiplie les interactions entre ensembles ou composants non hiérarchisés.

Ensuite, le problème posé par la validation des résultats reste entier quelque soit l'approche adoptée. Tant que le réseau restait simple ou bien maîtrisé par son opérateur, la validation pouvait être accomplie par des expérimentations grandeur réelle sur le système lui-même (à condition toutefois de garantir la continuité de service ce qui n'était pas sans limiter la portée des validations). Cette possibilité devient actuellement de plus en plus limitée et coûteuse du fait de la croissance de la complexité des réseaux et de la multiplication des opérateurs qui y interviennent.

Toutes les procédures de validation vont ainsi devenir de plus en plus parcellaires et nécessiter des recoupements laborieux, en espérant qu'ils s'avèrent suffisants ...

En définitive, combler ces insuffisances est une des tâches qu'il va falloir impérativement accomplir dans les années à venir pour assurer la pérennité des mutations engagées dans les réseaux d'énergie électrique.



# **VERS UNE MODELISATION EN RUPTURE**



# 1. POSITION DU PROBLEME

## 1.1. Quelques éléments de spécifications

A la lumière des problèmes soulevés dans la partie précédente, on peut dresser une liste de spécifications auxquelles devraient répondre a minima les modèles d'analyse ou de conception des réseaux :

- ✓ Précision de représentation ;
- ✓ Compacité malgré la complexité structurelle élevée ;
- ✓ Robustesse pour faire face à l'incertitude et à l'incomplétude qui pèsent très souvent sur la connaissance des paramètres de réseau.

Dans une moindre mesure, les spécifications suivantes seraient un plus très appréciable :

- ✓ Facilité d'intégration de procédés autres qu'électriques ;
- ✓ Faculté d'une représentation multi-échelle, les nombreuses interactions ayant souvent lieu à des niveaux du réseau différents (par exemple entre zones ou entre un composant et le réseau) ;
- ✓ Le modèle n'est pas qu'une simple représentation mathématique du comportement du réseau mais inclut un certain degré de connaissance (nombre et nature des sources, architecture, matériaux employés ...) ;
- ✓ Généricité, c'est-à-dire la possibilité d'utilisation quels que soient le type de réseaux et la nature de l'étude (fréquentielle, temporelle, statique ...)

Si satisfaire de front à toutes ces exigences serait l'idéal, les contingences du quotidien sont là pour rappeler l'humilité de la tâche du chercheur.

## 1.2. Premiers travaux

### 1.2.1. Commutation de modèle

Mes premiers bégaiements au sujet d'une modélisation en rupture des systèmes électriques se sont produits en fin de thèse avec notamment le DEA de J. M. Guichon [42] - [43] - [44]. L'idée était de disposer d'un modèle d'association onduleur de tension MLI - Moteur asynchrone qui soit valable pour tout régime de fonctionnement, y compris pour les régimes de court-circuit de l'onduleur.

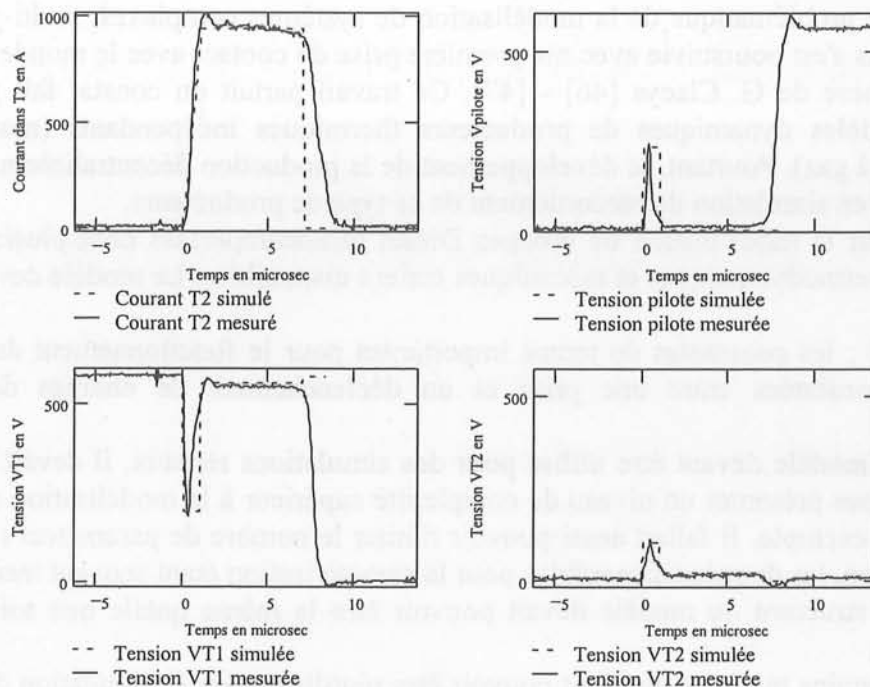


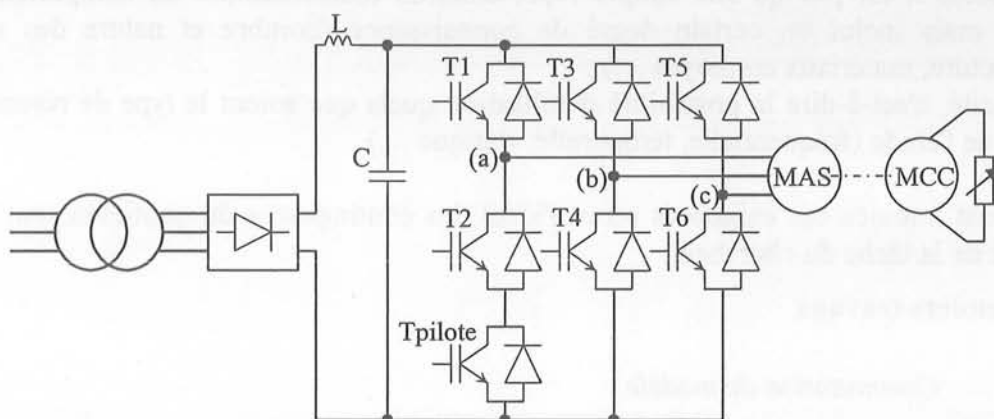
Figure 10 : formes d'onde du court-circuit d'un bras d'onduleur.

La difficulté était de concilier, dans le même modèle, des échelles de temps très éloignées (microseconde pour le court-circuit d'un bras d'onduleur, milliseconde pour la MLI de l'onduleur de tension) avec une précision et un temps de calcul qui soit acceptable pour une simulation.

Bien sûr, il était hors de question de simuler le fonctionnement en régime permanent de l'association avec le pas de temps nécessaire à une simulation du court-circuit ! L'orientation prise a alors été de commuter de modèle entre le fonctionnement sain (tous les semi-conducteurs étant représentés par des interrupteurs idéaux) et le fonctionnement en court-circuit (les semi-conducteurs défectueux étant représentés par une caractéristique  $I(V)$  associées à des inductances pour la représentation du câblage). Toute la difficulté résidait alors dans l'initialisation des nouvelles variables d'état apparaissant lors du passage d'un modèle à l'autre. Elle a pu être facilement levée par la maîtrise parfaite du code de l'outil de simulation [45].

Les résultats qui ont été finalement obtenus (Figure 10) confirmaient la validité de l'approche retenue même si leur représentativité était limitée par le niveau de modélisation retenu pour les semi-conducteurs en défaut [42].

Le schéma de câblage de la partie puissance du banc utilisé pour la réalisation des essais de court-circuit est donné ci-dessous :



**Figure 11 : schéma de câblage du banc de validation des courts-circuits de bras d'onduleur. (Tpilote est l'IGBT sur-dimensionné pour l'ouverture non destructive du court-circuit).**

### 1.2.2. Modèle multiphysique

Ma sensibilisation à la problématique de la modélisation de systèmes complexes, multi-physiques et fortement interagissants s'est poursuivie avec ma première prise de contact avec le monde des réseaux dans le cadre de la thèse de G. Claeys [46] - [47]. Ce travail partait du constat fait par EDF de l'imprécision des modèles dynamiques de producteurs thermiques indépendants (moteur Diesel, turbine à Gaz, moteur à gaz). Pourtant, le développement de la production décentralisée nécessitait un nombre accru d'études en simulation du raccordement de ce type de producteurs.

Le choix s'est porté sur la modélisation de groupes Diesel turbocompressés dont plusieurs jeux de données électriques, thermodynamiques et mécaniques étaient disponibles. Le modèle devait répondre aux critères suivants

- ✓ représentativité : les constantes de temps importantes pour le fonctionnement du réseau, les dissymétries constatées entre une prise et un déclenchement de charges devaient être respectées ;
- ✓ simplicité : ce modèle devant être utilisé pour des simulations réseaux, il devait être simple, c'est-à-dire ne pas présenter un niveau de complexité supérieur à la modélisation de Park d'un alternateur par exemple. Il fallait aussi pouvoir limiter le nombre de paramètres nécessaires à son identification, les données disponibles pour la caractérisation étant souvent incomplètes ;
- ✓ généricité : la structure du modèle devait pouvoir être la même quelle que soit le type de moteur Diesel ;
- ✓ modularité : certains modules devaient pouvoir être réutilisés pour la simulation d'une turbine ou d'un moteur à gaz (échangeur, turbine, compresseur).

Pour satisfaire ces exigences, les fonctions importantes du groupe Diesel (turbo-compresseur / moteur proprement dit incluant système d'injection, chambre de combustion, collecteurs d'admission et d'échappement / échangeur entre le turbocompresseur et le moteur / transmission) ont été modélisées séparément. Seules les dynamiques des vitesses du moteur et du turbocompresseur ont été prises en compte, les autres variables (températures, pressions, débits, couples) évoluant de manière quasi-statique. Cette hypothèse de modélisation est valide puisque les variations des vitesses sont limitées par les inerties des parties tournantes et donc bien plus lentes que celles des autres grandeurs. Par souci de simplicité et de réduction du nombre de paramètres, les processus thermodynamiques ont été représentés par les relations de principe décrites dans la littérature [48] - [49]. Seule la production de couple a été modélisée par une caractéristique tabulée à partir de relevés d'essais en charge, les modèles simples de la combustion à l'origine du couple n'existant pas. Une fois implanté sous le logiciel d'étude de réseaux EUROSTAG, le modèle a été validé par comparaison à des mesures faites sur un groupe Diesel d'une puissance de 3 MW. Les résultats sont fournis Figure 12 pour des enclenchements sur charge résistive.

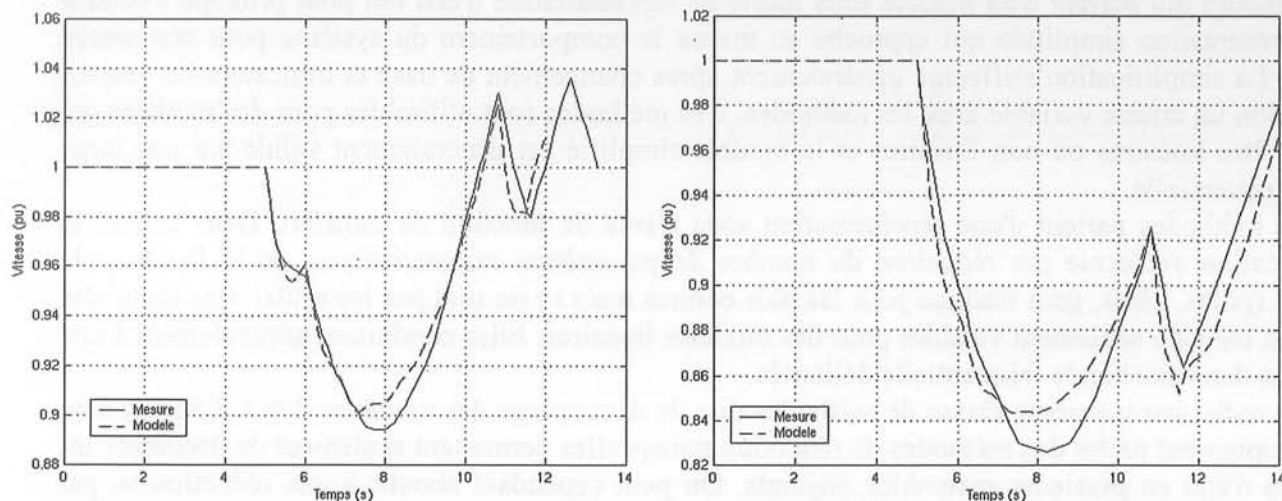


Figure 12 : variations de vitesse pour des enclenchements de charge résistive.

La dissymétrie constatée lors des enclenchements et des déclenchements de charge a ainsi pu être reproduite (cf. Figure 13). Elle s'est expliquée simplement par le fonctionnement du turbocompresseur, fortement sollicité à la prise de charge afin d'amener un excès d'air pour faciliter la combustion mais n'intervenant pas lors de déclenchement puisque l'excès d'air est toujours suffisant [46]. Cette dissymétrie n'avait pu être reproduite par les modèles utilisés auparavant par EDF.

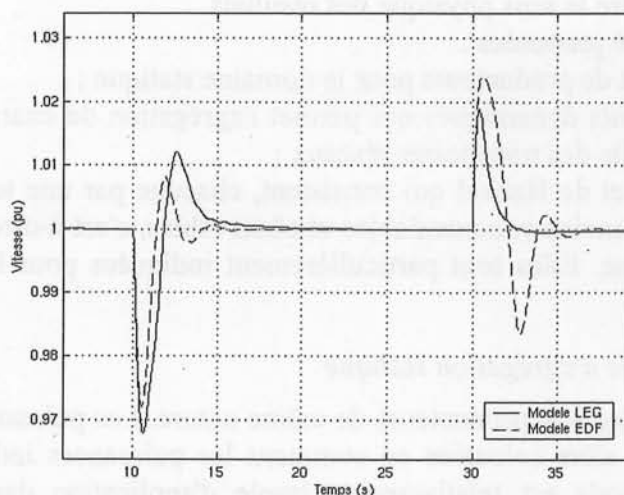


Figure 13 : variation de vitesse simulée pour un enclenchement de 1 MW à 10 s et un déclenchement de même valeur à 25 s.

Mais en définitive, c'est la poursuite de ma réflexion sur la modélisation des machines électriques, nouée pendant ma thèse, qui m'a permis d'ébaucher une proposition de modélisation des réseaux électriques en rupture avec les approches classiques.

## 2. MODELISATION SIMPLIFIEE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

### 2.1. Les différentes approches de simplification de modèle [50]

Il existe deux grandes familles de simplification de modèle : les simplifications structurelles qui consistent à modifier sa structure même (c'est le cas par exemple de la linéarisation d'un modèle non-linéaire) et les réductions qui ont pour principe la diminution de l'ordre d'un modèle sans modification structurelle.

La classification faite dans [50] permet de se faire une idée précise des différentes classes de méthode de réduction d'ordre.

Les méthodes qui partent d'un modèle sous forme de représentation d'état ont pour principe d'obtenir une représentation simplifiée qui approche au mieux le comportement du système pour une entrée donnée. La simplification s'effectue généralement après changement de base et troncature du vecteur d'état selon un critère variable avec les méthodes. Ces méthodes sont utilisables pour des modèles qui peuvent être linéaires ou non linéaires et le modèle simplifié est généralement valide sur une large bande fréquentielle.

D'autres méthodes partent d'une représentation sous forme de fonction de transfert. Dans ce cas, la simplification s'effectue par réduction du nombre de paramètres caractéristiques de la fonction de transfert (pôles, zéros, gain statique pour les plus connus mais ce ne sont pas les seuls). Ces méthodes sont bien entendu seulement valables pour des modèles linéaires. Elles conduisent généralement à une réduction dans une bande fréquentielle délimitée.

Il existe enfin une troisième classe de méthodes dite de découplage des variables d'état. Elles ne sont pas à proprement parler des méthodes de réduction puisqu'elles permettent seulement de découpler les variables d'état en plusieurs ensembles disjoints. On peut cependant aboutir à une réduction si, par exemple, seul l'ensemble correspondant aux modes dominants est conservé dans la représentation d'état. La difficulté essentielle de ces méthodes consiste à déterminer les frontières entre variables découplables.

### 2.2. Un exemple de réduction d'ordre

Dans le contexte général d'étude d'impact de l'insertion de producteurs décentralisés, M. Fontela a décrit et appliqué dans son DEA une méthodologie de réduction d'ordre des modèles de réseaux BT en présence de GED [51] - [52]. Son objectif était de permettre la simplification des simulations de réseaux de distribution sans perdre le sens physique des résultats.

Trois classes de méthodes ont été proposées :

- ✓ l'agrégation de charges et de producteurs pour le domaine statique ;
- ✓ la méthode des équivalents dynamiques qui permet l'agrégation de charges et de producteurs en vu de l'étude temporelle des transitoires réseaux ;
- ✓ les méthodes de Moore et de Hankel qui consistent, chacune par une technique différente, à supprimer les modes les moins commandables et observables, c'est-à-dire ceux ayant le moins d'influence sur le système. Elles sont particulièrement indiquées pour les études de stabilité petits signaux.

#### 2.2.1. La méthode d'agrégation statique

Elle consiste à regrouper les charges et producteurs de même nature. Les puissances active et réactive consommées par l'agrégat sont alors calculées en sommant les puissances individuelles de chaque élément agrégé. Si cette méthode est relativement simple d'application dans le cas d'éléments connectés en parallèle, elle pose problème lorsqu'il faut tenir compte des éléments série (essentiellement les impédances série des conducteurs ou des transformateurs). Des termes correctifs sont alors introduits qui permettent de ramener un élément série à une charge parallèle [51].

La méthode d'agrégation est appliquée au réseau BT de la Figure 14. Il est constitué de trois charges passives C1, C2, C3, d'un moteur asynchrone 37 kW (MAS) et d'un alternateur 40 kVA (GED). Les conducteurs L1, L2, L3 et L4 sont des câbles, le réseau BT étant du type urbain.

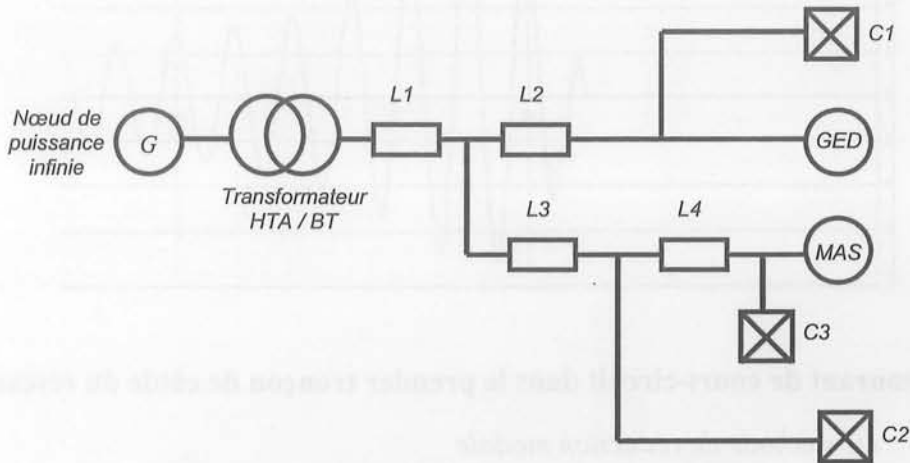


Figure 14 : réseau BT en présence de GED.

Le tableau suivant présente les puissances consommées au primaire du transformateur de distribution. Deux méthodes de calcul sont comparées : la simulation temporelle du réseau détaillé à l'aide d'Arène (simulateur temps réel de réseaux électriques développés par EDF et utilisable bien entendu pour la simulation en temps différé) et la méthode d'agrégation. D'autre part, la robustesse de cette dernière vis à vis des variations de tension HTA est vérifiée.

Les différences s'expliquent principalement par les corrections effectuées pour tenir compte des termes série du transformateur. Ainsi, l'agrégation au secondaire du transformateur (avant les corrections) donne des erreurs inférieures à 2%.

Tension HTA (kV)	Modèle complet		Modèle agrégé		Erreurs relatives	
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (%)	Q (%)
19	33.47	19.81	33.18	20.97	0.87	5.8
20	33.46	21.54	33.04	22.56	1.88	4.73
21	33.52	23.39	32.96	24.42	2.3	4.43

Tableau 4 : résultats de la méthode d'agrégation

2.2.2. La méthode des équivalents dynamiques

La méthode d'agrégation statique peut être étendue pour prendre en compte les transitoires temporels. On parle alors de méthode des équivalents dynamiques, c'est-à-dire de représentation agrégée des caractéristiques dynamiques du réseau considéré.

D'un point de vue général, le modèle agrégé d'un ensemble d'éléments de même nature est construit en définissant un élément agrégé dont les paramètres  $p_{eq}$  (réactances, constantes d'inertie, constantes de temps ...) sont définis par la relation :

$$P_{eq} = \frac{1}{K_{eq}} \sum_i K_i * P_i \tag{10}$$

c'est-à-dire par une moyenne pondérée des paramètres  $p_i$  de chaque élément  $i$ . Les pondérations  $K_i$  dépendent des paramètres considérés. Ainsi, dans le cas le plus connu d'agrégation d'alternateurs, les pondérations relatives aux grandeurs électriques sont les puissances apparentes de chaque générateur.

La méthode est appliquée au réseau BT de la Figure 14. Toutefois, le moteur asynchrone a été remplacé par un générateur 100 kVA. La comparaison entre les modèles complet et réduit est effectuée dans le cas d'un court-circuit au secondaire du transformateur. La Figure 15 donne l'allure du courant dans le premier tronçon de câble L1 pour les deux modèles. Les différences sont très peu marquées.

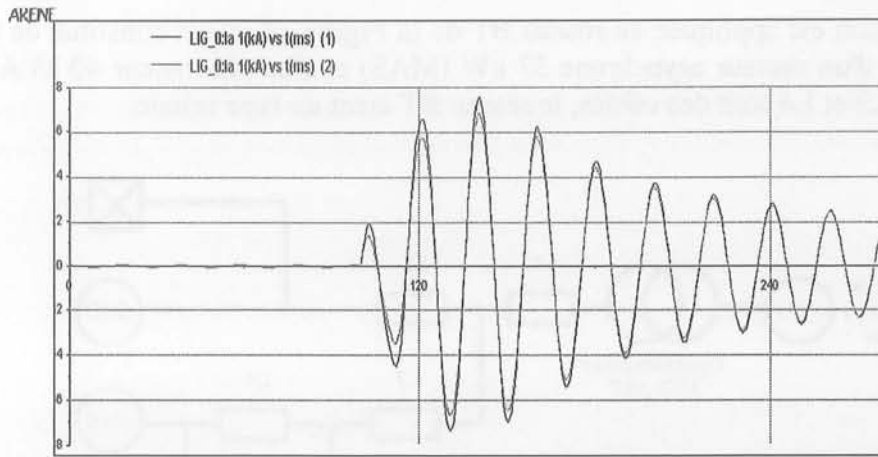


Figure 15 : courant de court-circuit dans le premier tronçon de câble du réseau BT.

### 2.2.3. La méthode de réduction modale

Les méthodes de réduction modale de Hankel et Moore sont appliquées au même cas que précédemment. Le modèle complet est d'ordre 12. Les modèles réduits sont d'ordre 9, quelque soit la méthode utilisée. Graphiquement, cela correspond à une modification des lieux des pôles du système. On voit ainsi nettement sur la Figure 16 que deux modes ont été supprimés, correspondant aux pôles de partie réelle proche de -120. Le troisième mode supprimé est difficilement visible. En effet, il correspond à un pôle de partie réelle proche de 0, quasi confondu avec le pôle restant.

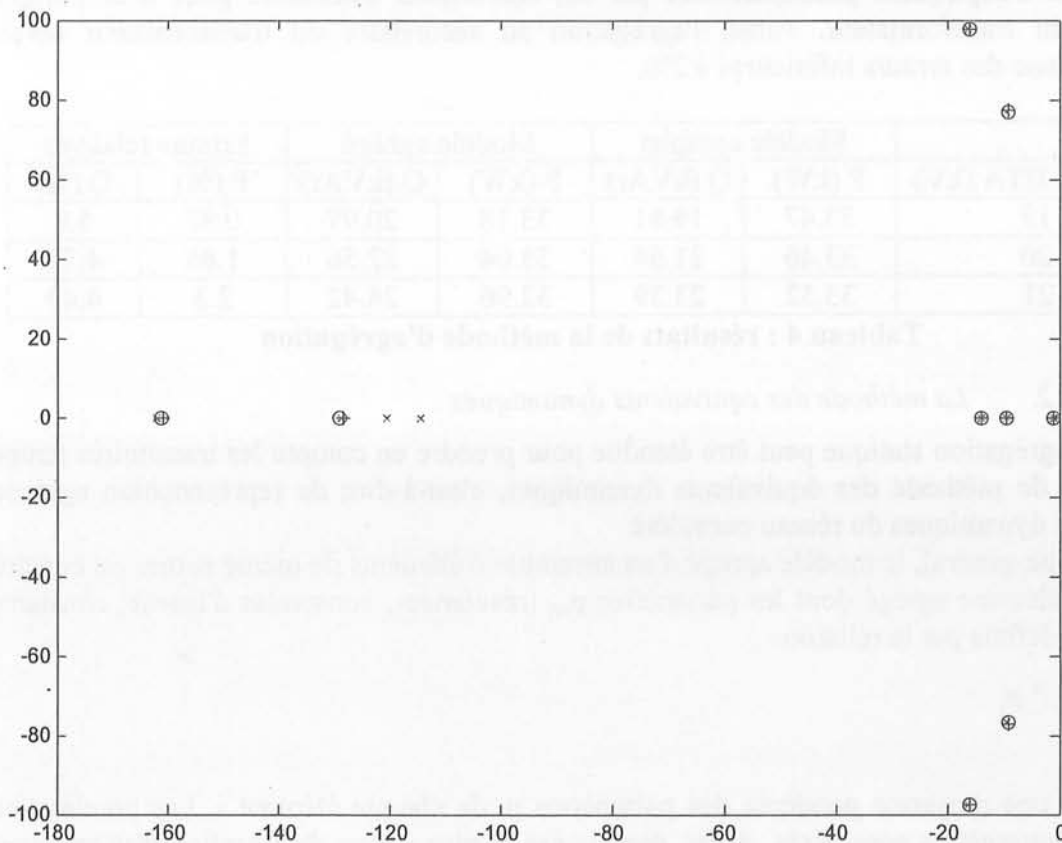


Figure 16 : lieux des pôles du réseau BT  
 (Axe des abscisses donne la partie réelle, l'axe des ordonnées donne la partie imaginaire)  
 x : modèle complet      + : modèle de Moore      o : modèle d'Hankel.

Les valeurs numériques des pôles pour les trois modèles sont données dans le Tableau 5.

Modèle complet	Modèle d'Hankel	Modèle de Moore
-16.507 + 97.582i	-16.305e + 97.503i	-16.217 + 97.673i
-9.4004 + 76.988i	-93.714 + 7.7006i	93.736 + 77.028i
-1.0239	-1.0854	-1.1428
-0.86695		
-9.4607	-9.4692	-9.4746
-14.137	-14.166	-14.207
-9.4004 - 76.988i	-9.3714 - 77.006i	-9.3736 - 77.028i
-16.507 - 97.582i	-16.305 - 97.503i	-16.217 - 97.673i
-114.56		
-120.59		
-128.64	-128.94	-128.40
-161.94	-161.23	-160.75

Tableau 5 : valeurs numériques des pôles.

Bien entendu, on peut aussi donner une illustration fréquentielle de la réduction modale. On considère par exemple la réponse du transfert entre la tension d'excitation et le courant statorique d'axe d (dans un référentiel de Park) de l'alternateur 100 kVA (cf. Figure 16). La réduction se traduit par une très faible différence en hautes fréquences entre les trois modèles. Elle est due en grande partie à la suppression des deux pôles réels.

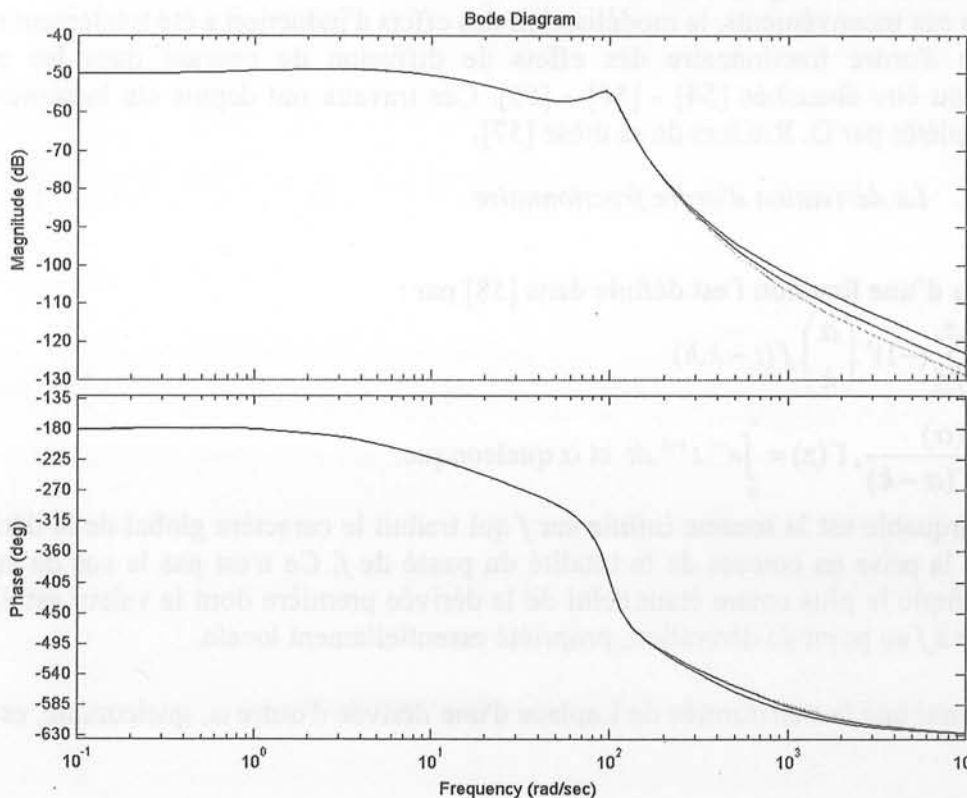


Figure 17 : réponse fréquentielle du système.

modèle complet                      modèle de Moore                      modèle d'Hankel.

2.2.4. Conclusion

Finalement, les méthodes de réductions d'ordre satisfont aux critères suivants :

- ✓ Précision ;
- ✓ Diminution de la taille du modèle ;

- ✓ Faculté de représentation multiphysique et multi-échelle.

C'est certainement pour cela qu'elles sont déjà largement utilisées pour la simplification de modèles de réseaux.

Toutefois, leur compacité est relative et s'accompagne d'une perte de précision sur certaines gammes de fréquences. D'autre part, leur généricité (notamment pour la prise en compte des convertisseurs d'électronique de puissance) et leur robustesse restent à démontrer. Enfin, le sens physique du modèle complet peut-être perdu lors des transformations mathématiques successives.

Ces limites ne pourront être levées sans un effort de recherche supplémentaire sur les méthodes de réduction d'ordre. A moins qu'on ne préfère privilégier la simplification structurelle des modèles, tâche ardue et certainement bien moins avancée.

### 2.3. L'ordre fractionnaire comme outil de simplification structurelle

#### 2.3.1. Pourquoi l'ordre fractionnaire ?

La problématique de l'ordre fractionnaire comme outil de modélisation est apparu lors de ma thèse à propos de la modélisation des machines électriques. Classiquement, la prise en compte de l'effet de peau dans ces machines nécessite l'augmentation de l'ordre de son schéma équivalent électrique [53]. Cette approche pose deux problèmes. D'une part, l'ordre élevé du modèle ne facilite pas l'étude d'un système multi-machines, par exemple un réseau. D'autre part, le modèle augmenté perd sa pertinence physique, certains de ses paramètres n'ayant qu'un sens mathématique, c'est-à-dire ne servent qu'à augmenter la précision des résultats indépendamment de la réalité physique. On peut ainsi trouver des résistances ou des inductances négatives.

Pour s'affranchir de ces inconvénients, la modélisation des effets d'induction a été totalement revisitée. Une représentation d'ordre fractionnaire des effets de diffusion de courant dans les machines électriques a ainsi pu être ébauchée [54] - [56] - [55]. Ces travaux ont depuis été largement repris, approfondis et complétés par D. Riu lors de sa thèse [57].

#### 2.3.2. La dérivation d'ordre fractionnaire

##### a. Définitions

La dérivée d'ordre  $\alpha$  d'une fonction  $f$  est définie dans [58] par :

$$D^{(\alpha)} f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \binom{\alpha}{k} \cdot f(t - k \cdot h) \quad (11)$$

avec :  $\binom{\alpha}{k} = \frac{\Gamma(\alpha)}{\Gamma(k) \cdot \Gamma(\alpha - k)}$ ,  $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{z-1} \cdot dt$  et  $\alpha$  quelconque.

Une propriété remarquable est la somme infinie sur  $f$  qui traduit le caractère global de la dérivée non entière, c'est-à-dire la prise en compte de la totalité du passé de  $f$ . Ce n'est pas le cas de la dérivée d'ordre entier, l'exemple le plus connu étant celui de la dérivée première dont la valeur est égale à la pente de la tangente à  $f$  au point de dérivation, propriété essentiellement locale.

Podlubny montre aussi que la transformée de Laplace d'une dérivée d'ordre  $\alpha$ , quelconque, est donnée par :

$$L\{D^{(\alpha)}[f(t)]\} = s^\alpha \cdot L\{f(t)\} - \sum_{k=0}^{n-1} s^k D^{(\alpha-k-1)}[f(t)]_{t=0} \quad (12)$$

où  $n$  est un entier tel que  $n - 1 \leq \alpha < n$  et  $s$  est l'opérateur de Laplace.

Ceci est la généralisation à un ordre quelconque de la transformée de Laplace d'une dérivation d'ordre entier.

### b. Un exemple

Afin d'illustrer les propriétés remarquables de la dérivation non entière, on définit un système par l'équation différentielle suivante :

$$\tau^{1/2} \cdot D^{(1/2)} [F(t) \cdot \exp(t/\tau)] = E(t) \cdot \exp(t/\tau) \quad (13)$$

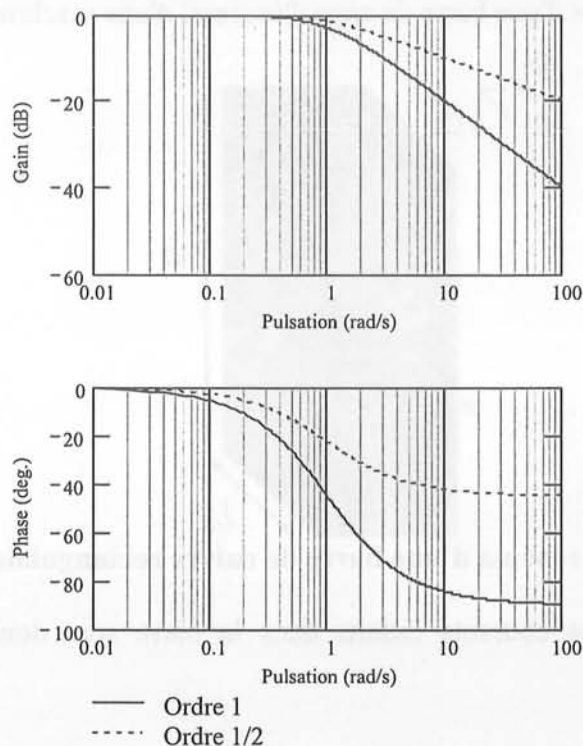
$E$  est l'entrée du système et  $F$  sa sortie. Le système est d'ordre  $1/2$  comme l'indique l'ordre de la dérivation.

La fonction de transfert  $T$  entre l'entrée et la sortie du système s'écrit alors :

$$T(s) = \frac{1}{(1 + \tau \cdot s)^{1/2}} \quad (14)$$

Le diagramme de Bode associé à ce système est montré sur la Figure 18. Il est comparé au diagramme d'un système d'ordre 1 de même constante de temps  $\tau$ . ( $= 1$  s)

On note la pente à  $-10\text{dB/décade}$  et le blocage de phase à  $-45^\circ$ . C'est la généralisation à un ordre quelconque des propriétés fréquentielles d'un système d'ordre  $n$  (pente à  $-n \cdot 20\text{dB/décade}$  et blocage de phase à  $-n \cdot 90^\circ$ ).



**Figure 18 : diagrammes de Bode ( $\tau = 1$  s).**

Il est aussi possible de calculer la réponse indicielle du système d'ordre  $1/2$  par différentes méthodes analytiques ou numériques exposées dans [57]. Elle est donnée Figure 19.

La comparaison avec la réponse indicielle d'un système d'ordre 1 permet de souligner une nouvelle fois le caractère remarquable des systèmes d'ordre fractionnaire. On remarque ainsi nettement la montée rapide de la sortie du système (traduction d'une dynamique élevée) dans les premiers instants puis la convergence lente vers la valeur finale. Autrement dit, bien que d'une écriture compacte, le système présente un large spectre.

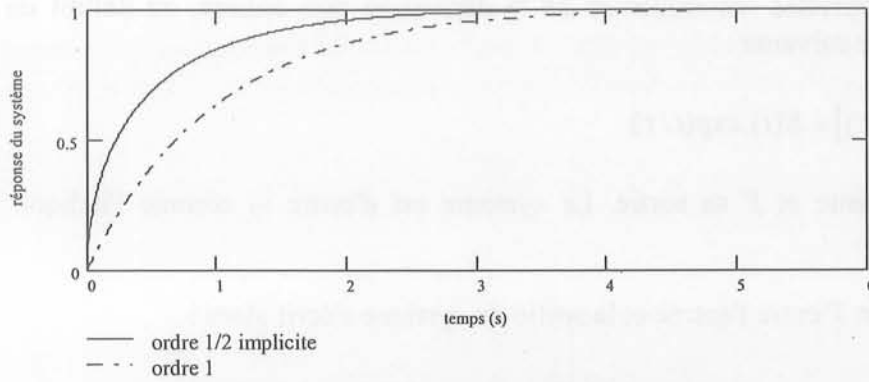


Figure 19 : réponses temporelles ( $\tau = 1$  s).

### 2.3.3. La modélisation d'ordre fractionnaire des machines électriques

#### a. Modélisation de l'induction électromagnétique [54] - [56] - [57]

La Figure 20 montre une barre de cuivre de hauteur  $h$ , de largeur  $e$ , de longueur  $L_b$  très supérieure aux autres dimensions. Elle est logée dans une encoche de mêmes dimensions découpée dans un matériau ferromagnétique de perméabilité infinie et non conducteur qui n'est pas représenté ici. Une telle disposition correspond au cas d'une barre de cage d'écureuil d'une machine à induction.

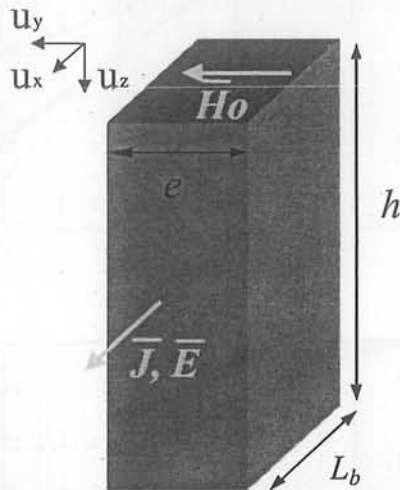


Figure 20 : schéma d'une barre de cuivre rectangulaire.

Les évolutions du champ et des courants induits dans la barre sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \bar{H}(z,t)}{\partial z^2} - \sigma\mu \frac{\partial \bar{H}(z,t)}{\partial t} = 0 \\ \bar{H}(z,0) = 0 \\ \bar{H}(h,t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

On trouve dans l'ordre : l'équation dite de la diffusion, la condition initiale et la condition aux limites.

Alger montre comment il est possible d'obtenir à partir de ces équations l'expression de l'impédance de la barre sous la forme [59] :

$$\bar{Z}_{th} = \frac{L_b}{\sigma \cdot e \cdot h} \cdot \frac{\bar{\alpha}}{th(\bar{\alpha})} = R_0 \cdot \frac{\bar{\alpha}}{th(\bar{\alpha})} \quad (16)$$

où  $\bar{\alpha}^2 = j\omega\sigma\mu h^2$  et  $R_0 = \frac{L_b}{\sigma h e}$  est la résistance en courant continu de la barre.

La modélisation d'une machine électrique ne peut se suffire d'une telle expression. Elle n'est en effet pas transposable immédiatement sous la forme d'un circuit électrique du fait de la cotangente hyperbolique. La difficulté est généralement contournée par un développement en série ou en fraction continue de la tangente hyperbolique. Le développement est tronqué à l'ordre nécessaire pour obtenir la précision désirée et les termes restants sont identifiés à des cellules RL [57].

A la place, D. Riu propose un développement limité d'ordre 2 de la cotangente hyperbolique et montre comment dans ces conditions, l'impédance peut être approchée par :

$$\bar{Z} = R_0 \sqrt{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad \text{où } R_0 = \frac{L_b}{\sigma h e} \quad \text{et } \omega_0 = \frac{1}{\sigma \mu h^2} \quad (17)$$

Ceci est l'expression complexe d'une impédance d'ordre  $\frac{1}{2}$ .

La comparaison des diagrammes de Bode du modèle analytique obtenu par Alger et du modèle approché d'ordre  $\frac{1}{2}$  figure ci-dessous :

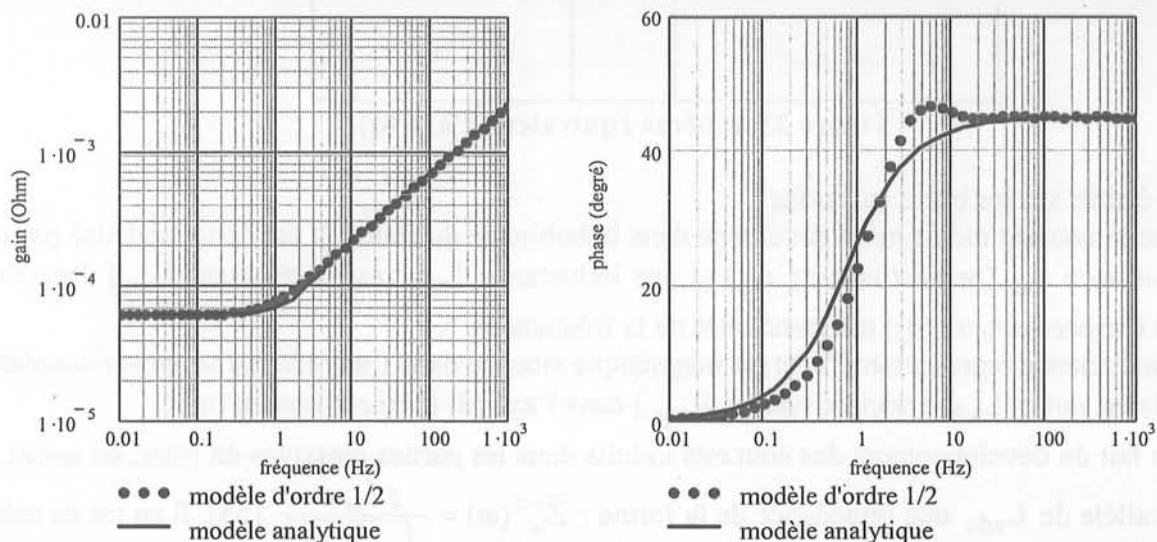


Figure 21 : comparaison des diagrammes de Bode ( $L_b = 1 \text{ m}$  -  $e = 5.3 \text{ mm}$  et  $h = 53 \text{ mm}$ ).

L'erreur entre les deux approches est très faible sur 5 décades. Avec une approche classique d'ordre entier, il aurait fallu de 4 à 6 cellules RL pour obtenir la même précision soit de 3 à 4 fois plus de paramètres que pour l'approche d'ordre  $\frac{1}{2}$ . Ce résultat remarquable est bien entendu le résultat des propriétés de compacité inhérentes à l'approche fractionnaire. D'autre part, le modèle d'ordre  $\frac{1}{2}$  conserve un sens physique fort. Ainsi,  $R_0$  est la résistance en courant continu de la barre tandis que  $\omega_0$  est la pulsation à partir de laquelle apparaît l'effet de peau.

Ce résultat est d'autant plus intéressant que le DEA d'A. Nouredine a pu montrer que l'impédance d'une pièce massive ferromagnétique (à l'instar d'un rotor massif de machines électriques) pouvait aussi être représentée par une impédance d'ordre  $\frac{1}{2}$  [55].

Il ne restait plus qu'à franchir le pas vers la proposition d'un modèle fractionnaire des machines électriques.

#### b. La modélisation des alternateurs

Si j'avais déjà pu utiliser dès 98 des impédances d'ordre  $\frac{1}{2}$  pour la modélisation de l'effet de peau dans une machine asynchrone [54], les modèles d'alternateurs proposés par D. Riu dans sa thèse montrent tout l'intérêt de l'approche fractionnaire [57] - [60] - [61]. Ils se présentent sous la forme d'un schéma équivalent d'ordre fractionnaire par axe du référentiel de Park (cf. Figure 22 et Figure 23).

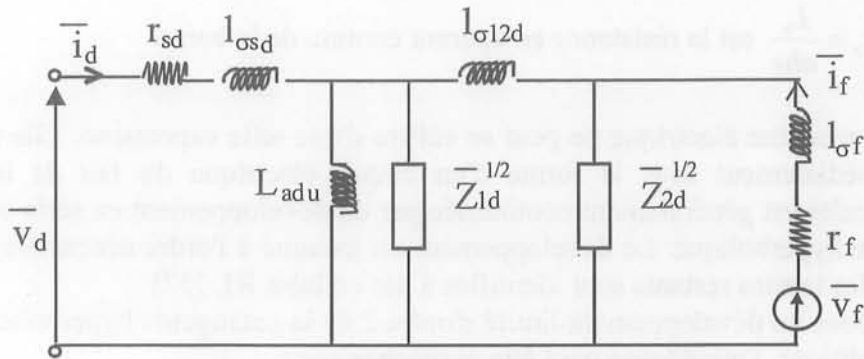


Figure 22. schéma équivalent d'axe (d)

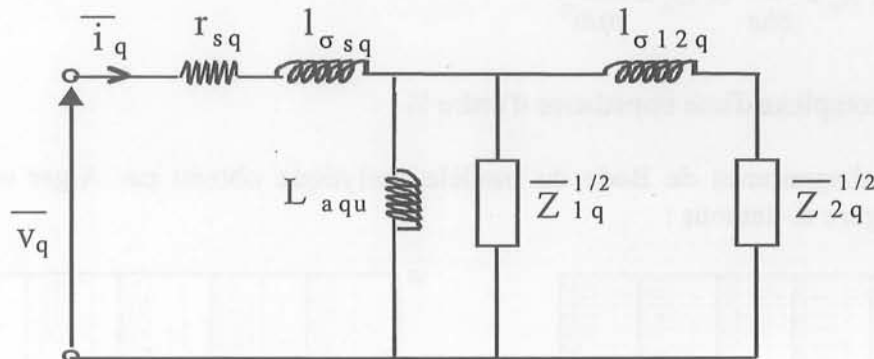


Figure 23. schéma équivalent d'axe (q)

Ils ont été établis sur les bases suivantes :

- ✓ Aucun courant induit ne se développe dans le bobinage du stator. Il est donc modélisé par une résistance  $r_{sd}$  (respectivement  $r_{sq}$ ) et une inductance  $l_{\sigma sd}$  (respectivement  $l_{\sigma sq}$ ) dans l'axe (d) (respectivement (q)) indépendantes de la fréquence ;
- ✓ L'inductance représentant l'énergie magnétique stockée dans l'entrefer est supposée constante. Elle est notée  $L_{adu}$  (respectivement  $L_{aqu}$ ) dans l'axe (d) (respectivement (q)) ;
- ✓ Du fait du développement des courants induits dans les parties massives du rotor, on ajoute en parallèle de  $L_{adu}$  une impédance de la forme :  $\bar{Z}_{1d}^{1/2}(\omega) = \frac{j.L_{1d}.\omega}{\sqrt{1+j.\frac{\omega}{\omega_{1d}}}}$  [55]. Il en est de même

dans l'axe (q) ;

- ✓ Les courants induits sont négligés dans les enroulements d'excitation. Ils sont donc modélisés par une résistance  $r_f$  et une inductance  $l_{\sigma f}$ , indépendantes de la fréquence ;
- ✓ Au champ mutuel de fuite qui lie les enroulements statoriques aux enroulements de l'amortisseur de l'axe (d) (respectivement (q)) est associée une inductance  $l_{\sigma 12d}$  (respectivement  $l_{\sigma 12q}$ ). On suppose que les courants induits n'influencent pas ce couplage ;
- ✓ Enfin, les amortisseurs dans les axes (d) et (q) sont modélisés par des impédances d'ordre  $\frac{1}{2}$  du type :  $\bar{Z}_{2d}^{1/2}(\omega) = R_{2d} \cdot \sqrt{1+j.\frac{\omega}{\omega_{2d}}}$  et  $\bar{Z}_{2q}^{1/2}(\omega) = R_{2q} \cdot \sqrt{1+j.\frac{\omega}{\omega_{2q}}}$ .

*Remarque : les schémas équivalents sont donnés pour un turbo-alternateur à l'arrêt. La mise en rotation se traduirait par la présence de forces contre-électromotrices au stator. Elles n'ont pas été présentées ici par souci de clarté.*

La comparaison des réponses fréquentielles à l'arrêt données par les mesures et les schémas équivalents fractionnaire est présentée Figure 24 pour un turboalternateur d'une puissance de 1101 MVA [62] - [63]. La conclusion est immédiate : l'approche fractionnaire est tout à fait adaptée à une

représentation des réponses fréquentielles sur la gamme recommandée par la norme [64]. Mais surtout, à précision équivalente, le modèle fractionnaire a deux fois moins de paramètres qu'un modèle classique d'ordre entier. On retrouve une nouvelle fois les propriétés de compacité de l'ordre fractionnaire. Enfin, les valeurs des paramètres du modèle sont conformes aux dimensions caractéristiques de l'alternateur. Afin de conforter les résultats obtenus, la même approche a été appliquée à d'autres types d'alternateurs [60].

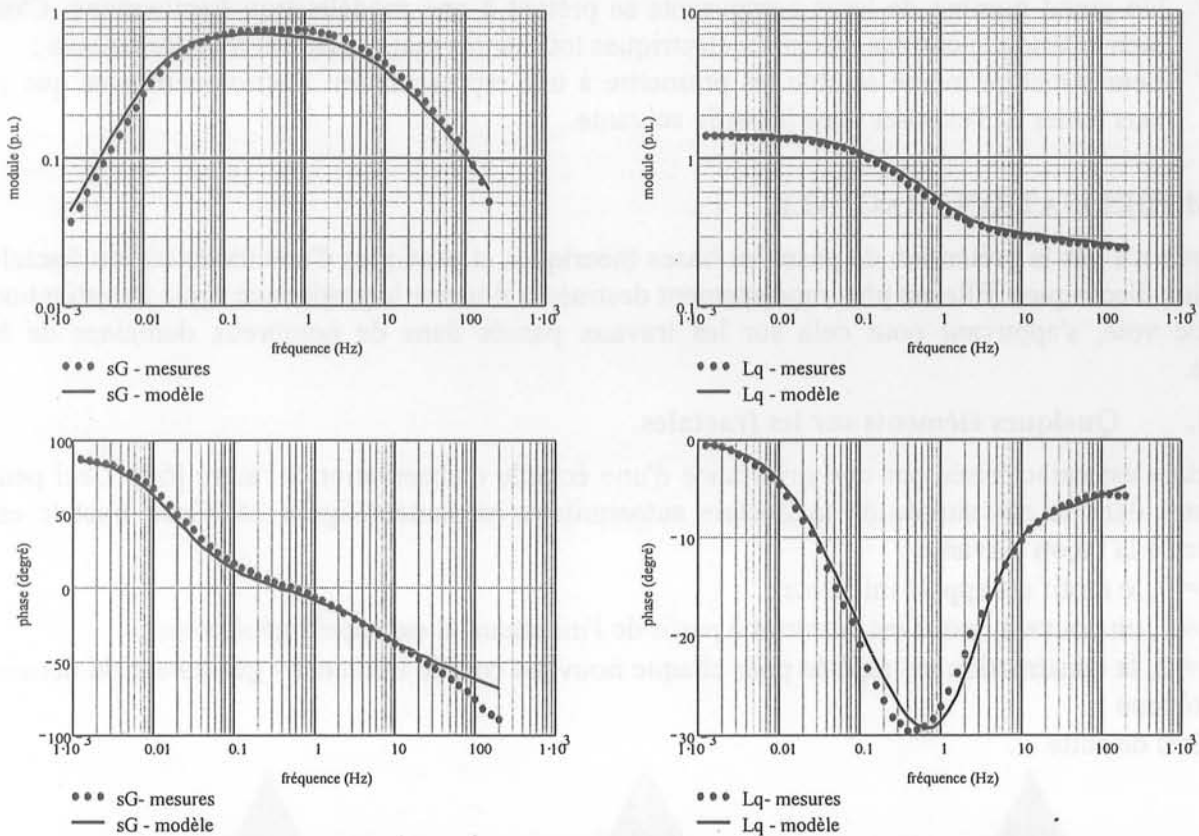


Figure 24. Modélisation de l'alternateur de 1101 MVA [57].

#### 2.3.4. Limites actuelles et perspectives

L'approche fractionnaire semble particulièrement adaptée à la modélisation simplifiée des machines électriques tournantes. En effet, elles répondent favorablement aux critères suivants :

- ✓ Précision ;
- ✓ Compacité ;
- ✓ Sens physique ;
- ✓ Faculté de représentation multiphysique et multi-échelle.

Pourtant certaines limites sont apparues en cours d'étude qui n'ont pas pu encore être levées :

- ✓ Si le lien étroit entre la physique et la modélisation fractionnaire a été souligné par une étude de l'influence de la température sur les paramètres du modèle fractionnaire d'une machine à induction à cage, il n'a pas été possible d'intégrer la saturation. Ceci limite la genericité de l'approche aux études de phénomènes linéaires. Cette difficulté rejoint le problème général de la résolution des équations aux dérivées partielles non-linéaires. D. Riu a tout de même esquissé une approche dans l'hypothèse du premier harmonique qui mériterait d'être approfondie ;
- ✓ La compacité dans le domaine fréquentiel de l'approche fractionnaire a son revers dans le domaine temporel. Toute résolution temporelle d'un système d'ordre fractionnaire conduit en effet à une multiplication importante du nombre de paramètres [65]. Il existe pourtant des moyens de lever cette difficulté. Leur application au calcul des réponses temporelles des machines électriques tournantes sera un passage obligé avant d'envisager la généralisation des approches fractionnaires à l'étude des machines électriques seules ... ou en réseau.

- ✓ La robustesse face aux incertitudes et aux incomplétudes n'est absolument pas prouvée.

Au-delà de la seule modélisation des machines électriques, l'application de l'approche fractionnaire aux réseaux électriques pourrait bien constituer l'enjeu principal de cette méthode de simplification structurelle des modèles. En effet, les réseaux électriques présentent un certain nombre de caractéristiques intéressantes :

- ✓ Un grand nombre de leurs composants se prêtent à une modélisation fractionnaire. C'est bien entendu le cas des machines électriques tournantes mais aussi des transformateurs ;
- ✓ Leur structure même semble les promettre à une représentation fractionnaire ainsi que je vais tenter de l'exposer dans la partie suivante.

### 3. MODELISATION FRACTALE

Cette partie n'a pas la prétention de poser les bases théoriques et pratiques d'une modélisation fractale des réseaux électriques. Elle est plus modestement destinée à illustrer la pertinence d'une investigation dans cette voie, s'appuyant pour cela sur les travaux passés dans de nombreux domaines de la Physique.

#### 3.1. Quelques éléments sur les fractales

Une fractale est caractérisée par une invariance d'une échelle d'observation à l'autre [66]. Ceci peut être illustré dans le cas simple de la fractale autosimilaire présentée Figure 25. Cette fractale est construite de la façon suivante :

- à  $n = 0$ , le motif est appelé initiateur ;
- à  $n = 1$ , un nouveau motif est construit à partir de l'initiateur. Il est appelé générateur ;
- à  $n = 2$ , la construction est répétée pour chaque nouveau couple initiateur - générateur du dernier motif obtenu ;
- et ainsi de suite ...

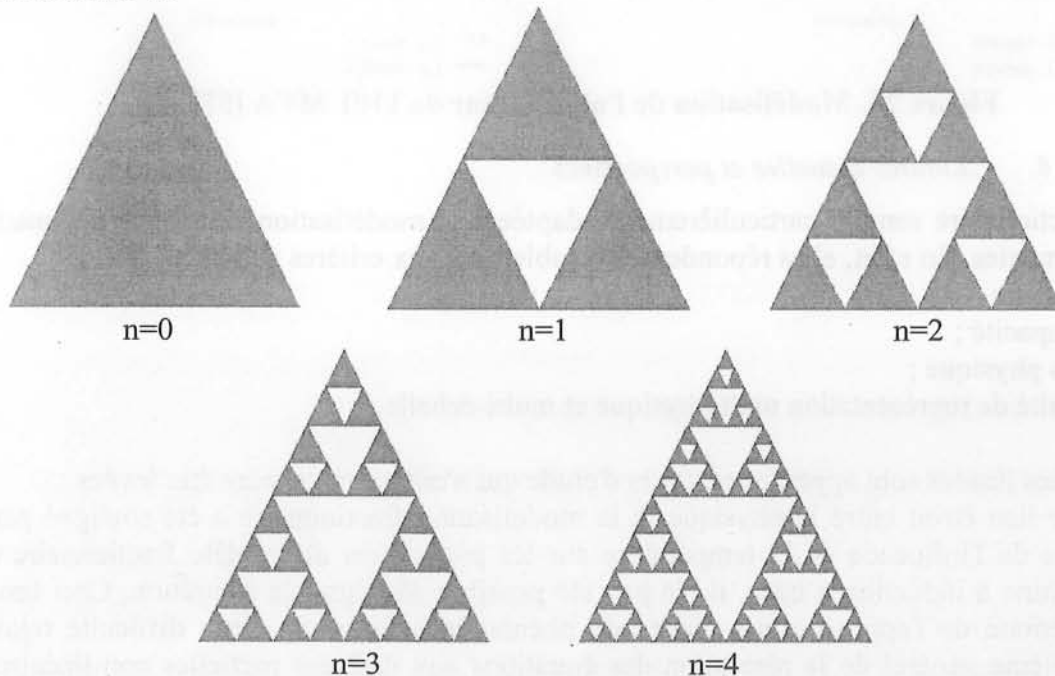


Figure 25 : tapis de Sierpinski

Quelque soit l'échelle d'observation, on constate une similitude géométrique de la fractale.

Notons alors  $N_n$  le nombre de triangles générateurs à l'itération  $n$ . Il vient immédiatement  $N_n = 3^n$ .

En supposant que la longueur du triangle à  $n = 0$  soit unitaire, la longueur d'un triangle à l'itération  $n$

vaut :  $L_n = (1/2)^n$ . Son aire est égale à  $S_n = \frac{\sqrt{3}}{4} (L_n)^2$ .

D'autre part, on appelle dimension fractale d'autosimilarité la grandeur  $D_f$  définie par [70] :

$$D_f = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{\ln N_n}{\ln \frac{1}{L_n}} \right) \quad (18)$$

Dans le cas du tamis de Sierpinski,  $D_f$  vaut  $\ln 3 / \ln 2$ .

$D_f$  est un paramètre constitutif de l'objet fractal. En effet, l'aire totale de tous les triangles à l'itération  $n$  vaut :

$$A_n = \frac{\sqrt{3}}{4} (L_n)^2 N_n = \frac{\sqrt{3}}{4} (L_n)^{2-D_f}$$

Les conséquences de cette relation sont importantes. D'une part,  $A_n$  tend vers 0 quand  $n$  tend vers l'infini. Ceci est une propriété remarquable des fractales. En effet, dans le cas d'un objet euclidien (un triangle par exemple), on montre aisément que sa surface totale reste constante quelque soit le découpage qu'on en fait.

D'autre part :  $A_{n+1} = \left(\frac{1}{2}\right)^{2-D_f} A_n$ . Il existe donc une loi d'échelle quand on passe d'une itération à l'autre. Cette loi d'échelle a deux caractéristiques importantes :

- ✓ le terme  $1/2$  est le rapport du découpage géométrique quand on passe d'une itération à l'autre ;
- ✓ l'exposant  $2-D_f$  est directement lié au fait que le tamis est plongé dans un espace plan, c'est-à-dire dont la dimension vaut 2.

Ceci est généralisable à tout objet autosimilaire plongé dans un espace euclidien de dimension  $d$ .

### 3.2. Fractales et diffusion

#### 3.2.1. Le mouvement brownien

Un des exemples connus de fractales en physique est le mouvement appelé brownien d'une particule en suspension dans un fluide. En 1905, Einstein part de l'hypothèse qu'une particule brownienne évolue selon une marche au hasard, les changements de direction étant dus aux chocs aléatoires avec les molécules du fluide (c'est notamment ainsi qu'il confirmera l'hypothèse atomiste). Il développa sur cette base une théorie qui fait le lien entre mouvement brownien, marche au hasard et diffusion.

On peut ainsi montrer que l'écart quadratique moyen de l'abscisse  $\langle z^2 \rangle$  d'une particule brownienne varie linéairement avec le temps  $t$  selon l'équation [67] :

$$\langle z^2 \rangle = 2D.t \quad (19)$$

où  $D$  est le coefficient de diffusion d'une particule dans le fluide considéré.

Jean Perrin confirma expérimentalement la théorie proposée en relevant toutes les 30 secondes la position d'une particule en suspension dans un liquide. Mais, plus intéressant pour le propos de ce mémoire, si la position est relevée toutes les 0.3 secondes sur segment  $[a,b]$  agrandi, on constate la même complexité géométrique que pour le motif de départ (cf. Figure 26). Le lien entre diffusion et fractalité est posé. Il est généralisable à tous les phénomènes diffusifs.

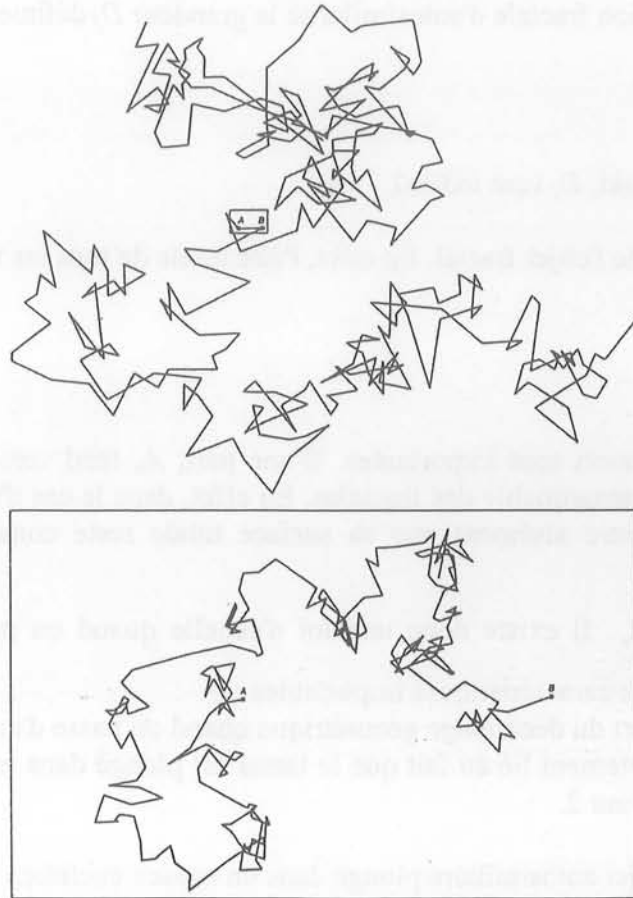


Figure 26 : trajectoire d'une particule brownienne relevée toutes les 30 s (en haut) puis toutes les 300 ms (en bas) - extrait de [68].

### 3.2.2. La diffusion du champ

Considérons à nouveau l'équation de la diffusion du champ dans l'hypothèse d'unidimensionnalité selon l'axe  $z$  [69] :

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial z^2} \quad (20)$$

avec  $D = \frac{1}{\sqrt{\sigma\mu}}$ , le coefficient de diffusion.

Ceci revient à considérer la diffusion du champ dans une pièce semi-infinie selon  $z$  [54] - [56].

a. 1<sup>er</sup> cas : le champ en  $z = 0$  est soumis à une impulsion de Dirac à  $t = 0$ :

On montre alors que la distribution temporelle du champ selon l'axe  $z$  de la diffusion est donnée par :

$$\bar{H}(z,t) = \frac{e^{-z^2/4Dt}}{2\sqrt{\pi Dt}} \quad (21)$$

$$\text{Il vient alors que : } \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = 0 \text{ pour } z^2 = 2D.t \quad (22)$$

Autrement dit, l'abscisse pour laquelle le champ est maximal varie comme la racine carrée du temps.

Voyons quelle est l'interprétation géométrique de ceci. On considère une période  $T$  d'observation de l'évolution du front de champ.  $T$  est choisie telle que  $2D.T = 1$ .

La distance parcourue sur  $T$  par le maximum du front de champ sera alors égale à  $L_0 = \sqrt{2D.T}$ .

On subdivise ensuite  $T$  en 2 périodes égales. La distance parcourue par le maximum sur la nouvelle période devient alors :  $L_1 = \sqrt{2D \cdot \frac{T}{2}}$ . A la nième subdivision, on obtient :  $L_n = \sqrt{2D \cdot \frac{T}{2^n}}$ . Le nombre de subdivisions de  $T$  est alors  $N_n = 2^n$ .

On répète ceci à l'infini. La dimension d'autosimilarité  $D_f$  est donnée par :

$$D_f = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{\ln N_n}{\ln \frac{1}{L_n}} \right) = - \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{n \ln 2}{\ln \sqrt{2DT} - \frac{n}{2} \ln 2} \right) = 2.$$

Finalement, la longueur totale de toutes les subdivisions vaut :  $\Gamma_n = N_n L_n = L_n^{1-D_f}$

La loi d'échelle caractéristique de l'autosimilarité est alors :  $\Gamma_{n+1} = (1/\sqrt{2})^{1-D_f} \Gamma_n$ .

Que peut-on en conclure ?

- ✓ De la même manière que le mouvement brownien, la diffusion du champ peut-être interprétée géométriquement comme un phénomène fractal. Sa dimension d'autosimilarité vaut 2.
- ✓ L'exposant  $(1-D_f)$  de la loi d'échelle est caractéristique d'une autosimilarité plongée dans un espace unidimensionnel.
- ✓ On retrouve aussi dans cette loi le rapport géométrique  $1/\sqrt{2}$  de passage d'une subdivision à l'autre.

b. 2<sup>ème</sup> cas : le champ en  $z = 0$  varie sinusoidalement avec la pulsation  $\omega = 2\pi/T$  et l'amplitude  $H_0$  :

La diffusion du champ est alors donnée par :

$$\bar{H}(z,t) = H_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} e^{j(\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z + \omega t)} \tag{23}$$

L'interprétation est connue : la distribution du champ le long de  $z$  s'amortit avec une constante inversement proportionnelle à la racine carrée de la pulsation c'est-à-dire proportionnelle à la racine carrée de la période. Cette constante est appelée épaisseur de peau.

Partant de l'expression du champ, il est possible de calculer l'impédance d'une tranche de largeur et de profondeur unitaires de la pièce semi-infinie selon  $z$  [54] - [56] :

$$\bar{Z}(j\omega) = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} (j\omega)^{1/2} \tag{24}$$

Considérons alors une pulsation  $a \cdot \omega$ . L'admittance du système est donnée par :

$$\bar{Z}(j\omega a) = \left( \frac{1}{\sqrt{a}} \right)^{1-2} \bar{Z}(j\omega) \tag{25}$$

Autrement dit, il existe une loi d'échelle sur l'impédance (mesure du système, tout comme l'aire était la mesure des triangles de Sierpinski) lorsque l'on passe d'une fréquence à une autre. L'exposant de la loi d'échelle vaut  $1-D_f$  où  $D_f = 2$ . On retrouve la propriété fondamentale d'une autosimilarité de dimension 2 plongée dans un espace unidimensionnel. Le coefficient  $1/\sqrt{a}$  est le rapport géométrique qui existe sur l'épaisseur de peau lorsque la pulsation passe de  $\omega$  à  $a \cdot \omega$ .

En définitive, on retrouve toutes les propriétés remarquables qui font de la diffusion, un phénomène de nature fondamentalement fractale.

*Remarque : il existe aussi une interprétation en termes de schéma équivalent récursif (la récursivité étant définie par une relation indépendante du rang considéré entre deux termes*

consécutifs d'une suite) qui permet de faire le lien entre la diffusion et le découpage géométrique autosimilaire de la hauteur de la tranche [57].

### 3.2.3. La diffusion anormale

D'un point de vue général, la diffusion d'une particule sur un réseau de dimension fractale  $D_f$  est régie par une équation du type [66] - [71] :

$$\langle R^2 \rangle \propto t^{2D_s/D_f} \quad (26)$$

$R$  est la distance parcourue par la particule et  $D_s$  est la dimension spectrale de diffusion. Cette dimension traduit les corrélations à longue distance entre la fractale, support de diffusion, et les mouvements de la particule. En effet, on ne peut plus parler exactement de mouvement brownien, aléatoire, puisque le support contraint la diffusion. On préfère alors parler de diffusion anormale.

Cette diffusion est aussi connue depuis longtemps pour certains systèmes de nature fractale, par exemple des échantillons métalliques à structure fractale [72], l'interface rugueuse entre un électrolyte et une électrode [73], ou tout simplement des réseaux électriques de géométrie fractale [74] - [75]. Dans tous ces cas, il existe une plage de fréquences sur laquelle l'impédance du système peut se mettre sous les formes suivantes :

$$\bar{Z}(j\omega) = \beta \bar{Z}(\alpha j\omega) \text{ avec } (\alpha > 1 \text{ et } \beta > 1) \text{ ou } (\alpha < 1 \text{ et } \beta < 1) \quad (27)$$

$$\text{ou } \bar{Z}(j\omega) - \bar{Z}(0) = \beta (\bar{Z}(\alpha j\omega) - \bar{Z}(0)) \text{ avec } (\alpha > 1 \text{ et } \beta < 1) \text{ ou } (\alpha < 1 \text{ et } \beta > 1) \quad (28)$$

Ces relations sont tout à fait caractéristiques de la nature fractale d'un système et traduisent les lois d'échelle sur l'impédance quand la fréquence passe d'une valeur à une autre.

La solution à ces équations est de la forme [74] :

$$Z(j\omega) \propto (j\omega)^{-\nu}$$

$$\text{où } \nu = \frac{\ln \beta}{\ln \alpha}.$$

Une analyse plus détaillée des propriétés fractales de ces systèmes montre que l'exposant de la loi d'échelle peut aussi être défini par :  $|\nu| = 1 - D_s / 2$

où  $D_s$  est la diffusion spectrale caractéristique de la diffusion anormale.

Finalement, la réponse fréquentielle de ces systèmes présente une pente de gain à  $-\nu \cdot 20$  dB/décade et un blocage de phase à  $-\nu \frac{\pi}{2}$  rad. C'est la caractéristique de systèmes d'ordre fractionnaire.

*Remarque : Il est possible de retrouver le cas particulier de la diffusion du champ dans une masse semi-infinie pour :*

$$\alpha = a ;$$

$$\nu = -1/2 ;$$

$$\text{et } \beta = \alpha^\nu = 1/\sqrt{a}.$$

*Dans ce cas, la dimension spectrale est unitaire.*

### 3.3. Vers une application aux réseaux électriques

De très nombreux dispositifs électriques peuvent être assimilés à des objets fractals dans la mesure où ils sont le siège de phénomènes diffusifs. Cette représentation a plusieurs avantages :

- ✓ Elle permet de faire le lien entre certaines propriétés géométriques et la réponse fréquentielle d'un système. Autrement dit, elle formalise les relations espace-fréquence (ou temps) constitutives d'un système. Il faut bien voir que cela ne concerne pas que les systèmes strictement auto-similaires. La théorie fractale est aussi applicable à des systèmes auto-similaires et désordonnés (c'est-à-dire revêtant un caractère aléatoire), auto-affines

(c'est-à-dire des systèmes anisotropes) ou multi-fractals (une fractale regroupant un ensemble d'objets eux-mêmes fractals).

- ✓ Bien entendu, les fractales telles qu'elles sont définies mathématiquement n'existent pas dans la réalité physique. Pratiquement, l'utilisation de la théorie fractale se justifie sur certaines plages d'observation, c'est-à-dire de fréquences.

L'application de la théorie fractale (et donc de la dérivation fractionnaire dans un deuxième temps) semble envisageable pour les réseaux électriques. A des échelles d'observation relativement globales et limitées, leurs ramifications rappellent en effet la structure d'un objet fractal. En outre, ces réseaux sont aussi constitués de composants dont le comportement est en partie diffusif, et donc fractal (cas des moteurs à induction, des alternateurs, des transformateurs et des câbles dans lesquels se développent des courants induits [76]).

Il est bien sûr certain que les réseaux sont des objets fractals extrêmement complexes cumulant caractère désordonné, anisotropie et multi-fractalité. Mais la théorie fractale semble présenter un grand nombre d'atouts pour une modélisation en rupture des réseaux électriques, revisitant totalement le lien entre espace et temps décrit par les équations de Maxwell constitutives de ces systèmes. On répondrait ainsi à un grand nombre de points du cahier des charges posés en début de cette partie :

- ✓ Précision de représentation ;
- ✓ Compacité malgré la complexité structurelle élevée ;
- ✓ Facilité d'intégration de procédés autres qu'électriques, la théorie fractale étant absolument multiphysique ;
- ✓ Faculté d'une représentation multi-échelle ;
- ✓ Pertinence physique ;
- ✓ Généricité.

Dans le cas où ces promesses de la modélisation fractale des réseaux électriques se trouvaient confirmées, il ne resterait plus qu'à envisager sa robustesse vis-à-vis de l'incomplétude qui entache souvent la connaissance des réseaux.

#### 4. REFLEXIONS SUR L'INCOMPLÉTUDE ET L'ALEATOIRE

La modélisation d'un réseau présuppose la constitution d'une base de connaissance regroupant la totalité de ses qualités (architectures, schémas de mise à la terre, plans de protection, nature des matériels, règles de fonctionnement) et de ses valeurs (tension, résistance de mise à la terre, impédance linéique, seuils de déclenchement ...) caractéristiques. Si ceci est possible tant qu'il existe une centralisation poussée à toutes les étapes de conception et de fonctionnement d'un réseau, cela devient irréaliste quand les acteurs du réseau se multiplient, avec parfois des objectifs concurrents et souvent des impératifs de confidentialité.

Le problème posé au modélisateur est alors le traitement de l'incomplétude des informations contenues dans la base de connaissance qu'il a à sa disposition. Pour cela, il a recours à une expertise, c'est-à-dire qu'il approche, simplifie, confronte à des résultats expérimentaux les informations dont il dispose afin de rendre sa connaissance " complète et certaine ". La nécessité d'une expertise reproductible, capitalisable et envisageable quelle que soit la complexité de la connaissance a conduit au développement de systèmes experts dans le sillage du développement des techniques informatiques.

La structure d'un système expert repose sur une structuration de la connaissance en trois parties [41] - [77] :

- ✓ une base de données descriptives : ce sont aussi bien des valeurs ( " la valeur de la résistance de mise à la terre est  $40 \Omega$  " ) que des faits ( " le réseau est maillé " ) ;
- ✓ une base de règles ( " si le réseau est urbain alors les conducteurs sont souterrains " ) ;
- ✓ un moteur d'inférence, c'est-à-dire le processus (la logique) par lequel les données sont enchaînées les unes aux autres par les règles. Classiquement, on distingue à ce niveau le

processus déductif (ou chaînage avant) pour lequel une nouvelle donnée est déduite d'une donnée initiale à partir d'une règle et le processus inductif (ou chaînage arrière) lors duquel on remonte d'un fait donné aux conditions factuelles nécessaires à sa réalisation.

Le traitement de l'incomplétude est au cœur des systèmes experts. Comment en effet traduire l'imprécision d'un fait disponible ( " la résistance de mise à la terre vaut environ  $40 \Omega$  " ) ou l'imprécision d'une règle ( " un réseau urbain est probablement constitué de conducteurs souterrains " )? Comment traiter les exceptions qui peuvent apparaître sans remettre en cause l'ensemble d'une représentation de connaissances ? Les travaux menés depuis les années 80 en intelligence artificielle ont permis d'envisager plusieurs solutions sous la forme de logiques non conventionnelles (dont l'exemple le plus connu est certainement celui de la logique floue), de raisonnements par analogie (qui exploite les rapprochements entre des faits particuliers distincts) ou de systèmes de modification des connaissances (soit par extension, contraction ou révision de la base de connaissances) [80].

Cette incomplétude relative à la connaissance statique d'un réseau se double d'un caractère dynamique aléatoire. Autrement dit, même si la description d'un réseau est complète, son fonctionnement est loin d'être déterministe. Ainsi, les conditions de charge peuvent varier fortement de manière totalement aléatoire. Un traitement statistique s'avère alors le plus approprié pour la modélisation du réseau avec l'avantage de pouvoir même inclure une mesure de l'incertitude portant sur ses données descriptives [78] - [79].

Bien sûr, il est peu probable qu'il existe un raisonnement permettant de tenir compte de manière totalement unifiée de l'extrême complexité de la connaissance. C'est plus la combinaison, l'hybridation de plusieurs méthodes qui permettront d'aboutir à une représentation plus fidèle. Cela pourrait être par exemple l'association d'un système de révision de la connaissance à une logique floue ou la combinaison d'une logique de défauts (permettant la prise en compte de règles à exception) et d'une modélisation probabiliste [80].

Enfin, c'est le processus même de résolution d'un problème qui se trouvera fortement dépendant de la structuration de la connaissance. A l'unique résolution déterministe pourra être substituée un traitement statistique pour tenir compte du caractère aléatoire quand il ne faudra pas reprendre le formalisme même de résolution pour tenir compte, par exemple, du caractère flou du modèle de réseau. La solution n'étant plus alors unique mais un ensemble flou.

## 5. QUELLE VALIDATION ?

Quelque soit la stratégie de modélisation retenue, les résultats qui pourraient être obtenus nécessiteront une validation. De tous temps, cette phase n'a pas été sans poser de problèmes et la mutation des systèmes électriques ne va certainement pas dans le bon sens. Comment en effet concilier les impératifs de continuité de service d'un réseau et le souci d'une campagne de validation exhaustive ? Quels essais de validation peuvent tenir compte de la complexité des phénomènes et de la variété des fonctionnements possibles ?

Actuellement, il n'existe pas de stratégie de validation qui permette de répondre à ces attentes. Deux démarches classiques cohabitent encore :

- ✓ réalisation d'essais ciblés sur le réseau grandeur nature ou sur son prototype s'il existe. Dans le premier cas, l'essai ne doit pas perturber le fonctionnement du système et l'on doit pouvoir maîtriser les conditions expérimentales. Dans l'autre cas, l'existence d'un prototype suppose une taille réduite du réseau ou alors la possibilité d'une maquette à échelle réduite.
- ✓ étude de robustesse du modèle face aux variations paramétriques. La démarche du modélisateur est de mettre au point son modèle puis d'effectuer a posteriori des études de sensibilité. Cette étude ne constitue pas à proprement parler une validation mais permet tout de même de mieux délimiter le domaine de validité.

Récemment, on a vu se développer des simulateurs temps réel de réseau électrique. On peut notamment mentionner Hypersim et Arène développés respectivement par HYDRO QUEBEC et EDF. L'intérêt de ces simulateurs est de permettre la constitution de micro-réseaux hybrides, une partie du réseau électrique étant modélisée en temps réel, le restant étant raccordé au simulateur soit sous la forme d'un micro-réseau analogique soit sous la forme réelle. Une telle stratégie permet par exemple de tester des matériels de protection, des filtres actifs ou des dispositifs de contrôle-commande [81]. Bien entendu, cette approche présente aussi des limitations importantes :

- ✓ impossibilité de valider des approches trop orientées réseaux (choix d'architecture par exemple) ;
- ✓ contraintes liées aux performances du calculateur temps réel.

Peu d'éléments nouveaux permettent de faire croire à des changements profonds dans les futures stratégies de validation. C'est donc toujours le croisement de différentes méthodes (prototypage, essais grandeur nature, comparaisons de simulations, expertise du chercheur) qui semble le plus sûr moyen de confirmer des résultats d'étude.



# **ELEMENTS DE CONCEPTION DES RESEAUX ELECTRIQUES**



## 1. LES ENJEUX DE LA CONCEPTION

La mutation des réseaux électriques a déjà été largement évoquée dans la première partie de ce document. Elle se traduit par un accroissement :

- ✓ de la complexité structurelle du fait de la prolifération d'équipements les plus divers ;
- ✓ du caractère multidisciplinaire, les réseaux mettant en jeu des procédés physiques variés ;
- ✓ des interactions internes entre constituants réseaux non hiérarchisés.

Cette mutation s'accompagne d'exigences accrues en termes de qualité, de sûreté de fonctionnement, de maîtrise des dépenses énergétiques et financières, d'impacts environnementaux.

Respecter ces exigences sur les bases actuelles devient problématique. C'est la raison pour laquelle de grands projets s'intéressent ces dernières années à une remise à plat des réseaux électriques.

On peut mentionner le projet "Centrale Virtuelle" porté en grande partie par le GIE IDEA (regroupant le LEG, EDF et Schneider Electric) qui s'intéresse aux formes de mutualisation coordonnée de moyens de production indépendants afin de garantir collectivement un objectif prédéfini (garantie de puissance fournie, service réseaux). Ce projet s'accompagne d'une "ré-vision" complète des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique, allant jusqu'à les confondre dans une seule entité [82]. C'est aussi le cas du projet européen "Power Optimized Aircraft" regroupant la majeure partie des acteurs de l'industrie aéronautique européenne et s'intéressant aux gains de masse, de rendement et de sûreté que peut apporter l'électrification embarquée [83].

Ces divers projets et ébauches d'évolution font intervenir à des degrés divers la notion de conception. Mais, c'est rarement une conception totalement exploratoire, faisant fi des expériences passées et aux résultats incertains (peut-être que le choix du passage à 350 V DC pour le réseau de bord d'un avion dans le cadre du projet "Power Optimized Aircraft" s'en rapproche car il implique de revoir l'ensemble des matériels et des stratégies usuellement employées sans garantie de résultats). C'est plus souvent le cas d'une conception par assemblage de nouvelles fonctions, de nouveaux matériels voire d'une conception par modifications successives de l'existant (cas des grands systèmes tels que les réseaux de distribution qu'il est impossible de revoir globalement pour des raisons évidentes de continuité de service et de coût) [41].

Dans une telle perspective, le processus même de conception n'est plus anodin. Il doit être suffisamment réfléchi pour appréhender la complexité, l'hétérogénéité et dans une certaine mesure l'indéterminisme des réseaux électriques. Il doit être capable d'intégrer, c'est-à-dire d'assembler les différentes parties en un tout et d'assurer que l'ensemble fonctionne comme désiré. Plus précisément, un réseau, comme tout système, peut être décomposé en trois niveaux :

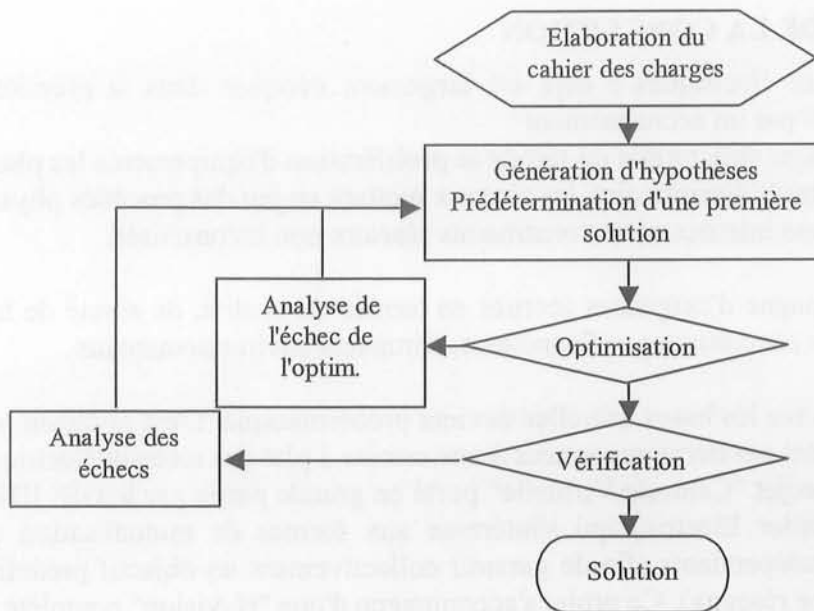
- ✓ le niveau opératoire qui réalise les objectifs opérationnels assignés au réseau ;
- ✓ le niveau de pilotage qui assure la conduite du niveau opératoire pour qu'il atteigne ses objectifs ;
- ✓ le niveau informationnel qui transmet les informations entre les deux niveaux précédents.

Un processus de conception doit finalement permettre l'intégration de ces trois niveaux de manière optimale vis à vis des objectifs opérationnels ... sans oublier, bien sûr, les nombreux facteurs humains [84].

## 2. PROPOSITION D'UN PROCESSUS DE CONCEPTION

### 2.1. Ebauche de structuration

D'un point de vue très général, un processus de conception peut être défini par un certain nombre d'étapes décrites sur la Figure 27.



**Figure 27 : Modèle général d'un processus de conception [41].**

A cette première vision d'un processus de conception vient se superposer la décomposition du système à concevoir en [77] - [84] :

- ✓ Fonctions à réaliser pour satisfaire le cahier des charges ;
- ✓ Organes matériels ou logiciels qui réalisent les fonctions.

Cette décomposition recouvre elle-même la différenciation effectuée entre niveaux opératoire, de pilotage et informationnel.

Enfin, il ne faut pas oublier les aspects temporels associés à tout système. On distingue usuellement trois domaines temporels selon les constantes de temps qui leur sont associées :

- ✓ Domaine statique : il concerne les choix ou les fonctionnements pour lesquels les constantes de temps sont grandes. Cela peut-être pour un réseau électrique la planification de son développement ou le dimensionnement en régime permanent ;
- ✓ Domaine dynamique qui regroupe en fait l'ensemble des fonctionnements ou des décisions à très faibles constantes de temps. Dans le cas d'un réseau, cela concerne par exemple le dimensionnement de ses protections ou des boucles de régulation des générateurs ;
- ✓ Domaine quasi-statique : c'est un domaine temporel intermédiaire qui recouvre les fonctionnements ou les décisions à dynamique lente (par exemple l'évolution du plan de tension suite à une modification lente de la charge ou la décision de raccordement d'un producteur).

## 2.2. Un premier processus de conception des réseaux électriques

Proposer un processus de conception qui tienne compte de cette structuration multi-couches et peu hiérarchisée n'est pas immédiat. Les expériences accumulées lors de l'analyse des réseaux électriques, de la recherche de solutions à certains de leurs problèmes mais aussi lors de la conception d'autres dispositifs permettent toutefois d'esquisser un premier processus de conception (cf. Figure 28).

Ses différentes étapes sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

### 2.2.1. *Elaboration du cahier des charges*

La spécification des exigences auxquelles doit satisfaire le réseau électrique nécessite une analyse des besoins. Bien entendu, le besoin essentiel est l'alimentation de charges réparties dans l'espace. A ce besoin sont associées des contraintes de service (limites opérationnelles sur la tension et la fréquence, continuité de service, maintenabilité, sûreté, fiabilité ...).

Ceci aboutit à la rédaction d'un cahier des charges spécifiant les différents objectifs à atteindre par le réseau dans son ensemble et les contraintes à respecter.

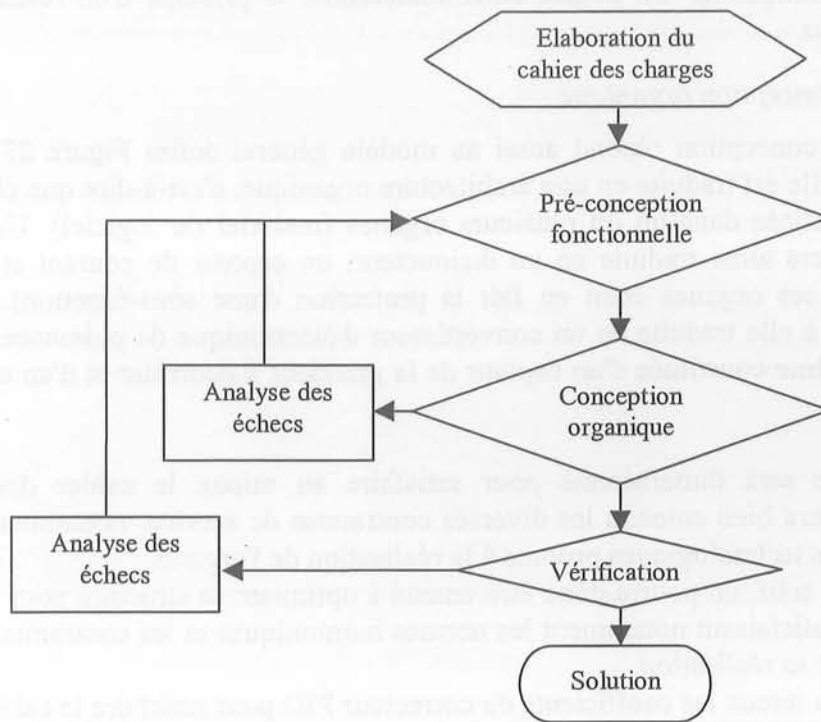


Figure 28 : Processus de conception d'un réseau électrique.

### 2.2.2. Pré-conception fonctionnelle

Cette première étape proprement dite consiste bien entendu en une phase d'analyse fonctionnelle du type de réseau électrique considéré (distribution ou alimentation) [84]. Si cette analyse a déjà été en partie menée sur les dispositifs d'électronique de puissance, elle n'est que très partielle pour les réseaux.

Une première décomposition fonctionnelle grossière permet d'identifier les fonctions suivantes :

- ✓ Alimentation ;
- ✓ Conversion ;
- ✓ Stockage ;
- ✓ Filtrage ;
- ✓ Protections ;
- ✓ Contrôle-commande (plus ou moins proche du niveau opératoire) ;
- ✓ Transmission d'informations.

La décomposition devient plus délicate lorsqu'il s'agit de décomposer chaque fonction elle-même en sous-fonctions (limitation, mesure, interrupteur ...) et d'y associer les contraintes temporelles (ou leur traduction fréquentielle). La complexité et les imperfections d'un système rendent aussi difficile une décomposition fonctionnelle fine. Par exemple, les éléments parasites d'un circuit électrique, pourtant essentiels à la propagation des perturbations hautes fréquences, ne pourront être déclinés en une fonction simple. Dans ce cas, la décomposition fonctionnelle ne pourra être que grossière.

Une fois l'analyse fonctionnelle aboutie, la phase de pré-conception proprement dite pourra commencer. Elle respectera le modèle général présenté Figure 27. Partant du cahier des charges initial, une première détermination de l'architecture fonctionnelle sera effectuée, intégrant le choix des fonctions constitutives du réseau et leur emplacement spatial. Cette architecture sera ensuite optimisée pour répondre au mieux au cahier des charges. L'optimisation pourra aussi bien porter sur la nature des fonctions, leur localisation ou leur "nombre" (c'est-à-dire leur taux de pénétration dans le réseau). Par exemple, on pourra définir si oui ou non il est nécessaire d'adjoindre au filtrage passif principal un filtrage actif et pré-déterminer un ordre de grandeur de sa puissance.

Une vérification fonctionnelle terminale aura enfin lieu pour conclure sur le respect ou non du cahier des charges. Son échec éventuel conduira à la redéfinition de l'architecture fonctionnelle sur la base d'une nouvelle pré-détermination. On pourra ainsi abandonner le principe d'un réseau alternatif au profit d'un réseau continu.

### 2.2.3. Conception organique

La deuxième phase de conception répond aussi au modèle général défini Figure 27. Tout d'abord l'architecture fonctionnelle est traduite en une architecture organique, c'est-à-dire que chaque fonction ou sous-fonction est réalisée dans un ou plusieurs organes (matériel ou logiciel). Une fonction de protection en courant sera ainsi traduite en un disjoncteur, un capteur de courant et un organe de commande (chacun de ses organes étant en fait la projection d'une sous-fonction). Une fonction filtrage actif sera quant à elle traduite en un convertisseur d'électronique de puissance et une boucle d'asservissement elle-même constituée d'un capteur de la grandeur à contrôler et d'un correcteur PID, par exemple.

Ensuite, chaque organe sera dimensionné pour satisfaire au mieux le cahier des charges. Ce dimensionnement intégrera bien entendu les diverses contraintes de service, notamment temporelles, mais aussi les contraintes technologiques propres à la réalisation de l'organe.

Dans l'exemple du filtre actif, on pourra donc être amené à optimiser sa structure pour minimiser son encombrement tout en satisfaisant notamment les normes harmoniques et les contraintes sur les semi-conducteurs utilisés pour sa réalisation.

On devra aussi choisir au mieux les coefficients du correcteur PID pour satisfaire le cahier des charges (temps de réponse, marge de stabilité, précision).

Chaque dimensionnement d'organe donnera finalement lieu à une vérification, soit par simulation complète de l'organe dimensionné, soit par la réalisation d'un prototype. L'échec de cette vérification pourra conduire à revoir la projection ou même à revenir à la pré-conception fonctionnelle. Ainsi, l'échec du dimensionnement d'un filtre actif nécessitera peut-être l'adoption d'une autre structure (active ou passive) ou carrément son abandon au profit d'une nouvelle architecture fonctionnelle, à la moindre pollution harmonique.

### 2.2.4. Vérification

Chaque organe ayant été dimensionné à part, la dernière étape consistera en la vérification du bon fonctionnement de l'ensemble en regard du cahier des charges. La définition du protocole de vérification est aussi problématique que celle de la procédure de validation des modèles. Il sera en effet difficile, voire impossible, de vérifier en grandeur nature la solution finale. L'alternative se situera alors entre une campagne de simulations ou la réalisation d'une vérification à grandeur réduite.

## 2.3. Pour une conception ensembliste

Le premier processus proposé permet de traiter en partie l'intégration des différents niveaux d'un réseau électrique. Il n'est que partiel car cette conception intégrée n'est vraie que pour la phase fonctionnelle. Au stade organique, chaque organe est dimensionné seul ou en interaction avec un faible nombre d'autres organes. Cela peut être problématique pour la convergence vers une solution finale et conduire à un grand nombre d'itérations du processus de conception.

L'approche ensembliste est une alternative séduisante qui est mentionnée par S. Brassard dans [41]. Elle part du postulat de base qu'il existe un ensemble de solutions potentielles à un problème de conception donné. Ainsi, pour la réalisation d'une fonction filtrage actif, il existe un certain nombre de solutions selon le poids qui est accordé à l'encombrement, aux marges de sécurité, aux performances. Cela conduit à définir un espace des solutions pour chaque organe. La solution finale dans une approche ensembliste serait alors le résultat de l'intersection des différents espaces de solution. Pour reprendre l'exemple du filtrage actif, on peut arriver à définir une solution plus performante en termes d'encombrement mais qui soit moins à même de filtrer certaines fréquences. De même, un redresseur à absorption sinusoïdal peut satisfaire les objectifs qui lui sont assignés (conversion AC-DC et faibles

perturbations harmoniques) pour différentes fréquences de découpage. C'est l'intersection des solutions pour le filtre actif et pour le redresseur qui pourra conduire à choisir la meilleure.

Bien entendu, si cette démarche ensembliste paraît encore prématurée au vu de la relative immaturité des démarches de conception intégrée dans les réseaux électriques, des premiers travaux menés sur les frontières de Pareto (qui définissent justement l'ensemble des solutions possibles d'un problème d'optimisation multicritère) sont porteurs d'espoir [85].

### 3. MODELES, METHODES ET OUTILS DE CONCEPTION

#### 3.1. Les modèles de conception

Avant toute conception, une attention particulière doit être portée au choix du modèle vis à vis des objectifs de conception et des spécifications listées page 27. Mais encore faut-il qu'un modèle convenable existe ...

Si l'on reprend le processus de la Figure 28, il est possible de différencier deux grandes classes de modèles. A cette première classification des modèles entre fonctionnel et organique, il est aisé pour le concepteur en électrotechnique de superposer une deuxième grille de lecture selon le domaine temporel. On retrouve cette deuxième approche dans les travaux menés par F. Barruel dans le cadre de sa thèse et du projet "Power Optimized Aircraft" [38] - [86].

Les différents types de modélisation sont présentés dans le Tableau 6. Le numéro des cases renvoie aux commentaires qui figurent ci-dessous.

	Domaine statique		Domaine dynamique		
	Fondamental	Harmoniques	Petits signaux	Grands signaux	CEM HF
<b>Pré-conception fonctionnelle</b>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<b>Conception organique</b>	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

**Tableau 6 : Classification des modèles de conception.**

*Remarque : le domaine quasi-statique est absent du tableau. En effet, il n'apporte rien par rapport au domaine dynamique, seules les dynamiques les plus élevées étant négligées.*

Il est important de noter qu'il existe actuellement peu de modèles dédiés à la conception fonctionnelle ou organique, leur grande majorité étant dédiée à l'analyse. Parmi les rares approches de conception existantes, on peut mentionner les modélisations développées au LEG pour la conception des convertisseurs d'électronique de puissance, tenant compte des aspects CEM HF (case(5) et (10)) [88] - [92] - [93].

Les travaux actuels portent donc principalement sur l'évaluation des modèles d'analyse pour la conception de réseaux et, plus particulièrement, sur :

- ✓ les approches statiques déjà largement utilisées pour le calcul des répartitions de puissance dans les réseaux [87] (Case (1) et (6)) ;
- ✓ les méthodes d'évaluation de la pollution harmonique générée par les charges non linéaires ; du modèle équivalent de Norton aux approches itératives permettant la prise en compte des interharmoniques [89] (Case (2) et (7)) ;
- ✓ les modèles moyens, linéarisés ou non, utilisés pour les analyses dynamiques de réseau en présence de convertisseurs d'électronique de puissance [91] - [90] (Case (3), (4), (8) et (9)) ;

### 3.2. Les méthodes et outils de conception

Le processus et les modèles de conception étant définis, il ne restera plus (enfin !) qu'à passer à la conception proprement dite. Se pose alors le problème du choix des méthodes d'optimisation.

En plus d'être complexe et hétérogène, un réseau électrique est un système non-linéaire pouvant combiner grandeurs continues et discrètes (la position des régleurs en charge par exemple). En outre sa conception peut nécessiter une optimisation de la localisation de certains organes, problème par essence discret.

Pour toutes ces raisons, le choix des algorithmes d'optimisation peut s'avérer délicat. R. Caire dans le cadre de ses travaux de thèse sur la gestion optimisée d'un parc de producteurs, a mené une évaluation de différentes méthodes [85]. Les résultats importants peuvent être résumés en quelques points :

- ✓ Les méthodes déterministes d'optimisation non-linéaire, sous contraintes peuvent être appliquées dans la plupart des cas à condition de pouvoir approcher le caractère discret par une grandeur continue. C'est le cas lorsque la seule grandeur discrète est la position du régleur en charge. C'est beaucoup moins probant lorsqu'on s'intéresse à une localisation optimale ;
- ✓ Les méthodes stochastiques du type algorithmes génétiques ou Tabou permettent de s'affranchir des problèmes que rencontrent les méthodes précédentes. Elles nécessitent toutefois des réglages a priori peu évidents et ont un coût de calcul élevé. D'autre part, on ne peut garantir leur convergence que de manière asymptotique, c'est-à-dire pour un nombre d'itérations infini. Cela pose le problème du critère d'arrêt ;
- ✓ Ce sont souvent des couplages de méthode dans une logique maître-esclave qui donnent les meilleures performances. On peut notamment citer le couplage entre algorithme génétique et méthode déterministe.

Vient enfin le moment du choix des outils nécessaires à la mise en œuvre du processus de conception ...

Actuellement, il existe peu de logiciels dédiés à la conception des réseaux électriques, quels qu'ils soient. Certains sont utilisés par EDF mais absolument pas accessibles au concepteur indépendant. Il existe par contre de nombreux logiciels de simulation pour l'analyse. On peut citer EUROSTAG pour l'étude dynamique des réseaux de transport, EMTP pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques ou HARMONIQUE, un logiciel d'EDF dédié à l'étude des harmoniques réseaux. Il existe aussi toute une panoplie d'outils de calcul développés au sein d'entreprises, de laboratoires ou pour des besoins pédagogiques.

On peut aussi mentionner des logiciels de simulation de systèmes multiphysiques comme SABER ou MATLAB qui permettent tout de même de mener des études de petits réseaux ou d'organes.

Face à cette extrême diversité, le choix d'un outil n'est pas évident. Il sera effectué en fonction des objectifs de la conception. Pour toutes les boucles d'optimisation, MATLAB offre la puissance et la variété de ses algorithmes disponibles en standard ou développés de ci de là. Pour les phases de simulation, on pourra s'orienter vers des outils déjà disponibles et répondant aux attentes. Le couplage entre outils pourra alors se faire simplement par échange de fichiers. On pourra aussi en l'absence de solutions immédiates développer de nouveaux codes de calcul réseaux.

En définitive, tout ceci concourt à rechercher une plate-forme de conception qui permette une intégration des différents outils avec le maximum de simplicité pour le concepteur. Cette plate-forme devrait aussi pouvoir intégrer des systèmes d'aide à la modélisation et à la conception.

Il se trouve que cette plate-forme est déjà en partie disponible au LEG pour la conception d'actionneurs ou de convertisseurs [45]. On ne peut donc que souhaiter qu'elle élargisse son champ d'application à la conception de réseaux.

#### 4. UN EXEMPLE D'APPLICATION : LES RESEAUX ELECTRIQUES DES FUTURS GROS PORTEURS CIVILS

##### 4.1. L'avion plus électrique

Ces dernières années, l'aéronautique vit la même mutation que l'automobile au début des années 90, avec la mise en œuvre du concept de "plus électrique". Ainsi, l'énergie embarquée par passager augmente régulièrement pour passer de 12 kW actuellement à des prévisions de 30 kW dans 3 ans et 50 kW d'ici 2010. Par ailleurs, la recherche du meilleur rendement, d'une consommation énergétique minimale et d'une moindre maintenance pousse à l'abandon des distributions hydraulique et pneumatique au profit de l'électrique ; sans pour autant vouloir sacrifier à la sûreté et à la fiabilité de l'ensemble !

Cette évolution est déjà notable sur l'A380, le futur gros porteur d'Airbus, avec la suppression de l'embrayage électromécanique qui assurait jusqu'à présent un raccordement à vitesse constante de l'alternateur sur le réacteur. Le réseau électrique devient donc à fréquence variable et l'alimentation des nombreux actionneurs (électrohydrauliques, électropneumatiques ou électromécaniques) nécessite le recours à des convertisseurs électriques. La prolifération de ces organes de conversion n'est pas anodine pour le système électrique. En effet, comment va réagir l'alternateur face à un tel taux de charges non linéaires ? Les pertes vont-elles augmenter d'une manière significative ? La stabilité du réseau est-elle garantie ? Quelles stratégies de protection doit-on envisager ? On imagine la difficulté de répondre à ces questions quand on sait que, tous réseaux confondus, la longueur du câblage d'un gros porteur est passée de 150 km pour l'A340 à 700 km pour l'A380, soit Paris-Toulouse !!!!

Bien sûr, tout ceci est actuellement étudié par Airbus et les équipementiers aéronautiques. De manière plus prospective, cela fait aussi l'objet du contrat européen "Power Optimised Aircraft" [83]. Ces travaux sont pourtant encore loin de la conception, c'est-à-dire de l'optimisation, du système électrique complet. Le respect des normes, l'évaluation comparative de plusieurs solutions possibles restent souvent l'unique réponse apportée aux interrogations soulevées par l'électrification des avions. Pourtant, une démarche inspirée de la méthodologie de conception présentée ci-dessus est possible. Elle est en cours d'élaboration dans le cadre de la thèse de F. Barruel et est succinctement développée dans les pages qui suivent [86].

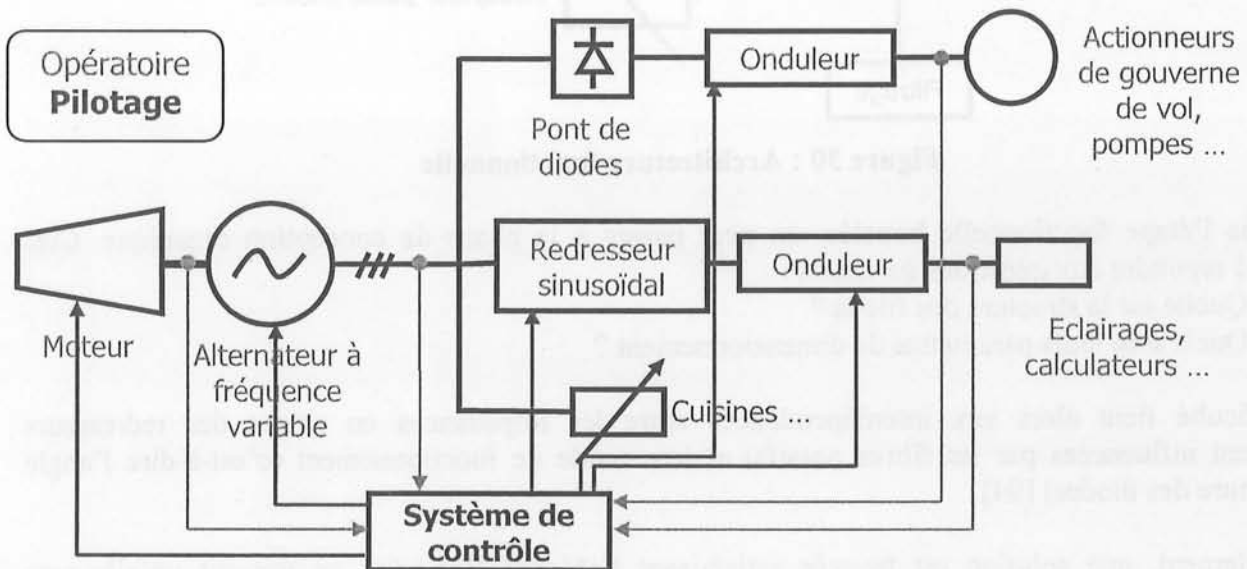


Figure 29 : Les différents niveaux de conception

#### 4.2. Éléments de conception d'un réseau de bord

Un réseau de bord élémentaire est présenté Figure 29. Il est représentatif des réseaux à fréquence variable des futurs gros porteurs civils. Le niveau informationnel n'est pas figuré, venant se superposer aux niveaux opératoires et de pilotage.

Les objectifs fixés par le cahier des charges du réseau sont :

- ✓ l'augmentation du rendement ;
- ✓ la diminution des consommations de charge ;
- ✓ la réduction des coûts de maintenance ;
- ✓ la diminution de la masse ;
- ✓ l'augmentation de la fiabilité et de la sûreté.

Dans une première approche et dans un souci illustratif, on ne s'intéresse qu'à un objectif, par exemple la diminution du volume des filtres embarqués sous contraintes de normes harmoniques et de facteur de puissance.

L'architecture fonctionnelle du réseau correspondant à cet objectif est présentée Figure 30. Elle fait apparaître la fonction filtrage qui n'était pas présente initialement au niveau opératoire du réseau. La conception fonctionnelle doit alors répondre aux questions suivantes :

- ✓ Quelle est la nature du filtrage : passif, actif ou mixte ?
- ✓ Avec quel taux ?
- ✓ Et quelle localisation ?

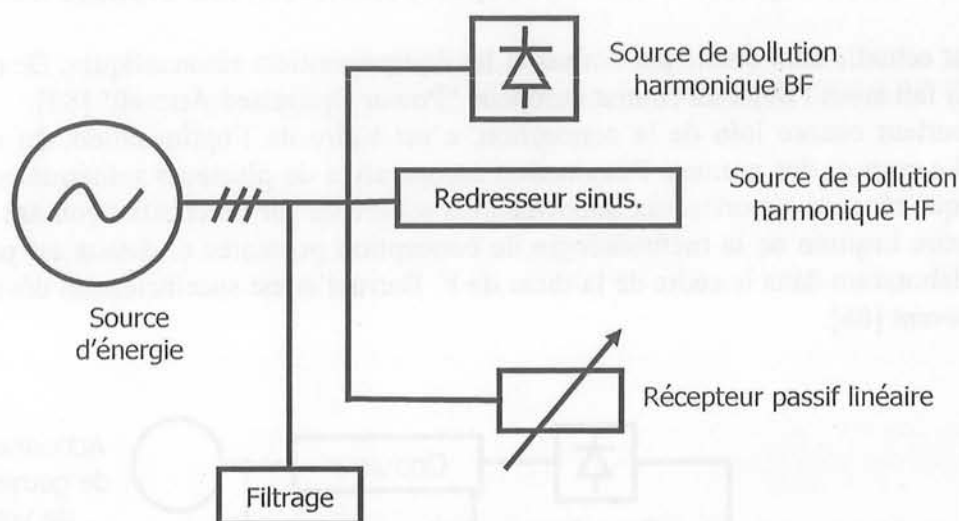


Figure 30 : Architecture fonctionnelle

Une fois l'étape fonctionnelle bouclée, on peut passer à la phase de conception organique. Ceci revient à répondre aux questions suivantes :

- ✓ Quelle est la structure des filtres ?
- ✓ Quels sont leurs paramètres de dimensionnement ?

La difficulté tient alors aux interdépendances entre les impédances en amont des redresseurs (fortement influencées par les filtres passifs) et leur mode de fonctionnement (c'est-à-dire l'angle d'ouverture des diodes) [94].

Si, finalement, une solution est trouvée satisfaisant l'objectif fixé, rien ne garantit qu'elle sera compatible avec les autres objectifs du cahier des charges. Dans la négative, l'ensemble du processus de conception, de sa formulation aux choix effectués à chaque étape, sera certainement à reprendre. C'est ce qui fait la richesse d'un tel travail mais aussi, parfois, son ingratitude ; en attendant, qu'un jour, une approche ensembliste permette le traitement simultané de tous les objectifs ...

## **CONCLUSION**

**La retraite est encore loin ... Alors, au boulot !**



Cinquante pages pour les éléments d'un programme scientifique. Cela paraît bien peu en regard des heures passées à le formuler, à l'éprouver, à le développer, à l'accomplir. Cela semble du domaine de la gageure lorsqu'il s'agit de le conclure en identifiant les grandes lignes de force qui le traversent. La synthèse scientifique a souvent l'art des raccourcis que l'esprit s'échine à trouver, se perdant le plus souvent dans les broussailles d'une réflexion imparfaite.

Bref, que retenir et que faire demain, concrètement ? Je vois se dessiner trois axes d'investigation.

Il est certain que la poursuite de la réflexion de la modélisation des systèmes complexes est impérative tant pour l'analyse que pour la conception. Elle doit se faire aussi bien par la reprise des techniques d'analyse modale (réduction d'ordre) ou par la recherche de représentations réellement nouvelles des systèmes électriques (les fractales). Si le cœur de cette réflexion est au sein du génie électrique, elle ne pourra faire l'économie d'un partage avec les communautés scientifiques concernées par les mêmes objets scientifiques : l'automatique et les mathématiques appliquées.

Un deuxième axe, beaucoup plus récent, se dégage nettement concernant la conception des réseaux électriques. De même, l'expertise du fonctionnement d'un réseau ne peut être faite que par un spécialiste du domaine mais la réflexion sur le processus de conception ensembliste, sur les outils d'aide à cette conception et à l'acquisition des connaissances nécessitent la recherche de collaboration avec les équipes de recherche spécialisées dans la conception intégrée de systèmes électriques.

Enfin, science appliquée, le génie électrique n'est pas que l'exercice d'une connaissance théorique. Elle doit faire de permanents allers et retours entre l'objet technologique de sa science et la réflexion conceptuelle. Dans la vision proposée ici, les nouveaux réseaux d'énergie électrique sont les objets privilégiés pour une application.

Et de nouveau, il n'est pas concevable de mener cette tâche seul mais en relation avec les autres acteurs concernés, que cela soit les industriels du secteur ou d'autres chercheurs intéressés par les mêmes sujets.

Comme quoi, tout est histoire de réseaux ...



# **BIBLIOGRAPHIE**



- [1] M. Daumas, *Histoire Générale des techniques*, Tome 4, Collection Quadrige, Presses Universitaires de France, Paris, 1978.
- [2] Ouvrage Collectif, *Histoire de l'Electricité en France*, Tome 1, Fayard, Paris, 1991.
- [3] Divers sites WEB :
- ✓ <http://www.edf.fr/html/fr/decouvertes/index.html>
  - ✓ <http://www.inrp.fr/lamap/scientifique/electricite/histoire/electricite.htm#industrielle>
  - ✓ <http://www.electropolis.tm.fr/statique/electrostatique/pages/charges.html>
  - ✓ <http://www.cnam.fr/museum/revue/ref/r23a02.html>
  - ✓ <http://barthes.ens.fr/atelier/articles/benoit-29-3-96.html>
  - ✓ [http://www.ac-nancy-metz.fr/Pres-etab/EREAFlavigny/netscol2000/pages\\_html/electricite.htm](http://www.ac-nancy-metz.fr/Pres-etab/EREAFlavigny/netscol2000/pages_html/electricite.htm)
- [4] J.L. Fraisse, *Le raccordement de la production décentralisée en HTA et BT*, REE, N°7, Juillet 2002.
- [5] J.D. Harrison, *Micro combined heat & power potential impact on the electricity supply industry*, CIRED 01, 18-21 juin 2001, Amsterdam.
- [6] Dossier collectif, *Le Navire tout électrique*, REE, N°9, Octobre 2000.
- [7] Dossier collectif, *Moteurs électriques pour applications de grandes séries*, 3 E.I, N°21, Juin 2000.
- [8] J.M. Peter, *Les composants semi-conducteurs de puissance - Leur évolution à venir*, Rapport scientifique et technique SEE, Edition N°5, 2001, p. 128 à 133.
- [9] EURELECTRIC, <http://unipede.eurelectric.org/Public/content/>, Site WEB.
- [10] Ministère de l'industrie,  
[http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/textes/se\\_cogen2.htm#decollage](http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/textes/se_cogen2.htm#decollage), Site WEB.
- [11] Ministère de l'industrie,  
<http://www.industrie.gouv.fr/cgi-bin/industrie/frame0.pl?url=/energie/sommaire.htm>, Site WEB.
- [12] R.C. Dugan et T.E. Mc Dermott, *Distributed generation*, IEEE Industry Application Magazine, , Vol. 8, N°2, Mars/Avril 2002, p. 19 à 25.
- [13] R.C. Dugan et D.T. Rizy, *Electric distribution protection problems associated with the interconnection of small, dispersed generation devices*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-1038, N°6, Juin 1984, p. 1121 à 1127.
- [14] R.E. Brown, *Modeling the reliability impact of distributed generation*, IEEE PES Summer Meeting, Chicago, Juillet 2002.
- [15] M. Megdiche, *Etude de l'impact de l'insertion de production décentralisée sur la fiabilité des réseaux de distribution HTA*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, en cours (débutée en octobre 2001).
- [16] J.F. Canard, *Impact de la génération dispersée dans les réseaux de distribution*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 12 décembre 2000.
- [17] S.K. Salman, *Factors influencing the effective integration of the rotating type-distributed generation into utilities' distribution networks*, First International Symposium on Distributed Generation : Power system and Market Aspects, Stockholm, 11-13 juin 2001.
- [18] P. Lemerle, D. Cortinas, S. Vitet, J.L. Meyer et J.L.Fraisse, *Insertion de la production décentralisée en BT*, CIRED'99, Nice, 2-4 juin 99.
- [19] R. Caire, *Impact de la production décentralisée BT sur la HTA - Réflexion sur les impacts envisagés*, Notice Technique GIE-IDEA NTe/Sy2/01/005/A, 2001.
- [20] S. Martino, *Evaluation de l'impact de l'insertion de production en BTA sur les courants de court-circuit triphasés HTA en régime permanent*, Note technique GIE IDEA Nte/IDEA/02/001/A, 2002.
- [21] R. Caire, N. Retière, S. Martino, C. Andrieu, N. Hadjsaid, *Permanent short circuit currents modification of low voltages distributed generation on distribution network*, UPEC, Stafford, Septembre 2002.
- [22] R. Caire, *Etude des Impacts de la GED sur le réseau de distribution - Le régime permanent*, Note technique GIE IDEA Nte/IDEA/02/002/A, 2002.
- [23] R. Caire, N. Retière, S. Martino, C. Andrieu, N. Hadjsaid, *Impact assessment of LV Distributed Generation on MV Distribution Network*, IEEE PES Summer Meeting, Chicago, Juillet 2002.
- [24] R. Caire, N. Retière, T. Tran-Quoc, S. Martino, C. Andrieu, N. Hadjsaid, *Case studies on the operating of 20 kv distribution network with large-scale low-voltage dispersed generators*, CIRED'03, Barcelona, Mai 2003.

- [25] S. Martino, *Evaluation de l'impact de l'insertion de production en BTA sur les courants de court-circuit biphasés HTA en régime permanent*, Note technique GIE IDEA Nte/IDEA/02/003/A, 2002.
- [26] S. Martino, *Evaluation de l'impact de l'insertion de production en BTA sur les courants de court-circuit monophasés HTA en régime permanent*, Note technique GIE IDEA Nte/IDEA/02/004/A, 2002.
- [27] T. Tran-Quoc, *Stabilité des générateurs synchrones 40kVA à 250kVA raccordés aux réseaux de distribution*, Présentation orale GIE IDEA, 22 mars 2002.
- [28] C. Andrieu, *Déséquilibres de tension dus aux générateurs monophasés*, Note technique GIE IDEA Nte/IDEA/02/006/A, 2002.
- [29] Ministère de l'industrie, *Arrêté du 17 mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'une installation de production d'énergie électrique*.
- [30] E. Khatir, *Nouveaux procédés d'alimentation électrique par le sol des systèmes de transport urbain*, REE, N°6, Juin 2000.
- [31] E. Morin, G. Meunier, N. Retière, J. Roudet, D. Cornic, *Use of a Finite-Elements Method to characterize a Multiconductor Transmission Line problem on a tram ground-powered system*, IEEE Compumag, Saratoga Springs, 2003.
- [32] R.P. Clayton, *Analysis of multiconductor transmission lines*, Wiley Series in microwave and optical engineering, Kay Chang series editor, 1994.
- [33] E. Clavel, *Vers un outil de conception de câblage : le logiciel INCA*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 21 novembre 1996.
- [34] R. Holm, *Electric contacts : theory and application*. Berlin, New York, Springer Verlag 1967.
- [35] L. Féchant, *Le Contact électrique : Phénomènes physiques et matériaux*, Paris, Hermès, 1996.
- [36] I. Baaklini, N. Retière, S. Bacha, C. Gaudin, "Modelling of industrial induction motors for the pre-diagnosis of voltage dips", *ICEM (International Conference on Electrical Machines)*, Helsinki, Août 2000.
- [37] I. Baaklini, *Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 23 mars 2001.
- [38] F. Barruel, *Modélisation et simulation d'un réseau de bord d'avion*, Rapport de DEA Génie Electrique, INPG, Septembre 2002.
- [39] D. Thirault, *Architecture de réseau de distribution pour les pays en voie de développement*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, en cours (débutée en octobre 2000).
- [40] D. Thirault, Y. Bésanger, N. Hadjsaid, A. Almeida, G. Huard, *Cost Estimation of Different Electric Systems for Rural Areas in Developing Countries*, IEEE PES Summer Meeting, Chicago, Juillet 2002.
- [41] S. Brassard, *Méthodologie et modélisation floues des connaissances dans l'activité de conception en électrotechnique*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 22 septembre 1989.
- [42] J-M. Guichon, *Etude et modélisation en régime de court-circuit d'une association onduleur MLI / Machine Asynchrone*, Rapport de DEA Génie Electrique, INPG, Septembre 1998.
- [43] J-M. Guichon, L. Gerbaud, N. Retière, A. Bolopion, J. Davoine, *Une démarche d'étude des défauts des convertisseurs d'électronique de puissance. Exemple du court-circuit d'un bras d'onduleur de tension*, Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 3, No 1/2000.
- [44] J-M. Guichon, N. Retière, L. Gerbaud, C. Schaeffer, *Commutation de modèle pour l'étude des défauts de court-circuit*, Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 4, No 1/2002.
- [45] L. Gerbaud, *Gentiane : une plate-forme pour la conception des ensembles machine-convertisseur-commande*, Habilitation à diriger des recherches de l'INP de Grenoble, 11 juillet 2000.
- [46] G. Claeys, *Modélisation de la production indépendante dans les réseaux de distribution*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 23 mars 2001.
- [47] G. Claeys, N. Retière, N. Hadjsaid, P. Iemerle, E. Varret, R. Belhomme, *Dynamic Modelling of Turbo-charged Diesel Engine for Power System Studies*, PICA, Sydney, Mai 2001.
- [48] L. Weil, *Eléments de thermodynamique*, Bordas, Paris, 1958.
- [49] M.P. Ford, *A simplified turbocharged diesel engine model*, GEC Journal of Research, Vol. 5, N°3, Mars 1993.
- [50] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, *Modélisation et identification des processus*, Tome 2, Technip, Paris, 1992.

- [51] M. Fontela, *Modélisation réduite de réseaux de distribution en présence de production décentralisée*, Rapport de DEA Génie Electrique, INPG, Septembre 2002.
- [52] M. Fontela, R. Caire, N. Retière, C. Andrieu, S. Martino, T. Tran-Quoc, N. Hadjsaid, *Model reduction of distribution networks with dispersed generation*, CIRED, Barcelone, Mai 2003.
- [53] N. Retière, *Etude des défauts dans les associations onduleur - machine asynchrone. Etude d'une chaîne de traction*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 18 Novembre 1997.
- [54] N. Retière, M. Ivanès, *Modeling of electric machines by implicit derivative half order system*, IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, No 9, Sept. 1998.
- [55] A. Nourdine, *Schéma équivalent des machines à champ tournant et impédance d'ordre fractionnaire*, Rapport de DEA Génie Electrique, INPG, Septembre 1998.
- [56] N. Retière, M. Ivanès, *An Introduction to Electric Machines Modeling by Non Integer order Systems*, IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. 14, No 4, Déc. 1999.
- [57] D. Riu, *Modélisation des courants induits dans les machines électriques par des systèmes d'ordre un demi*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 11 Décembre 2001.
- [58] I. Podlubny, *Fractional differential equations*, Mathematics in science and engineering, Vol. 198, Academic Press, 1999.
- [59] P.L. Alger, *Induction machines - their behavior and uses*, Gordon and Breach, New-York, 1970.
- [60] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, *Half-order system modelling of hydro and turbo alternators*, UPEC, Swansea, Pays de Galles, Septembre 2001.
- [61] D. Riu, N. Retière, M. Ivanès, *Induced currents modeling by half-order systems. Application to hydro- and turbo-alternators*, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 18, No 1, Mars 2003.
- [62] I. Kamwa, P. Viarouge, *On equivalent circuit structures for empirical modeling of turbine-generators*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, Septembre 1994, p. 579 à 592.
- [63] I. Kamwa, P. Viarouge, H. Le Huy, *Direct and indirect approaches for deriving synchronous machine stability models from SSFR test data*, IECM'94, A.9, 1994, p. 379 à 385.
- [64] IEEE, *Standard Procedure for Obtaining Synchronous Machine Parameters by StandStill Frequency Response Testing*, IEEE Std 115 A, 1995.
- [65] A. Oustaloup, *La dérivation non entière*, Hermès, Paris, 1995.
- [66] R. Botet, *Les fractales en physique*, Techniques de l'Ingénieur, AF 4 5000, p. 1 à 18.
- [67] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet, *Physique statistique*, Hermman, Paris, 1989.
- [68] Collectif, *L'ordre du chaos*, Pour la science, Belin, 1989.
- [69] M. Soutif, *Vibrations, propagation, diffusion*, Dunod, Paris, 1970.
- [70] A. Le Méhauté, R. R. Nigmatullin, L. Nivanen, *Flèches du temps et géométrie fractale*, Hermès, Paris, 1998.
- [71] R. Rammal, G. Toulouse, *Random walks and fractal structures and percolation clusters*, J. Physique, Lettres 44, Janvier 1983, p. L-13 à L-22.
- [72] T.C. Haba, G. Ablart, T. Camps, *Réponse d'un échantillon métallique à structure fractale à une excitation électrique à fréquence variable*, J. Physique, AP 3, 1998, p. 187 à 193.
- [73] S.H. Liu, *Fractal model for the ac response of a rough interface*, Physical review letters (The American Physical Society), 29 juillet 1985, Vol. 55, No 5, p. 529 à 532.
- [74] R.M. Hill, L.A. Dissado, R.R. Nigmatullin, *Invariant behaviour classes of the response of simple fractal circuits*, J. Physique : Condens. Matter, Vol. 3, 1991, p. 9773 à 9790.
- [75] J.P. Clerc, A.-M. S. Tremblay, G. Albinet, C.D. Mitescu, *Ac response of fractal networks*, J. Physique, Lettres 45, No 19, Octobre 1984, p. L-913 à L-924.
- [76] D. Riu, P. Guérin, N. Retière, "Transformer modelling by half-order systems", *EPE'03*, Toulouse, Septembre 2003.
- [77] A. Gentilhomme, *COCASE - Un système expert d'aide à la conception d'appareillages électriques*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 3 Mai 1991.
- [78] P. Guérin, *Contribution à l'étude des perturbations harmoniques des réseaux de bord des navires : approches déterministes et stochastiques*, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 11 janvier 1996.
- [79] L. Miegerville, *Contribution à l'analyse prévisionnelle et stochastique des perturbations des réseaux électriques par des charges non linéaires*, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 23 septembre 1999.

- [80] L. Sombé, *Raisonnements sur des informations incomplètes en Intelligence Artificielle*, Teknea, Toulouse, 1989.
- [81] G. Sevestre, *Rapport de maîtrise*, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2003.
- [82] GIE IDEA, <http://www.gie-idea.com/>.
- [83] POA, <http://www.poa-project.com/default.asp>.
- [84] J.P. Meinadier, *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermès, Paris, 1998.
- [85] R. Caire, N. Retière, E. Morin, M. Fontela, N. Hadjsaid, *Voltage management of distributed generation in distribution networks*, IEEE General Meeting, Toronto, Juillet 2003.
- [86] F. Barruel, *Méthodologie d'analyse d'un réseau électrique pour les réseaux du futur*, JCGE'03, Saint-Nazaire, Juin 03.
- [87] P. Kundur, *Power system stability and control*, EPRI, 1993.
- [88] C. Larouci. *Conception et optimisation de convertisseurs statiques pour l'électronique de puissance ; applications aux structures à absorption sinusoïdale*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 2002.
- [89] J. Arrillaga, B.C. Smith, N.R. Watson, A.R. Wood, *Power System Harmonic analysis*, J. Wiley and Sons, 1998.
- [90] P. Petitclair, *Modélisation et commande des structures FACTS : application au STATCOM*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 1997.
- [91] S. Guffon, *Modélisation et commandes à structures variables de filtres actifs de puissance*, Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 2000.
- [92] J. L. Schanen, *Electronique de puissance : au cœur de la commutation*, Habilitation à diriger des recherches de l'Université Joseph Fourier, 15 novembre 2000.
- [93] J. Roudet, *Intégration de la CEM dans la conception des convertisseurs d'Electronique de Puissance*, Habilitation à diriger des recherches de l'INP de Grenoble, 11 juillet 2000.
- [94] F. Barruel, J-L. Schanen et N. Retière, "Etude de la dépollution harmonique dans les réseaux d'avion", *Electrotechnique du Futur 03*, Paris, Décembre 2003.

Les réseaux électriques ont profondément changé depuis leur apparition. Les petits réseaux locaux du début 20<sup>ème</sup> Siècle ont pendant longtemps été interconnectés pour former des réseaux plus vastes et fortement centralisés. Mais, les orientations politiques libérales des vingt dernières années ont inversé la tendance et les réseaux électriques sont de plus en plus vus comme des systèmes intégrateurs de sous-systèmes décentralisés.

Face à cette évolution libérale, la question de notre maîtrise de l'énergie est de plus en plus cruciale. Ce mémoire propose quelques pistes et solutions pour y répondre.

Partant d'un constat historique et scientifique de l'évolution des réseaux électriques, le mémoire présente tout d'abord une modélisation en rupture des réseaux qui doit faciliter l'analyse des interactions en leur sein.

Afin de répondre aux enjeux d'une maîtrise optimale de l'énergie électrique, une deuxième partie esquisse un processus de conception des réseaux du futur.

En conclusion, le mémoire s'ouvre sur les nombreuses perspectives scientifiques qu'offre l'évolution récente des réseaux électriques.