



HAL
open science

Mécanismes décisionnels pour la reconfiguration dynamique des réseaux de distribution électrique

Trung Hieu Nguyen

► **To cite this version:**

Trung Hieu Nguyen. Mécanismes décisionnels pour la reconfiguration dynamique des réseaux de distribution électrique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français. NNT: . tel-00480137

HAL Id: tel-00480137

<https://theses.hal.science/tel-00480137>

Submitted on 3 May 2010

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

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

**UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'Université de Grenoble
délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble**

Spécialité : Génie Electrique

préparée au laboratoire Grenoble Génie Electrique

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

présentée et soutenue publiquement

par

Trung Hieu NGUYEN

Ingénieur de l'Institut Polytechnique de Hanoi

le 25 mars 2010

Titre :

***Mécanismes décisionnels pour la reconfiguration dynamique
des réseaux de distribution électrique***

DIRECTEURS DE THESE

Bertrand RAISON / Eric ZAMAÏ

JURY

M. BACHA Seddik	, Président
M. GUILLAUD Xavier	, Rapporteur
M. NIEL Eric	, Rapporteur
M. RAISON Bertrand	, Directeur de thèse
M. ZAMAÏ Eric	, Directeur de thèse
M. HENRY Sébastien	, Examineur
M. GRECARD Sébastien	, Examineur

A mes parents.

*Làm những việc mà bạn e ngại và sau mỗi lần thử sức,
hãy ghi lại những tiến bộ dù là nhỏ nhất*

Remerciement

Comme le veut la tradition, je vais tenter de satisfaire au difficile exercice de la page des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue de ces années de thèse. Non qu'exprimer ma gratitude envers les personnes en qui j'ai trouvé un soutien soit contre ma nature, bien au contraire. La difficulté tient plutôt dans le fait de n'oublier personne. C'est pourquoi, je remercie par avance ceux dont le nom n'apparaît pas dans cette page et qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre. Ils se reconnaîtront. Pour les autres, non merci. Ils se reconnaîtront aussi...

Les premières personnes que je tiens à remercier sont Bertrand RAISON et Eric ZAMAI, mes directeurs, qui ont su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé. Nos continuelles oppositions, contradictions et confrontations ont sûrement été la clé de notre travail commun. Plus que des directeurs ou des collègues, je crois avoir trouvé en eux des amis qui m'ont aidé bien dans le travail que dans la vie lorsque j'en avais besoin.

S'il est beaucoup de personnes que l'on qualifie à tort de sage ou de savant, ce n'est pas le cas avec Sébastien HENRY. Il sait, invente, transmet; il écoute, comprend, tempère. Il a montré de l'intérêt pour mes travaux et répondu à mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir. J'espère que cette thèse sera un remerciement suffisant au soutien et à la confiance sans cesse renouvelée dont il a fait preuve en mon égard.

Je remercie particulièrement Seddik BACHA, mon chef d'équipe SYREL pour leurs encouragements pendant le temps de mes travaux au G2ELab et pour avoir accepté d'être président du jury de ma soutenance de thèse.

Je remercie Xavier GUILLAUD et Eric NIEL de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse. J'éprouve un profond respect pour leur travail et leur parcours, ainsi que pour leurs qualités humaines. Le regard critique, juste et avisé qu'ils ont porté sur mes travaux ne peut que m'encourager à être encore plus perspicace et engagé dans mes recherches.

Merci à Sébastien GRECARD d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Ses remarques et commentaires ont jeté un courant d'air frais qui m'a permis de clarifier certains points de ce manuscrit.

Je remercie tout particulièrement Quoc Tuan TRAN pour nos fréquentes discussions sur de nombreux sujets dans la vie, mais aussi pour son implication dans mes travaux.

Merci à PHAM Thi Thu Ha et à PHAM Cong Duc pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour ce qu'ils sont, ce qu'ils savent et ce qu'ils donnent.

Je ne remerciais pas NGUYEN Ngoc Phuc Diem, LE Ky, Damien, Martin, Didier, Phyllipp, Alexandre et Marie-Cécille. Je me contenterais de regretter les moments que l'on a passés dans la salle de travail commun.

Merci aux membres du laboratoire G2ELab de Grenoble-INP pour leur accueil, leur soutien et leur confiance renouvelée lors des derniers mois de ma thèse.

Un soir de novembre 2006... Quel chemin parcouru depuis ce temps là où je suis arrivé en France et j'ai rencontré LES SUPER AMIS au CAMPUS! Merci à Thanh Doanh, Trinh Do Hieu, Dang Toan, Hoang Nam, Le Van Thang, Hoang Trang, Thanh Son, Tran Xuan Truong, Anh Duc, Anh Tuan, Anh Van, Jean Tristant, Sebastian, Jonas, Bianca, Hamza, Jennifer, Macro, Noémie, Sylvain pour nos moments ensemble sans lequel j'aurais eu du mal à garder l'équilibre.

En fin et le plus fort de mes remerciements est pour les personnes dans ma famille, je la remercie pour son irremplaçable et inconditionnel soutien. Ils ont été présents pour écarter les doutes, soigner les blessures et partager les joies. Cette thèse est un peu la leur, aussi. Merci Papa, Maman, Anh Tuan, Chi Hang, Anh Nghia, Chi Thuy, Anh Thu, Chi Nga, Anh Khang, Chi Van, Thuy Quynh.

Xin được gửi lời cảm ơn chân thành đến ban lãnh đạo Tập đoàn Điện lực Việt Nam, Trường Đại học Điện lực, nơi đã cử, đài thọ kinh phí cho 3 năm học tập vừa qua tại Pháp. Xin gửi lời cảm ơn đặc biệt đến thầy Đàm Xuân Hiệp, chú Phạm Hữu Lập, anh Nguyễn Viết Cường, anh Nguyễn Hữu Quỳnh, chú Lâm Du Sơn, cô Lê Thị Minh Thu, anh Bình, em Tiến những người đã trực tiếp quản lý, tiếp xúc và giúp đỡ tôi trong thời gian vừa qua.

Cảm ơn các thầy cô Lê Hải Sâm, Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Thị Ngọc Yên, Eric Castelli thuộc bộ môn Đo lường Tin học Công Nghiệp và trung tâm MICA trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Sự định hướng, dìu dắt bước đầu khi em có ý định thực hiện luận án tại Pháp của các thầy cô, em không thể quên.

Table de matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Réseau de distribution et son système de conduite.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Structure du réseau électrique, réseau de distribution	6
1.2.1 Structure générale du réseau électrique d'un pays	6
1.2.2 Quelques précisions sur le réseau de distribution HTA	7
1.2.3 Fonctionnement en sécurité et qualité de la fourniture	15
1.3 Système de protection et réactions face aux défauts.....	16
1.3.1 Système de protection des réseaux HTA	16
1.3.2 Réaction du système de protection lors d'un défaut	18
1.4 Conduite du réseau HTA et son rôle dans le processus de reconfiguration.....	19
1.4.1 Conduite du réseau HTA.....	19
1.4.2 Centre de téléconduite.....	21
1.4.3 Rôle du système de conduite face à un défaut	23
1.5 Reconfiguration du réseau après un défaut.....	24
1.6 Conclusion	26
Chapitre 2 Etat de l'art : reconfiguration des systèmes complexes.....	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Terminologie.....	28
2.2.1 Termes généraux	28
2.2.2 Supervision.....	29
2.2.3 Surveillance.....	29
2.2.4 Niveaux d'intégration de la supervision, de la surveillance, de la commande.....	30
2.2.5 Reconfiguration des systèmes industriels	31
2.3 Etat de l'art.....	32
2.3.1 Approches de reconfiguration	32
2.3.2 Synthèse des approches développées	36
2.3.3 Approche choisie pour notre problème	37
2.4 Démarche retenue	37
2.4.1 Synthèse des lois de commande pour la reconfiguration des systèmes à événement discret complexes.....	38
2.4.2 La méthode de synthèse des lois de commande.....	42
2.5 Applicabilité de la méthode au domaine des systèmes électriques.....	46
2.5.1 Extensions de l'approche choisie aux systèmes électriques.....	47
2.6 Conclusion	51
Chapitre 3 Modélisation d'un réseau de distribution pour la reconfiguration.....	53
3.1 Introduction.....	53
3.2 Caractéristiques générales d'un réseau électrique	53
3.2.1 Réseau complet et réseau réduit.....	54
3.2.2 Connexion, structure et configuration du réseau.....	55
3.2.3 Types des nœuds	57
3.2.4 Variables d'état du réseau	58
3.3 Modèle du réseau	61
3.3.1 Forme générale du modèle des opérations d'une connexion	62
3.3.2 Evolutions des opérations d'une connexion.....	66
3.4 Modèles des nœuds.....	78
3.4.1 Modèle d'un nœud détaillé.....	78
3.4.2 Modèle d'un nœud groupé	79
3.5 Conclusion	79
Chapitre 4 Méthode de reconfiguration des réseaux de distribution.....	81

4.1 Introduction.....	81
4.2 Principes généraux de la méthode.....	81
4.3 Définitions	82
4.4 Etape de recherche des configurations possibles (étape 1).....	84
4.4.1 Construction d'un graphe des opérations d'activation.....	85
4.4.2 Recherche des configurations possibles.....	102
4.5 Etape de recherche des configurations exploitables (étape 2).....	104
4.5.1 Modèle mathématique et résolution de NR pour calculer la RDC.....	106
4.5.2 Test d'une configuration complète possible correspondant à un chemin possible	111
4.5.3 Recherche des configurations exploitables	116
4.6 Recherche de la meilleure séquence de manœuvres à exécuter afin de passer le réseau de l'état initial à une ce_i (étape 3).....	117
4.6.1 Algorithme de recherche de la séquence de manœuvres correspondant à une configuration exploitable	118
4.6.2 Recherche du E_{su_s} en appliquant l'algorithme de recherche sq_i	128
4.6.3 Recherche et proposition de la solution optimale (sol_k choisie).....	129
4.7 Etape de recherche et d'insertion des parallélismes (étape 4).....	130
4.8 Conclusion	131
Chapitre 5 Application à des cas concrets.....	133
5.1 Introduction.....	133
5.2 Présentation du réseau d'étude	133
5.2.1 Réseau en fonctionnement normal	134
5.2.2 Réseau après le défaut.....	138
5.3 Scénarii de reconfiguration.....	140
5.4 Modélisation du réseau.....	142
5.4.1 Modélisation des connexions du réseau.....	142
5.4.2 Modélisation des nœuds du réseau.....	145
5.5 Environnement de développement et de test	145
5.6 Tests.....	146
5.6.1 Recherche des configurations possibles du réseau après un défaut (étape 1).....	146
5.6.2 Configurations exploitables du réseau après le défaut (étape 2).....	148
5.6.3 Recherche de la séquence des manœuvres sans parallélisme	150
5.6.4 Insertion des parallélismes (étape 4).....	154
5.7 Conclusion	156
Conclusion générale et perspectives.....	159
Bibliographie	163
Annexes.....	169
Annexe 1 : La méthode de recherche et d'insertion des opérations parallèles de S. Henry	169
Annexe 2 : Modèle général des opérations d'un réseau	177
Annexe 3 : Modèle des nœuds (détaillés/groupés) du réseau exemple	185
Annexe 4 : Graphe trouvé en appliquant la méthode de reconfiguration d'un réseau pour le réseau exemple.....	189
Annexe 5 : Trois jeux de données des lignes utilisés pour tester le réseau exemple.....	193

Liste des figures

Figure 1.1 : organisation générale d'un réseau électrique.....	6
Figure 1.2 : schéma de base d'un réseau de distribution HTA radial	8
Figure 1.3 : schéma de base d'un réseau de distribution HTA en boucle ouverte	9
Figure 1.4 : disjoncteur HTA de Siemens 3AH5 Vacuum	12
Figure 1.5 : interrupteur HTA sans pouvoir de coupure installé sur un pylône.....	12
Figure 1.6 : différents types de défauts	14
Figure 1.7 : chaîne de protection HTA	17
Figure 1.8 : état du réseau après le défaut	18
Figure 1.9 : notions de télécommande et de télésurveillance [PUR-1991]	20
Figure 1.10 : architecture de téléconduite d'un réseau HTA.....	21
Figure 1.11 : différents niveaux hiérarchiques des fonctions du contrôle – commande HTA	22
Figure 1.12 : état du réseau après le défaut	24
Figure 1.13 : reconfiguration du réseau après un défaut	25
Figure 2.1 : système automatique de production manufacturière	38
Figure 2.2 : chaîne fonctionnelle du vérin VI	39
Figure 2.3 : opération « Sortir Vérin I »	41
Figure 2.4 : étapes principaux de la méthode de synthèse de la loi de commande	42
Figure 2.5 : opération de transformation du produit.....	43
Figure 2.6 : espace d'état atteignable.....	44
Figure 2.7 : meilleur chemin des opérations de transformation.....	44
Figure 2.8 : processus d'ajout des opérations de transitique	45
Figure 2.9 : meilleur chemin après l'ajout des opérations de préparation	46
Figure 2.10 : fonctionnement général de la méthode de reconfiguration du réseau	48
Figure 2.11 : sens de déplacement du flux	49
Figure 2.12 : évolution de ressource sans la prise en compte des états transitoires.....	50
Figure 2.13 : démarche de la méthode de reconfiguration du système électrique	50
Figure 3.1 : exemple d'un réseau électrique complet	54
Figure 3.2 : réseau électrique réduit correspondant	55
Figure 3.3 : structure et configuration d'un réseau	56
Figure 3.4 : nœuds poste source : source primaire et source secondaire	58
Figure 3.5 : variables d'état mécanique	59
Figure 3.6 : Variables d'état électrique	60
Figure 3.7 : variables d'état électrique du réseau complet	61
Figure 3.8 : forme générale d'une opération de préparation	62
Figure 3.9 : modèle d'une opération induite.....	64
Figure 3.10 : modèle d'une ligne	65
Figure 3.11 : description des paramètres d'une ligne du réseau complet.....	65
Figure 3.12 : activation d'une connexion	67
Figure 3.13 : désactivation d'une connexion suite au changement d'état mécanique.....	67
Figure 3.14 : désactivation d'une connexion par effet « induit »	68
Figure 3.15 : cas d'étude.....	68
Figure 3.16 : symboles utilisés dans ce mémoire	69
Figure 3.17 : évolutions associées à l'ouverture d'un Int-X/d'un Disj-X.....	69
Figure 3.18 : exemple des évolutions associées à l'ouverture de l'Int1/du Disj3.....	70
Figure 3.19 : évolutions associées à la fermeture de l'Int-X/du Disj-X.....	71
Figure 3.20 : évolutions associées à la fermeture de l'Int-1/du Disj-1.....	71
Figure 3.21 : connexion activée dans le sens positif/négatif.....	72
Figure 3.22 : évolutions associées à l'activation de la ConnDisj-X.....	73
Figure 3.23 : exemple de l'évolution associée à l'activation de la ConnDisj1.....	73
Figure 3.24 : évolutions associées à l'activation de la ConnInt-X.....	74

Figure 3.25 : exemple de l'évolution associée à l'activation de la ConnInt1	74
Figure 3.26 : évolutions associées à la séparation de la ConnDisj-X	75
Figure 3.27 : exemple de l'évolution associée à la séparation dans le sens positif de la ConnDisj1	76
Figure 3.28 : évolutions associées à la désactivation de la ConnInt-X	76
Figure 3.29 : évolutions associées à la désactivation de la ConnDisj-X	77
Figure 3.30 : exemple de l'évolution associée à la désactivation dans le sens positif	77
Figure 3.31 : modèle d'un nœud détaillé du réseau complet	78
Figure 3.32 : modèle d'un nœud groupé du réseau	79
Figure 4.1 : principe général de l'algorithme	82
Figure 4.2 : état initial du réseau suite à un défaut	83
Figure 4.3 : structure avant et après la zone de défaut isolée	84
Figure 4.4 : exemple de la structure et deux configurations possibles du réseau	86
Figure 4.5 : exemple des états d'un sommet du graphe	87
Figure 4.6 : exemple d'un arc du graphe	88
Figure 4.7 : premier niveau du graphe et son espace des sommets atteignables	89
Figure 4.8 : recherche et exécution des opérations d'activation	91
Figure 4.9 : suite de la construction du graphe présenté dans la Figure 4.8	92
Figure 4.10 : sommets objectifs dans un graphe	93
Figure 4.11 : algorithme classique de construction d'un graphe des opérations d'activation	95
Figure 4.12 : graphe des opérations d'activation du réseau	97
Figure 4.13 : arc superflu et chemin superflu	98
Figure 4.14 : algorithme final de construction d'un graphe des opérations d'activation	101
Figure 4.15 : graphe résultant en appliquant l'algorithme final	102
Figure 4.16 : recherche du chemin le plus court parmi les chemins possibles	103
Figure 4.17 : module de test d'une configuration possible	111
Figure 4.18 : obtention des données d'une ligne et des nœuds extrémités de la ligne	112
Figure 4.19 : ajout du nœud virtuel et des lignes idéales, numérotation des noeuds	113
Figure 4.20 : Recherche des configurations exploitables	116
Figure 4.21 : algorithme de recherche de la séquence des manœuvres	119
Figure 4.22 : configuration initiale et configuration exploitable du réseau après un défaut	120
Figure 4.23 : construction des listes des interrupteurs et disjoncteurs à manœuvrer	121
Figure 4.24 : ouverture des disjoncteurs dans la Liste2	123
Figure 4.25 : construction des listes des interrupteurs et disjoncteurs à fermer	124
Figure 4.26 : construction des sous listes des ressources à manœuvrer	125
Figure 4.27 : construction des listes des disjoncteurs à manœuvrer	126
Figure 4.28 : ouverture des disjoncteurs de la Liste6	127
Figure 4.29 : algorithme de la 10 ^{ème} , 11 ^{ème} et 12 ^{ème} étape	128
Figure 4.30 : construction de l'ensemble des séquences de manœuvres	128
Figure 4.31 : recherche de la meilleure solution dans l'ensemble des solutions possibles	129
Figure 4.32 : exemple des opérations parallèles	131
Figure 5.1 : structure du réseau réel	134
Figure 5.2 : structure du réseau après regroupement	135
Figure 5.3 : structure réduite après la simplification du réseau complet	138
Figure 5.4 : état du réseau en fonctionnement normal	138
Figure 5.5 : état du réseau considéré après isolation de défaut au nœud N_13	139
Figure 5.6 : solution sans coupure temporaire des clients sains sous tension	140
Figure 5.7 : solution avec coupure temporaire des clients sains sous tension	141
Figure 5.8 : proposition dans le cas de surcharges	142
Figure 5.9 : modèle de l'opération de préparation « FInt1 »	143
Figure 5.10 : modèle de l'opération induite « ActConnDisj1 »	144
Figure 5.11 : modèle du nœud source « N_150 »	145

<i>Figure 5.12 : extrait du graphe des opérations d'activation du réseau exemple.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5.13 : configurations possibles du graphe.....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 5.14 : meilleure séquence des manœuvres par rapport au temps total</i>	<i>152</i>
<i>Figure 5.15 : meilleure séquence des manœuvres par rapport au temps total</i>	<i>153</i>
<i>Figure 5.16 : séquence des manœuvres correspondant au scénario 1.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 5.17 : séquence des manœuvres correspondant au scénario 2.....</i>	<i>156</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : comparatif des deux schémas de base de réseaux HTA</i>	10
<i>Tableau 1.2 : différentes fonctions des appareils HTA utilisés en distribution</i>	11
<i>Tableau 1.3 : quelques paramètres de deux appareils de coupure HTA</i>	13
<i>Tableau 1.4 : principales caractéristiques des défauts au niveau de tension HTA</i>	15
<i>Tableau 1.5 : contraintes "qualité" d'un distributeur</i>	16
<i>Tableau 1.6 : comparaison entre trois normes de communication</i>	23
<i>Tableau 2.1 : points forts et points faibles des approches</i>	36
<i>Tableau 2.2 : comparatif des différences entre les deux systèmes (électrique et production)</i> .	46
<i>Tableau 4.1 : types de nœuds utilisés dans le calcul de répartition des charges</i>	105
<i>Tableau 4.2 : données d'entrée de la configuration exploitée</i>	114
<i>Tableau 4.3 : sorties de calcul de répartition de charges (convergence)</i>	115
<i>Tableau 4.4 : valeurs de flux sur des lignes après le calcul de RDC</i>	116
<i>Tableau 4.5 : Etat initial et état final du réseau présenté dans la figure 4.21</i>	120
<i>Tableau 5.1 : connexions ne contenant pas de ressource manœuvrable</i>	136
<i>Tableau 5.2 : état hypothèse initial du réseau exemple</i>	139
<i>Tableau 5.3 : paramètres principaux du graphe trouvé</i>	147
<i>Tableau 5.4 : configurations possibles</i>	148
<i>Tableau 5.5 : résultats des configurations exploitables en utilisant le premier jeu de données</i>	149
<i>Tableau 5.6 : résultats des configurations exploitables en utilisant le deuxième jeu de données</i>	149
<i>Tableau 5.7 : résultats des configurations exploitables en utilisant le troisième jeu de données</i>	150
<i>Tableau 5.8 : solutions sans coupure temporaire des clients sains sous tension</i>	151
<i>Tableau 5.9 : solutions avec coupure temporaire des clients sains sous tension</i>	152
<i>Tableau 5.10 : résultats après l'examen des configurations possibles</i>	154

Introduction générale

L'accès aux ressources énergétiques, et en particulier celle de l'électricité, est devenu au fil du temps un enjeu majeur. Concernant l'électricité, il s'agit en particulier d'en assurer une production ajustée à la demande (équilibre production/consommation), avec une tension et une fréquence stables et en garantissant à l'utilisateur d'être en permanence alimenté (droit d'accès à l'électricité).

Cependant, force est de constater que garantir un tel niveau d'exigence suppose l'absence d'aléas de fonctionnement liés par exemple à l'usure d'ouvrages, à des événements externes tels que les phénomènes météorologiques, ou encore à des coupures de lignes suite à des interventions du domaine du génie civil.

Dans de telles situations, la fourniture de l'électricité ne peut plus être garantie aux usagers ; les organes de protection déclenchant. Afin de minimiser les gênes occasionnées, qui peuvent d'ailleurs être particulièrement sensibles en fonction des clients raccordés (hôpitaux, entreprises, résidentiel), il s'agit de mettre en œuvre, le plus rapidement possible, une séquence de manœuvres permettant de réalimenter le plus de clients possibles.

Pour cela, trois fonctions principales sont généralement appelées lorsqu'un défaut se produit : la détection du défaut, son diagnostic (localisation et isolement de la zone contenant le défaut) et la reconfiguration des connexions du réseau électrique. Pour cette dernière fonction, et à ce jour en France, l'ensemble des manœuvres possibles est généralement conçu hors ligne par les bureaux d'étude afin de garantir une bonne réactivité. En effet, la meilleure réactivité consiste à appliquer en temps réel une solution déjà fixée à l'avance. Cependant, et compte tenu de la complexité croissante des réseaux électriques, en particulier liée aux charges de plus en plus sensibles ou encore à l'intégration de producteurs autonomes, ces techniques ne permettent pas toujours de répondre au problème posé ; tout prévoir devient utopique. Nous noterons cependant que les avancées récentes dans le domaine de

l'informatique et des réseaux de communication sont progressivement mais sûrement intégrées dans les appareillages électriques, laissant ainsi imaginer de manière sereine des interventions davantage automatisées et à distance.

C'est dans ce contexte particulier que cette thèse se place : il s'agira en effet de développer des méthodes de reconfiguration dynamiques permettant de calculer en ligne des séquences de manœuvres optimales permettant, suite à un défaut isolé, de réalimenter le plus de clients possibles en tenant compte dans un premier temps des coûts temporels de manœuvres (disjoncteurs manuels/automatiques).

Ainsi, pour permettre au réseau de distribution électrique de continuer à remplir sa mission suite à l'occurrence d'un aléa de fonctionnement, le système de téléconduite doit par exemple être en mesure de générer en temps réel de nouvelles configurations des séquences de manœuvres. Les mécanismes décisionnels liés à une telle activité doivent s'appuyer sur des informations précises à la fois sur le réseau électrique considéré et le type de clients desservis. Dans ce cadre, une approche globale partant de l'élaboration d'une méthodologie de modélisation du réseau électrique jusqu'à la spécification d'algorithmes de synthèse de séquences de manœuvres sous optimales a été proposée. L'originalité de l'approche développée dans ce mémoire se décline en trois points :

- premièrement, et suite à une étude comparative entre deux domaines applicatifs, nous avons repris ici à notre compte et étendu une approche de reconfiguration développée initialement dans le cadre des systèmes de production manufacturière ; l'analogie flux électriques et flux de matières étant, en première approche, pertinente.
- deuxièmement, nous avons proposé un nouveau formalisme de modélisation des réseaux électriques issu du domaine du manufacturier favorisant grandement la capitalisation de la connaissance experte, et permettant ainsi, à partir de ce modèle, d'envisager de l'exploiter pour tout changement de configuration, que ce soit suite à une variation de la demande, soit à la présence de défauts dans les ouvrages.
- troisièmement, l'approche développée se prête à la fois dans les phases hors ligne de conception de séquences de manœuvres ; il suffit pour cela de modifier à loisir le modèle du réseau électrique (suppression/rajouts de fiches opératoires) ; ou encore en ligne, lors de l'occurrence d'un défaut. L'algorithme développé est un compromis entre performance temporelle et optimalité de la solution générée privilégiant ainsi son utilisation en temps réel, à savoir en respectant la fenêtre temporelle de dix minutes imposées par les gestionnaires de réseau.

L'ensemble des résultats à ce jour obtenus a été validé sur un réseau réaliste IEEE [KER-2004].

La structure de ce mémoire est organisée autour cinq chapitres dont voici une courte description :

Le premier chapitre présente les réseaux électriques en général et plus précisément le réseau de distribution, cadre de l'étude. Il décrit également le système de conduite du réseau de distribution, que ce soit en fonctionnement normal ou sous défaut. Les différentes solutions de reconfiguration du réseau après défaut sont dévoilées comme éléments de base pour développer notre méthode de reconfiguration.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art centré autour de la reconfiguration des systèmes complexes, ceci dans plusieurs domaines tels que le manufacturier ou les réseaux électriques. Préalablement à cette étude, une terminologie du domaine est tout d'abord proposée. Suite à la présentation de différentes approches, une étude comparative est présentée afin de sélectionner l'approche la plus pertinente vis-à-vis de nos besoins. Notre choix s'est rapidement porté sur une approche de reconfiguration proposée dans le domaine des systèmes de production manufacturière. Elle est basée sur une modélisation issue de la planification automatique et une algorithmique basée la théorie des graphes. La démarche générale pour le problème de reconfiguration d'un réseau de distribution électrique est alors proposée et justifiée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation du formalisme de modélisation que nous proposons pour aider l'expert à capitaliser les connaissances du réseau électrique considéré. Ainsi, les caractéristiques principales du modèle proposé dans les travaux de M. Sébastien Henry sont tout d'abord présentées notamment en termes d'informations à modéliser et de structuration à préconiser. Sur la base d'un tel formalisme, les extensions nécessaires pour adapter le modèle aux caractéristiques des réseaux électriques sont proposées et justifiées. Le formalisme résultat, structuré, intuitif et adapté à la modélisation des systèmes complexes, est également conforté par une démarche de modélisation visant à guider l'expert dans sa phase d'appropriation de la connaissance du système contrôlé considéré.

Le quatrième chapitre est quant à lui consacré à la proposition de la démarche de reconfiguration dynamique des séquences de manœuvres des interrupteurs du réseau électrique. Naturellement fondée sur la structure du formalisme de modélisation proposé dans le chapitre III, les principes généraux de la démarche de reconfiguration sont amenés. Ils se caractérisent d'une part par une proximité forte avec les techniques de recherche de chemins dans un graphe, et d'autre part par la recherche d'un compromis permettant de s'affranchir de

la complexité des graphes d'états à manipuler sans pour autant mettre à mal la performance temporelle de l'algorithme de résolution du problème.

Enfin, le cinquième chapitre présente un exemple d'application basé sur un réseau réaliste comprenant 129 nœuds [KER-2004]. Après avoir présenté les caractéristiques fondamentales de ce réseau réel, ce chapitre applique, pas à pas, l'approche proposée. Ses principaux avantages tels que la modélisation très structurée proposée à l'expert et la capacité de l'algorithme à générer, rapidement, de nouvelles configurations sous-optimales y sont exposées, de la meilleure séquence des manœuvres pour changer la configuration d'exploitation du réseau selon le critère de leur temps d'exécution des opérations. Les résultats obtenus sont très encourageants et donnent des perspectives d'intégration tout à fait réalistes.

Chapitre 1

Réseau de distribution et son système de conduite

1.1 Introduction

Le réseau de transport et le réseau de distribution public (**HTA** et **BT**) assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation. Les points de production correspondent aux sources centralisées et décentralisées qui génèrent l'énergie électrique à partir de différentes énergies primaires comme le nucléaire, l'hydraulique, le charbon,... et désormais aussi le vent, la biomasse, Les points de consommation, en **HTA**-Haute Tension de niveau A, sont constitués par des postes ou des ouvrages à partir desquels l'énergie est distribuée aux clients (abonnés).

Toute rupture de la livraison d'énergie électrique suite à un défaut dans le réseau électrique est donc préjudiciable pour les charges et doit être circonscrite le plus rapidement possible : une procédure de réalimentation doit être mise en place. Cette procédure peut faire appel à une reconfiguration du réseau pour modifier le plus rapidement possible l'aiguillage des flux de puissance.

Mon étude prend place dans le cadre spécifique du réseau de distribution **HTA**. Afin de faciliter la suite de la lecture de ce mémoire, nous allons dans ce premier chapitre présenter les concepts fondamentaux tels que : le réseau de distribution, son système de protection, son système de téléconduite (la surveillance et la commande) ainsi que son rôle dans le processus d'exploitation d'un réseau (la détection, le diagnostic et la reconfiguration) en présence de défauts. Enfin, nous présenterons la problématique générale de la reconfiguration du réseau suite à l'occurrence d'un défaut et les étapes principales de ce processus qui doivent conduire à la réalimentation de tous les clients hormis ceux situés dans la zone de défaut.

1.2 Structure du réseau électrique, réseau de distribution

Avant de nous focaliser sur le réseau de distribution, domaine de notre étude, nous proposons ici de présenter la structure générale du réseau électrique d'un pays afin de mieux appréhender la nature même du problème que nous allons traiter dans ce mémoire.

1.2.1 Structure générale du réseau électrique d'un pays

La structure électrique d'un pays est généralement décomposée en plusieurs niveaux de tension correspondant à différents réseaux électriques (*cf. Figure 1.1*) [CAR-2001]. Cette décomposition est à la fois structurelle et fonctionnelle.

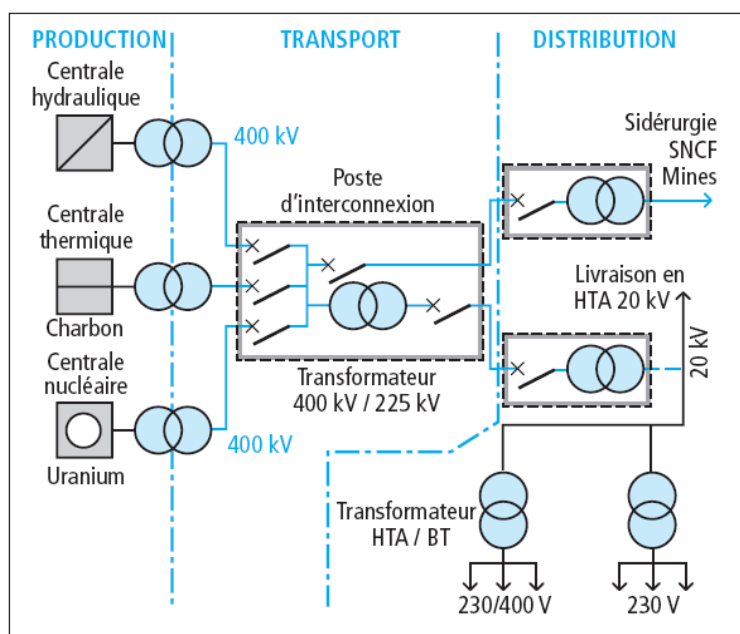


Figure 1.1 : organisation générale d'un réseau électrique

1.2.1.1 Réseau de transport

Ce réseau a la capacité de transporter et de diriger l'énergie électrique sur de grandes distances. Ses lignes atteignent des milliers de kilomètres, par exemple 20 000 km pour le réseau 400 kV français. Les tensions sont généralement comprises entre 225 et 400 kV, quelquefois 1000 kV (par exemple en Chine). La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes car ces lignes sont vitales pour la stabilité et la sécurité du système tout entier. Ce réseau est exploité par un/ou des centres de conduite ou de dispatching à partir desquels l'énergie électrique est

surveillée et gérée en temps réel au niveau national afin de veiller notamment à l'équilibre permanent de la production/consommation.

1.2.1.2 Réseau de répartition

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation. Sa structure est ici aussi généralement de type aérien (parfois souterrain). Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 25 kV et 275 kV. Les protections sont proches de celles utilisées sur les réseaux de transport. Les centres de conduite sont quant à eux régionaux - **ACR** (Agence de Conduite Régionale) en France.

1.2.1.3 Réseau de distribution HTA

Ce niveau dans la structure électrique est le cadre de mon étude. Il sera abordé plus en détails dans la section 1.2.2. Aussi seules quelques caractéristiques sont indiquées ici.

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de consommation **BT** et **HTA**. La structure est de type aérien ou souterrain. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre quelques kV et 40 kV. Les protections sont moins sophistiquées que dans le cas des réseaux précédents. En ce qui concerne leur exploitation, elle peut être assurée manuellement, ou, de plus en plus, par télécommande à partir de centres de conduite fixes et/ou embarqués dans des véhicules [DOU-1995].

1.2.1.4 Réseau de distribution BT

Ce réseau achemine l'électricité du réseau de distribution **HTA** aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés **BT**. Sa structure est de type aérien ou souterrain. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement.

1.2.2 Quelques précisions sur le réseau de distribution HTA

Nous avons ci-dessus mentionné quelques points du réseau de distribution **HTA**. Cette section a pour vocation de les détailler.

1.2.2.1 Topologies des réseaux HTA

Le choix d'une topologie revient à fixer le nombre d'éléments physiques cruciaux dans réseau, des critères et des contraintes techniques. Ce choix est toujours le résultat de

compromis technico-économiques. En réalité, plusieurs topologies existent. Nous citons de manière non exhaustive :

- la topologie boucle fermée, de type maillée,
- la topologie boucle ouverte, de type maillée simplifiée,
- la topologie boucle ouverte, de type radial [SCH-2001].

Généralement, les distributeurs s'appuient sur deux topologies de base : radiale et boucle ouverte. Chacune de ces deux topologies sera approfondie dans la suite de cette partie.

a. Schéma radial

Ce schéma est aussi appelé en antenne. Son principe de fonctionnement repose sur une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation (encore appelé un nœud) sur un tel schéma ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Cette structure est de type arborescent (*cf. Figure 1.2*) [SCH-2001].

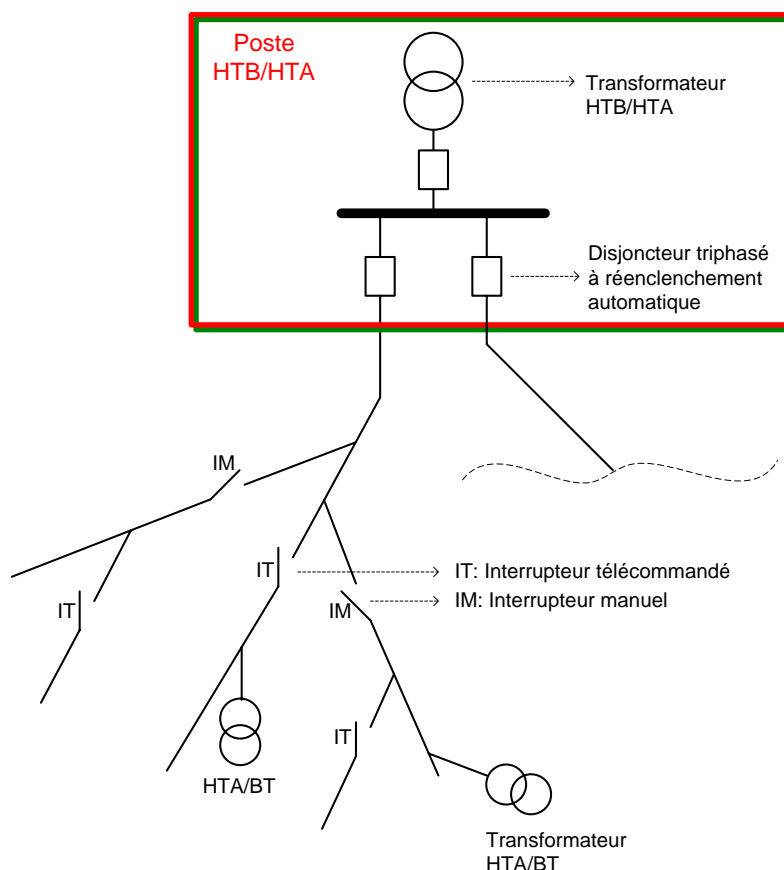


Figure 1.2 : schéma de base d'un réseau de distribution HTA radial

Cette arborescence prend naissance au niveau des postes sources (les postes de transformation **HTB/HTA** ou **HTA/HTA**). Ce schéma est généralement utilisé pour le réseau

HTA en rural. Il a une structure simple, facile à exploiter et le coût de construction est moindre. Il permet d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge ($>10\text{kVA}$) largement répartis géographiquement ($>100\text{ km}^2$). Très souvent, un schéma radial est de type aérien.

b. Schéma boucle ouverte (schéma de la coupure d'artère)

Son principe de fonctionnement s'appuie sur deux voies d'alimentation. Cela signifie que tout point de consommation sur cette structure peut être alimenté par deux chemins électriques possibles. A un instant, seul un de ces deux chemins est activé, un autre est appelé le chemin de secours. Dans un tel schéma, il y a toujours un point d'ouverture dans la boucle (cf. Figure 1.3) [SCH-2001].

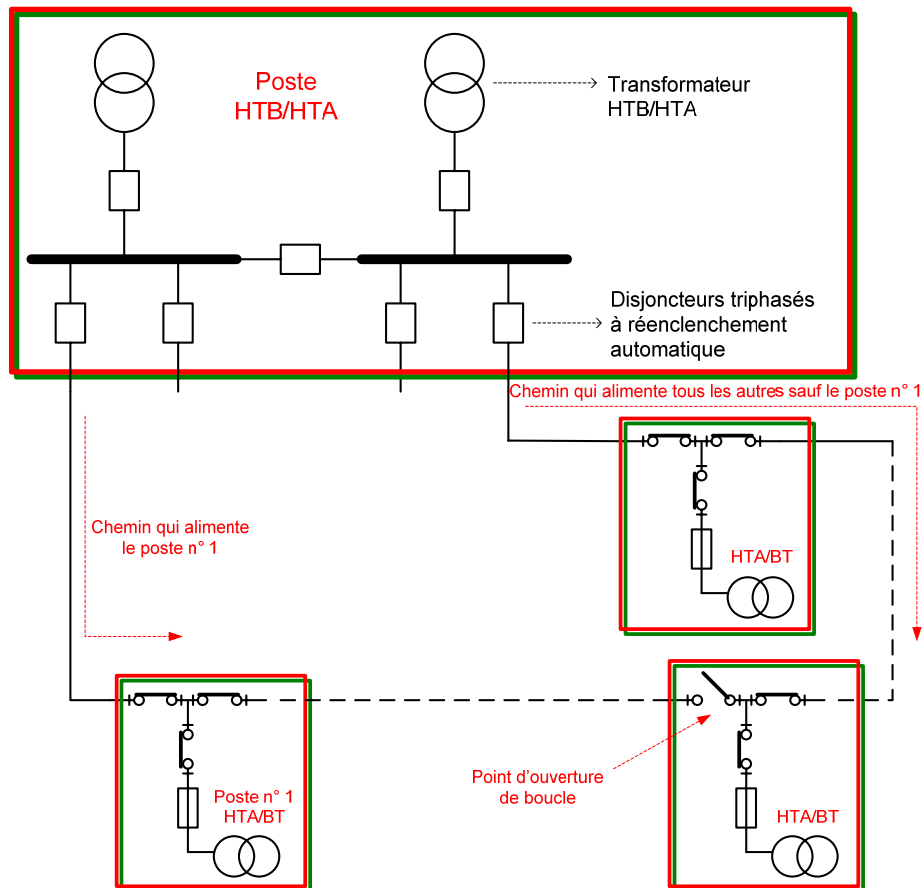


Figure 1.3 : schéma de base d'un réseau de distribution HTA en boucle ouverte

Le schéma correspond à une boucle sur laquelle les points de consommation sont connectés. Ces points peuvent être des postes de distribution publics **HTA/BT**, et/ou des postes de livraison pour un abonnement **HTA**. Chaque point est raccordé sur la boucle par deux interrupteurs **HTA**. Tous ces interrupteurs sont fermés, sauf un qui constitue le point

d'ouverture de la boucle. Ce point d'ouverture peut être déplacé dans la boucle, en particulier lors des manœuvres de reconfiguration du réseau faisant suite à un défaut ou pour modifier la configuration pour réduire les pertes [ENA-2007]. Une telle manœuvre consistant à « transférer » une charge d'un départ à un autre départ porte le nom de transfert de charges.

Très souvent, ce schéma est associé à une distribution de type souterrain. Il est typiquement utilisé en milieu urbain à forte densité. Ce schéma tend à devenir le plus courant dans les structures de départ [ALV-2009].

c. Points forts et points faibles de deux schémas

Deux schémas ont été abordés ci-dessus et sont souvent utilisés pour exploiter le réseau de distribution. Chacun présente des avantages et des inconvénients. Ceux-ci sont montrés dans le *Tableau 1.1*.

Tableau 1.1 : comparatif des deux schémas de base de réseaux HTA

Technologie	Points forts	Points faibles
Radiale	<ul style="list-style-type: none"> • Structure simple • Exploitation facile • Coût d'installation faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune capacité de reconfiguration • Qualité de service faible
Boucle ouverte	<ul style="list-style-type: none"> • Structure simple • Capacité de reconfiguration • Qualité de service haute 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploitation avec plus de manœuvres • Coût d'installation plus élevé

Le schéma radial révèle une grande insuffisance par rapport au schéma de boucle ouverte pour la qualité de service quand il y a un défaut. Dans ce cas-là, le schéma boucle ouverte peut permettre de reconfigurer la structure du réseau pour réalimenter des zones saines hors tension (des zones qui ne contiennent pas le défaut mais qui sont non alimentées à cause du défaut) via des chemins de secours ; ce qui est impossible pour le schéma radial. Dans le cas de notre étude, nous nous intéressons seulement à ce deuxième schéma «Boucle ouverte» qui a la possibilité d'autoriser la reconfiguration de la structure du réseau.

1.2.2.2 Composants dans un réseau HTA

Cette section va présenter les principaux composants qui sont présents dans un réseau HTA comme les postes sources, les appareils et les lignes.

a. Postes sur les réseaux HTA

Un poste ou ouvrage est une entité physique définie par sa localisation et ses fonctionnalités dans les réseaux électriques. Le rôle d'un poste est d'assurer la transition entre deux niveaux de tension et/ou d'alimenter l'utilisateur final.

Dans les réseaux, il existe plusieurs types de poste comme le poste **HTB/HTA** (≈ 63 ou $90 \text{ kV}/\approx 20 \text{ kV}$), le poste **HTA/HTA**, le poste **HTA/BT** ($\approx 20 \text{ kV}/\approx 400 \text{ V}$) ou le poste de livraison à un abonné **HTA** [SCH-2001].

b. Appareils de manœuvre HTA

L'appareillage **HTA** permet de réaliser les trois fonctions de base (cf. *Tableau 1.2*) :

- la *sectionnement* qui consiste à isoler une partie d'un réseau pour y travailler en toute sécurité,
- la *coupure* qui consiste à ouvrir ou à fermer un circuit dans ses conditions normales d'exploitation,
- la *protection* qui consiste à isoler une partie d'un réseau en situation anormale quand il y a un dépassement d'un seuil limite sur une variable surveillée (le courant généralement).

Tableau 1.2 : différentes fonctions des appareils HTA utilisés en distribution

appareils fonction	sectionneur	interrupteur	disjoncteur	interrupteur - sectionneur
sectionnement	●			●
coupure		●	●	●
protection			●	

Parmi tous les appareils existants, deux sont plus particulièrement utilisés dans réseau **HTA**, ce sont le disjoncteur et l'interrupteur. Ils sont presque toujours complétés par d'autres appareils (unités de protection et contrôle-commande, capteurs de mesure,...) qui composent leurs équipements associés.

• Disjoncteurs HTA

La fonction principale du disjoncteur est la protection. Il peut également assurer la fonction d'interrupteur. Les disjoncteurs sont souvent utilisés dans réseau **HTA**. Ils peuvent fonctionner sous ou hors tension, en mode manuel ou télécommandé. La *Figure 1.4* ci-dessous présente un disjoncteur type 3AH5, 12 - 36 KV de Siemens [POL-1999].



Figure 1.4 : disjoncteur HTA de Siemens 3AH5 Vacuum

- **Interrupteurs HTA**

Cet appareil, dont la fonction principale est la coupure, peut aussi assurer la fonction de sectionnement. Il est opéré à distance ou en manuel. Deux types d'interrupteur sont employés dans les réseaux :

- les interrupteurs sans pouvoir de coupure (interrupteur *cf.* Figure 1.5) sont utilisés afin de sectionner ou d'acheminer entre des sections dans des départs. Ce type d'interrupteur peut être seulement manœuvré hors tension,
- les interrupteurs avec pouvoir de coupure (interrupteur – sectionneur) sont des interrupteurs spéciaux, ils peuvent être manœuvrés sous tension. Ils sont utilisés comme des dispositifs de coupure de secours. En effet, ces interrupteurs sont des disjoncteurs sans fonction de protection.



Figure 1.5 : interrupteur HTA sans pouvoir de coupure installé sur un pylône

- **Paramètres d'opération des appareils HTA**

Un élément doit être pris en compte dans le processus de reconfiguration : les paramètres d'opération des appareils de coupure. Les experts doivent se préoccuper des paramètres

comme : la tension assignée, le nombre de manœuvres en charge (ouverture/fermeture), la durée des manœuvres (ouverture/fermeture), le pouvoir de coupure et de fermeture des appareils. Le *Tableau 1.3* présente ces paramètres pour les appareils de coupure RM6 - Schneider Electric et le NXA 24 - ABB (*cf.* [RAP-2006], [ABB-2008] et [ENA-2007]).

Tableau 1.3 : quelques paramètres de deux appareils de coupure HTA

paramètres	appareils	RM6 – Scheider Electric	NXA 24 - ABB
Tension assignée [kV]		24	24
Pouvoir de coupure [A]		630	630
Pouvoir de fermeture [kA]		50	40
Temps de fermeture [sec]		≈ 0.5	≈ 0.5
Temps d'ouverture [sec]		≈ 0.15	≈ 0.15
Endurance mécanique/ électrique (en charge) [O/F]		1000/100	5000/400

c. Lignes HTA

Les lignes dans un réseau jouent le rôle de vecteur de transmission de l'énergie d'un poste source aux clients. Il existe deux types de ligne : la ligne aérienne et la ligne souterraine. Chaque ligne a des paramètres qui représentent la capacité de conduction de l'énergie.

1.2.2.3 Défaits dans le réseau HTA

Nous considérons dans nos travaux les défauts dans les réseaux. Dans ce paragraphe, nous allons examiner leurs causes et les différents types de défauts existant dans les réseaux **HTA**.

L'apparition d'un incident sur le réseau peut provenir de plusieurs causes différentes [PHA-2005] :

- électriques : comme par exemple l'altération des isolants des matériels de réseau. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc à des courts-circuits.

- atmosphériques : les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.
- mécaniques : la chute d'un corps solide sur un conducteur ou une agression extérieure par des engins de terrassement constituent ce type de causes.
- humaines : ce sont les fausses manœuvres telles que l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple.

Nous trouvons plusieurs catégories de défauts dans les réseaux **HTA**. Ceux-ci sont caractérisés par leur type, leur durée et l'intensité du courant de défaut. On distingue [PHA-2005] :

- des défauts triphasés : ce sont les courts-circuits entre les trois phases avec ou sans mise à la terre (cf. *Figure 1.6.a*),
- des défauts biphasés : ce sont les courts-circuits entre deux phases avec ou sans mise à la terre (cf. *Figure 1.6.b, c*),
- des défauts monophasés : ce sont des défauts entre une phase et la terre ou une phase et le neutre. Leur intensité est limitée par la résistance de terre et par la mise à la terre du neutre (cf. *Figure 1.6.d*).

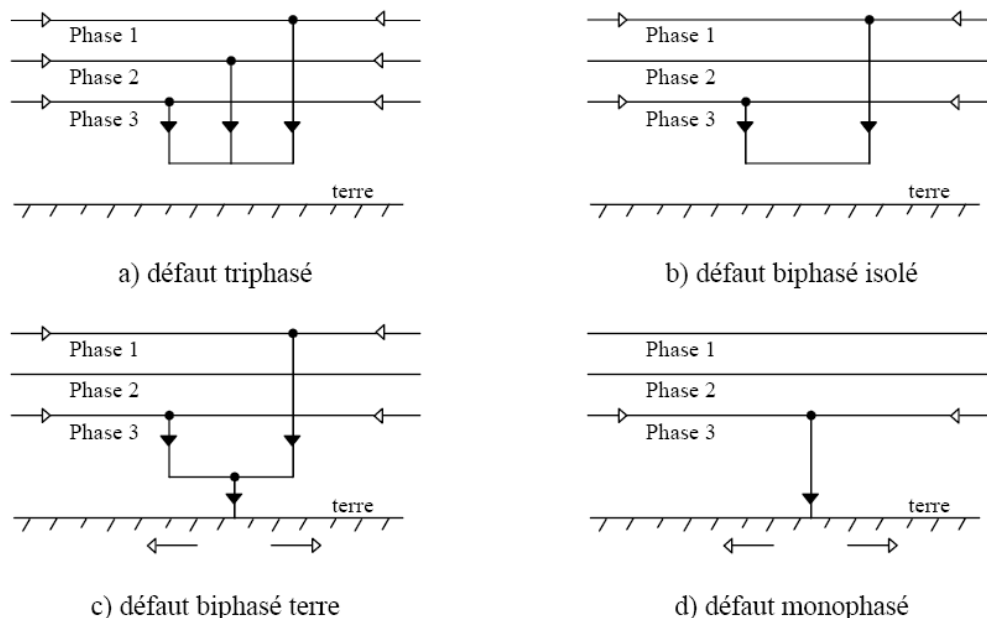


Figure 1.6 : différents types de défauts

En réalité, chaque type de défaut a des caractéristiques différentes. Le *Tableau 1.4* présente quelques caractéristiques relatives aux défauts et aux types de conducteurs considérés [OTT-2002].

Tableau 1.4 : principales caractéristiques des défauts au niveau de tension HTA

Type de réseau	Principales causes des défauts	Principaux de types	Occurrence des défauts HTA
Aérien	Conditions climatiques, amorçages avec des corps extérieurs	Monophasés Fugitifs	Fréquents (70%)
Souterrain	Avaries de matériels; Impacts avec des engins de terrassement	Monophasés Permanents	Peu fréquents

1.2.3 Fonctionnement en sécurité et qualité de la fourniture

1.2.3.1 Fonctionnement en sécurité d'un réseau

Dans l'exploitation des réseaux, un réseau « fonctionne en sécurité » s'il n'y a pas de surcharges sur les lignes et si la valeur de la tension sur les nœuds est contenue dans une plage admissible :

- la plage admissible de la tension dans les nœuds d'un réseau de distribution est $\pm 5\% U_N$ (U_N est la tension nominale du réseau) en fonctionnement normal. En fonctionnement en cas de défaut, cette plage devient $- 5\%/+ 8\%U_N$ [ERD-2008].
- Une ligne d'un réseau est dite « surchargée » si le courant (ou la puissance active) de cette ligne dépasse la limite maximum I_{\max} (ou P_{\max}) de la ligne considérée.

1.2.3.2 Qualité de fourniture en électricité

La raison d'être des distributeurs d'énergie électrique est de fournir de l'énergie électrique aux consommateurs en tenant compte de plusieurs critères tels que : la continuité et la qualité de service, la sécurité des matériels et des personnes, la souplesse et le confort d'exploitation, la compétitivité commerciale.

De plus en plus, la qualité de fourniture d'électricité doit être améliorée en réduisant les coupures d'alimentation en nombre et en durée vis-à-vis des clients, en minimisant les conséquences, etc.

Un indice, appelé « Critère B », représentant la durée annuelle moyenne de coupure brève d'un client **BT**, constitue un des critères de performance de la gestion des temps de coupure des clients. Le distributeur cherche toujours à obtenir la durée la plus faible pour cet indice

(cf. *Tableau 1.5*) [ERD-2008] [ERD-2002]. Notre étude vise à aider les exploitants à optimiser encore la valeur de ce critère.

Tableau 1.5 : contraintes "qualité" d'un distributeur

Paramètres	Valeurs nominales	Valeurs admise
Coupure brève	(1 sec ÷ 3 mins)	Pas de limite normalisée
Coupure longue	(> 3 mins)	Pas de limite normalisée
Critère B	(57mins en 2002, 71mins en 2006, 60mins en 2007)	

1.3 Système de protection et réactions face aux défauts

Dans cette section, le lecteur trouvera des informations sur le système de protection du réseau de distribution, son évolution au cours du temps et ses réactions face aux défauts.

1.3.1 Système de protection des réseaux HTA

Aujourd'hui, tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour le protéger en cas de défaut. Le réseau **HTA** n'est pas une exception. L'ensemble des chaînes de protection d'un réseau (cf. section 1.3.1.1) forme le système de protection.

1.3.1.1 Chaîne de protection

Chaque départ est généralement protégé par un disjoncteur en association avec des dispositifs de détection (capteur de mesure), de protection et de contrôle-commande (unité de protection), et de déclenchement (actionneurs). L'ensemble de ces éléments constitue une chaîne de protection (cf. *Figure 1.7*) qui assure l'isolation de la partie défaillante du réseau.

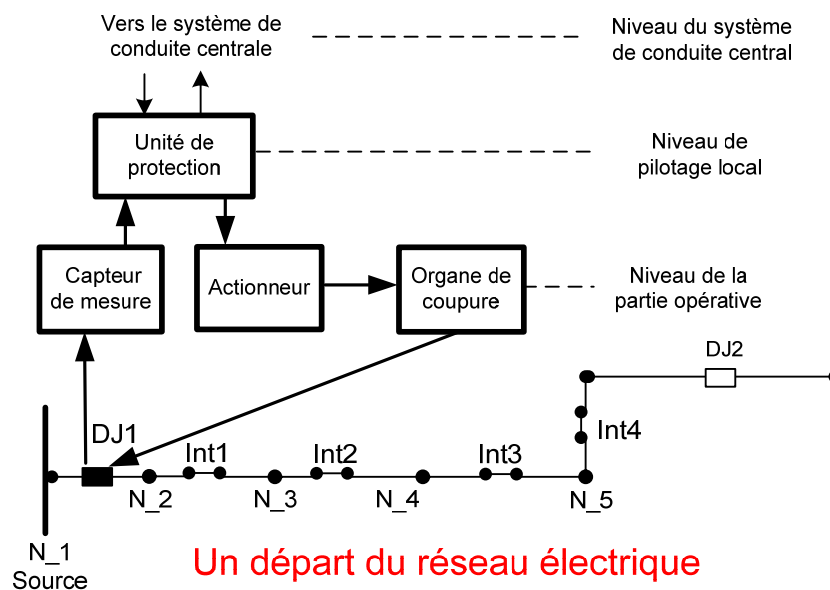


Figure 1.7 : chaîne de protection HTA

Dans une chaîne de protection, l'unité de protection joue le rôle de la commande locale. Une unité de protection, ou relais **HTA**, surveille en permanence les divers paramètres d'une partie d'un réseau (les valeurs des grandeurs électriques de ligne, de câble ou de transformateur) qui lui sont fournies par les capteurs de mesure, et donne les ordres de fonctionnement aux circuits de déclenchement, pour agir en situation anormale. De plus en plus cette unité peut échanger des informations avec le système de pilotage du réseau afin de l'exploiter plus efficacement.

1.3.1.2 Nouvelles technologies utilisées dans les systèmes de protection HTA

L'amélioration des technologies numériques à base de microprocesseurs, des technologies de télécommunication et l'avènement de l'informatique s'est traduite par une évolution significative des matériels pour les systèmes de protection du réseau **HTA**. Les matériels disponibles à ce jour reposent sur trois technologies : électromécanique, analogique et numérique. Ils visent toujours des caractéristiques comme : la flexibilité (le choix des protections se fait par une simple programmation), la paramétrabilité (choix de réglages étendu), la fiabilité (elles sont équipées d'auto-surveillance) et l'économie (les coûts de câblage et le temps de mise en œuvre sont réduits).

Une des nouvelles fonctions très importante des matériels de protection réside dans l'intégration de fonctions supplémentaires telles que la télésurveillance, la télécommande, ou

la téléconduite etc. (cf. section 1.4.1 de ce chapitre). Profitant de cette capacité à communiquer, une véritable conduite globale de réseau est maintenant réalisable, à distance.

1.3.2 Réaction du système de protection lors d'un défaut

En fonctionnement normal, le réseau est exploité sous une configuration dont l'état mécanique des ressources (**Disj** ou **Int**) et l'état électrique des nœuds sont déterminés. Le réseau fonctionne en sécurité, c'est-à-dire qu'avec cette configuration, il n'y a ni surcharge sur les lignes ni aucune chute de tension dépassant la limite admissible (cf. section 1.2.3.1).

Lors de l'occurrence d'un défaut dans un départ, le disjoncteur de protection du départ s'ouvre et le départ est alors mis hors tension pour éliminer le défaut. L'état du réseau après la réaction du système de protection est le suivant (cf. Figure 1.8) :

- le disjoncteur au début du départ en défaut est ouvert (par exemple, le Disj4),
- la partie en défaut du réseau est hors tension. Les clients dans ces parties sont donc hors tension,
- la partie saine (départs ne contenant pas le défaut) est sous tension. Les clients de cette partie sont toujours alimentés.

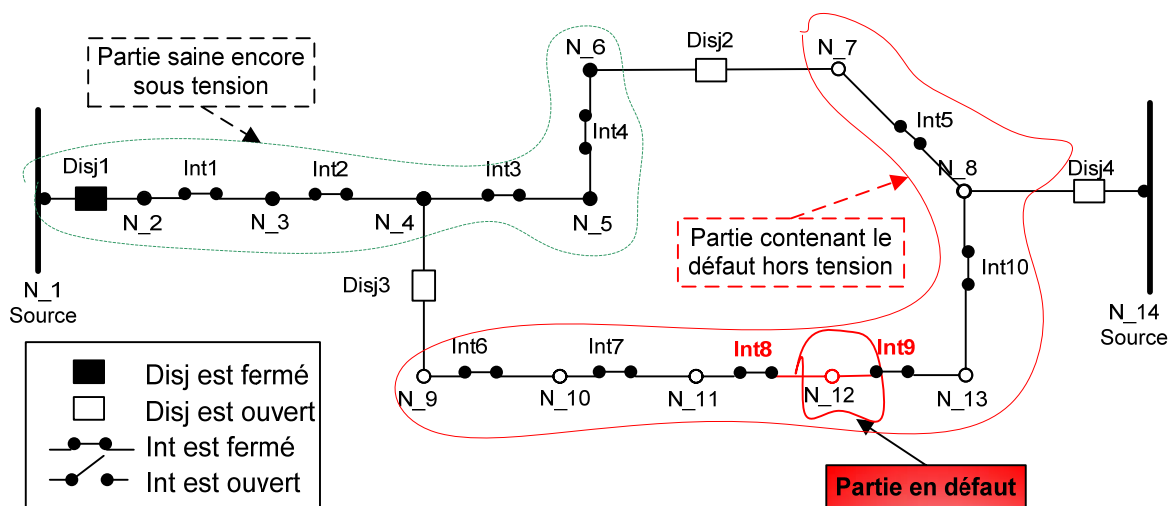


Figure 1.8 : état du réseau après le défaut

1.4 Conduite du réseau HTA et son rôle dans le processus de reconfiguration

Les systèmes de conduite des réseaux actuels permettent donc désormais d'envisager un pilotage plus complexe et performant intégrant des fonctionnalités telle que la supervision, la surveillance, le diagnostic ou encore la reconfiguration, le tout à distance. Dans cette section, nous allons préciser quelques notions comme : la conduite du réseau HTA (les missions de la conduite d'un réseau), le centre de téléconduite dans un réseau HTA et le rôle de ce système dans le processus d'exploitation d'un réseau.

1.4.1 Conduite du réseau HTA

La conduite du réseau **HTA** s'effectue depuis des centres de conduite via un système de pilotage qui peut fonctionner automatiquement ou/et sous la surveillance des opérateurs. Dans un système de pilotage, des appareils dits « intelligents » sont responsables de collecter les informations ainsi que d'envoyer des ordres aux dispositifs du réseau. Ces appareils intelligents peuvent aussi échanger des informations avec d'autres appareils du même niveau ou à un autre niveau du système de pilotage via un système de communication.

Il s'agit généralement d'un système de conduite (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition) permettant de :

- de commander les organes de coupure (disjoncteurs, interrupteurs) - **télécommande**.
- de connaître l'état de ces organes - **télésurveillance**,
- de mesurer certaines grandeurs (tension, intensité, fréquence) - **télémesure**,
- de communiquer les informations - **télécommunication**,
- de signaler les dysfonctionnements pour l'opérateur d'exploitation - **télésignalisation**.

Dans la pratique, ces fonctions peuvent se diviser en deux groupes liés au sens de transmission de l'information entre l'exploitant et le réseau : télésurveillance, des appareils vers l'exploitant et télécommande, de l'exploitant vers les appareils (*cf. Figure 1.9*).

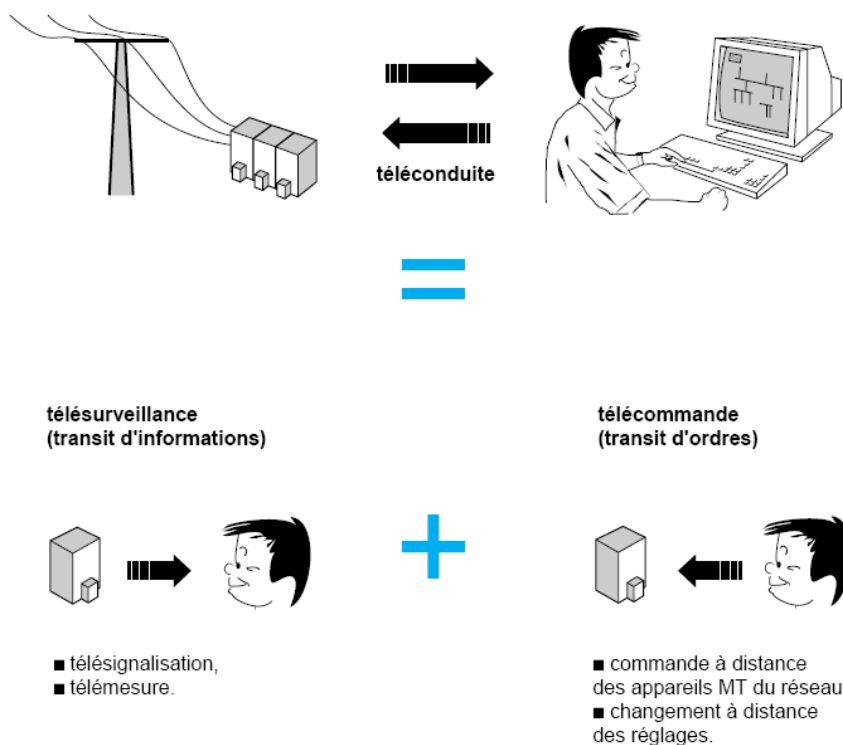


Figure 1.9 : notions de télécommande et de télésurveillance [PUR-1991]

1.4.1.1 Télésurveillance

Elle regroupe toutes les signalisations du réseau comme le déclenchement ou l'enclenchement éventuel des appareils, la mesure des consommations instantanées ou pondérées dans les différentes parties du réseau électrique, et toute autre information permettant de connaître l'état réel du réseau.

Aujourd'hui, la télésurveillance a la capacité d'analyser et de faire la synthèse des informations reçues afin de fournir automatiquement et en continu toutes les informations nécessaires pour conduire le réseau en temps réel, ou pour en effectuer une analyse et/ou des commandes (par exemple, la reconfiguration du réseau après un défaut). De surcroît, à partir des informations de télésurveillance, l'exploitant peut visualiser des schémas d'exploitation, les valeurs des grandeurs d'exploitation (courants, tensions, puissances, ...), les valeurs de réglage des protections **HTA**, le contenu détaillé des alarmes, leur chronologie d'apparition, etc.

1.4.1.2 Télécommande

La commande à distance de l'ouverture ou de la fermeture des appareils de puissance est l'exemple élémentaire de la télécommande. L'application pratique en est les interrupteurs et

les disjoncteurs **HTA** télécommandés. D'autres actions peuvent être accessibles au travers de la télécommande comme des réglages paramétriques, des commandes d'automatisme, etc.

Les ordres de télécommande doivent être exécutés avec la garantie de grande fiabilité-sûreté du succès [BEL-2007]. Cette garantie peut être obtenue par l'utilisation d'un réseau de communication permettant de disposer des informations nécessaires en temps réel. Ainsi un ordre de manœuvre d'un appareil **HTA** est transmis via une télécommande double (**TCD**) afin d'augmenter la précision de transmission d'information et est confirmé par le retour d'une télésignalisation double (**TSD**). Les procédures de télécommande intègrent également des demandes de validation et de confirmation avant l'exécution d'un ordre de manœuvre.

1.4.2 Centre de téléconduite

Un centre de téléconduite correspond à la centralisation d'informations issues d'autres postes de conduite fixes, ou mobiles (embarqués dans un véhicule), des **RTUs** (**R**emote **T**erminal **U**nits),... qui constituent un système de contrôle-commande (cf. *Figure 1.10*). Les informations sont échangées par le système de communication.

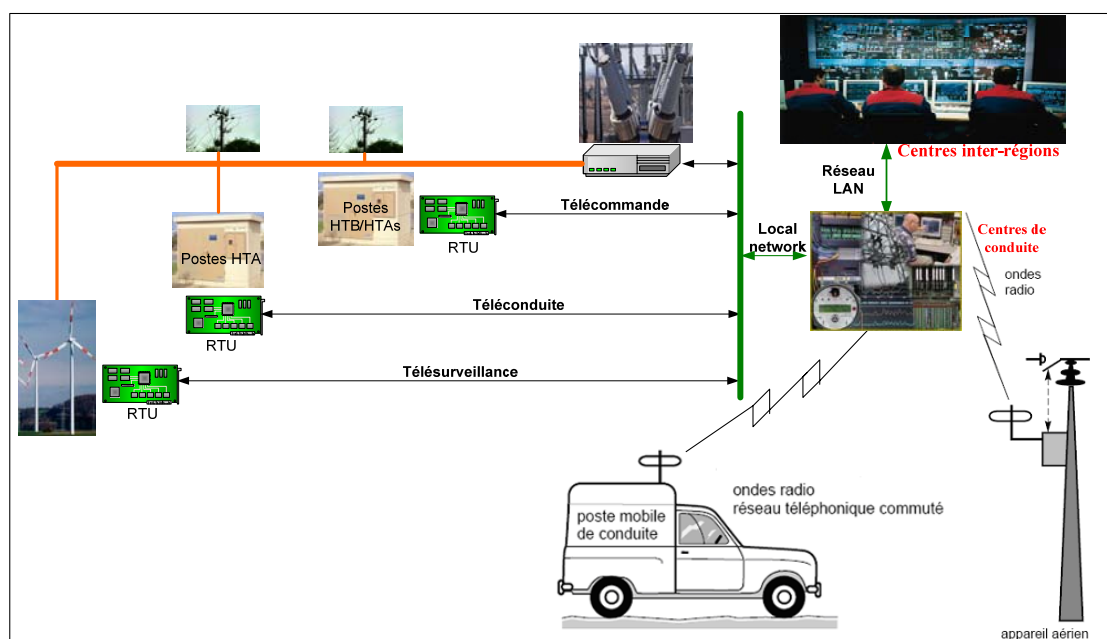


Figure 1.10 : architecture de téléconduite d'un réseau HTA

1.4.2.1 Architecture d'un système de contrôle – commande en HTA

L'architecture d'un système de contrôle-commande définit : les fonctions à réaliser, leurs niveaux hiérarchiques et leur localisation géographique.

L'architecture dans la littérature (encore utilisée aujourd'hui dans la plupart des réseaux de distribution) est décrite au travers du concept de "Computer Integrated Manufacturing" (CIM) [WIL-1989] en particulier les quatre niveaux temps réel (cf. Figure 1.11) [ZAM-2009].

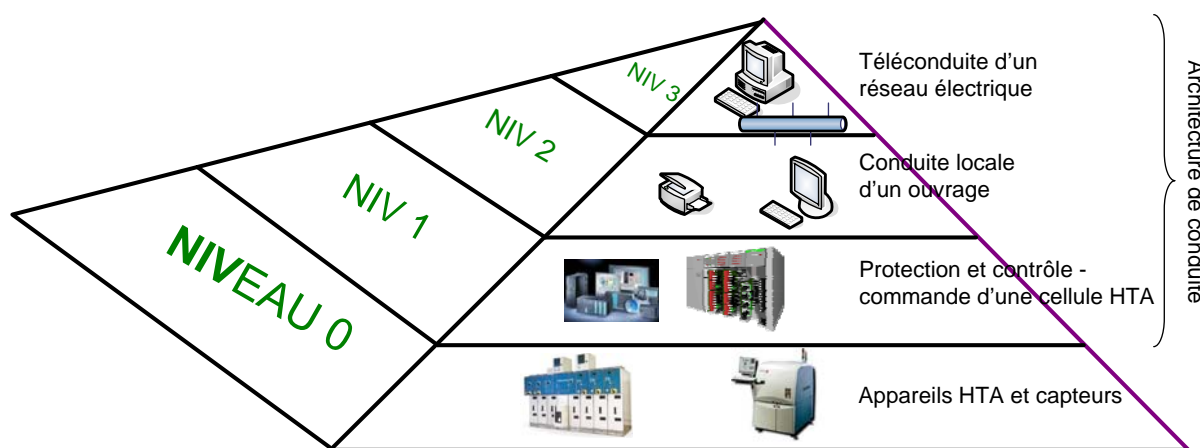


Figure 1.11 : différents niveaux hiérarchiques des fonctions du contrôle – commande HTA

L'ensemble constitue une architecture de contrôle – commande **HTA** dont le fonctionnement repose sur de nombreux échanges d'informations entre les différents niveaux hiérarchiques. Ces informations sont essentiellement : des téléseignalisations, des télémesures, des télécommandes.

1.4.2.2 Réseau de communication

Pour échanger des informations entre les centres de téléconduite et les points d'information, il est nécessaire de s'appuyer sur des réseaux de communication. Tous ces échanges sont regroupés dans la fonction télétransmission définie par : son organisation, ses supports matériels et ses règles de communication. L'ensemble de ces paramètres devant permettre de garantir que tout message émis est reçu correctement (sans erreur) est appelé norme de communication ou protocole de communication.

Aujourd'hui, il existe plusieurs normes de transmission comme : IEC 870-5-101, DNP3.0, Modbus, Profibus, Radio, etc. Dans le Tableau 1.6, nous comparons quelques caractéristiques de trois de ces normes, qui sont généralement utilisées dans la conduite des réseaux électriques [MAK-2003].

Tableau 1.6 : comparaison entre trois normes de communication

Caractéristiques	IEC 870 – 5 – 101	DNP 3.0	Modbus
Norme	Norme IEC (1995) Modification 2000, 2001)	Norme d'Industrie ouverte (1993)	non
Architecture	5 niveaux	6 niveaux	3 niveaux
Mode de communication	Point à point, multipoint à point, point à multipoint	Multi maîtres, multi esclaves, point à point,	Point à point, TCP/IP, Ethenet
Ouvert pour autres solutions codées	Non disponible	Oui	Oui

1.4.3 Rôle du système de conduite face à un défaut

Au niveau de l'exploitation du réseau électrique, les centres de téléconduite amènent naturellement des gains économiques, augmentant le niveau de sûreté, et surtout la qualité de service grâce à l'amélioration considérable de la réactivité de l'exploitant et la vision globale qui est restituée.

S'il y a un défaut, un système de conduite peut :

- détecter le défaut en se basant sur le système de protection du réseau (cf. section 1.3.2),
- diagnostiquer le défaut (localiser en consultant à distance les indicateurs de localisation de défaut (**IPD - Indicateur de Passage de Défaut**) installés en différents points du réseau **HTA**, isoler le point de défaut en agissant sur les interrupteurs/disjoncteurs **HTA** télécommandés [PHA-2005] [AND-2002],
- changer rapidement la configuration d'exploitation du réseau pour réduire la partie de réseau non alimentée (reconfiguration d'un réseau suite à un défaut).

Il en résulte aussi, d'une part, une forte réduction de l'énergie non distribuée et du critère B, et, d'autre part, une optimisation de ce réseau avec les possibilités de gérer au mieux la répartition des charges et une amélioration de l'efficacité dans le processus de conduite du réseau. L'opérateur peut disposer rapidement de l'information la plus pertinente par un pré-traitement du système automatique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons au troisième point mentionné : la reconfiguration d'un réseau après un défaut. La section suivante se propose de présenter en détail ce problème.

1.5 Reconfiguration du réseau après un défaut

Suite à l'occurrence d'une défaillance et à la détection du défaut (cf. section 1.3.2), une phase de diagnostic est lancée afin de localiser et d'isoler la zone de défaut (méthodes de détection et localisation de défauts [PHA-2005] [AND-2002]).

L'état du réseau suite à détection, localisation et isolation est généralement décrit par (cf. *Figure 1.12*) :

- le disjoncteur au début du départ en défaut est ouvert (par exemple, le Disj4),
- la partie en défaut (zone délimitée) est connue. Les interrupteurs au début et à la fin de la partie en défaut sont ouverts. La partie de défaut est isolée,
- quelques parties saines dans le réseau sont hors tension (cf. *Figure 1.12*). Les clients dans ces parties sont appelés les clients sains hors tension. Ces parties sont généralement des départs adjacents qui servent de secours au départ en défaut,
- quelques parties saines dans le réseau sont sous tension (cf. *Figure 1.12*). Les clients dans ces parties sont appelés les clients sains sous tension,
- les états des dispositifs de coupure (télécommandé ou manuel...), des charges, des lignes sont identifiés,
- la structure du réseau (topologie, charges,...) est connue.

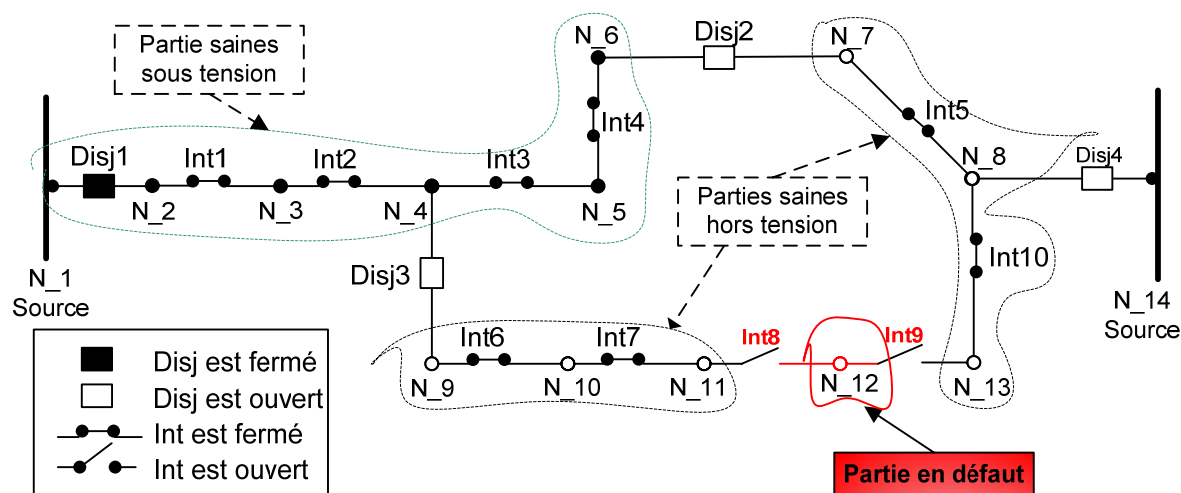


Figure 1.12 : état du réseau après le défaut

Cet état (cf. Figure 1.12) est le point de départ du processus de reconfiguration d'un réseau après un défaut (cf. section 1.4.3).

Notre problème consiste alors à chercher le plus rapidement possible une solution (le point d'arrivée, c'est-à-dire l'état du réseau visé, et le chemin pour atteindre le point d'arrivée à partir du point de départ) pour reconfigurer le réseau une fois le défaut détecté, localisé et isolé. Ce problème peut être décomposé en deux sous - problèmes présentés ci-dessous.

Le **premier - sous problème** est de rechercher une nouvelle configuration exploitable après le défaut (cf. Figure 1.13) afin que tous les clients sains hors tension soient réalimentés.

Qu'est-ce qu'une configuration exploitable (configuration de secours admissible) ? C'est une nouvelle configuration qui respecte au moins les critères suivants :

- tous les clients sains hors tension sont réalimentés,
- le réseau fonctionne en sécurité sous cette configuration.

Cependant, déterminer une nouvelle configuration respectant ces critères ne garantit pas qu'elle soit atteignable. Pour atteindre la nouvelle configuration, il faut changer l'état mécanique des appareils de coupure (des manœuvres de fermeture ou d'ouverture) en respectant une séquence satisfaisant les contraintes de manœuvre de ces appareils. Cela pose donc un problème supplémentaire à savoir est-ce qu'il existe une séquence de manœuvres permettant d'amener le réseau dans une configuration respectant ces critères.

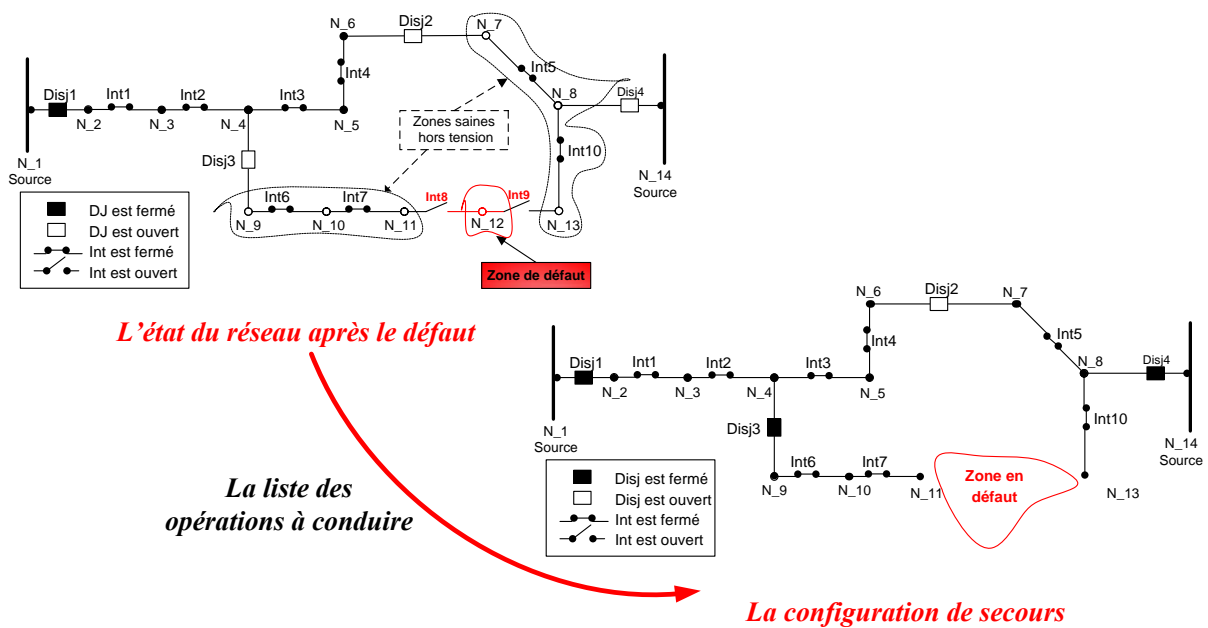


Figure 1.13 : reconfiguration du réseau après un défaut

Aussi, le **deuxième sous - problème** réside dans la construction d'une séquence des manœuvres permettant de passer la configuration du réseau de la configuration après le défaut à la nouvelle configuration exploitable que nous venons de trouver (*cf. Figure 1.13*). Cette séquence est utilisée pour reconfigurer le réseau après le défaut.

1.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le contexte général de notre étude. Il s'est agi essentiellement de présenter les notions de base du monde des réseaux électriques, en particulier la partie opérative qui est constituée de lignes, de centre de production d'énergie et d'éléments de protection permettant d'assurer la sécurité intrinsèque d'un tel ouvrage. Après quoi, nous avons proposé au lecteur d'introduire le concept d'aléas de fonctionnement, ce qui nous a progressivement amené à positionner notre problématique, à savoir la reconfiguration des réseaux électriques suite à la détection d'un défaut, sa localisation et son isolement. Sur la base d'un tel chapitre, nous proposons maintenant au lecteur un état de l'art multi domaine traitant de la problématique de la reconfiguration.

Chapitre 2

Etat de l’art : reconfiguration des systèmes complexes

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons été amenés à préciser le périmètre de nos travaux de recherche. Ils se localisent en particulier au niveau de la reconfiguration des réseaux de distribution électriques afin de garantir qu’après un défaut, le maximum de clients du réseau puisse bénéficier encore du droit à l’énergie électrique. Nous parlerons désormais de lois de commande. Pour cela, il s’agira, en temps réel, de concevoir à la volée de nouvelles séquences de manœuvres (loi de commande) afin de positionner le réseau dans la configuration répondant aux besoins.

Fort de ce contexte, nous nous proposons maintenant de dresser un état de l’art centré autour de la problématique de la reconfiguration. Pour cela, et compte tenu du fait que cette problématique est peu traitée de manière automatisée dans le domaine des réseaux électriques, nous l’avons ouvert à d’autres domaines, tel que par exemple les systèmes de production manufacturières, où le flux à manipuler n’est évidemment pas électrique mais de la matière première.

Mais préalablement à cette étude bibliographique, il nous est apparu nécessaire de préciser le vocabulaire sur lequel nous nous appuierons tout au long de ce mémoire.

2.2 Terminologie

Dans le cadre de cette section, nous proposons au lecteur un ensemble de définitions du domaine de la reconfiguration des systèmes industriels complexes. Elles sont essentiellement basées sur une étude terminologique [COM-2000] [NIE-2002] issue du **GT INCOS** (Groupe de Travail **IN**génierie de la **CO**mmande et de la **S**upervision des **SED**) du **GDR MACS** (Groupement de **R**echerche, **M**odélisation, **A**nalyse et **C**onduite des **S**ystèmes dynamiques). La transposition aux systèmes électriques sera ensuite effectuée plus loin dans ce mémoire.

Il est illusoire de considérer qu'un appareillage réel exécute toujours correctement le service qui lui est demandé. Dans ce cas, il s'agit de traiter l'occurrence de défaillances de la partie opérative. Cependant, cette classe de problèmes n'est pas la seule à devoir être prise en compte. En effet, si nous prenons l'exemple d'un système complexe constitué de plusieurs centres de commande interconnectés via un réseau de communication, lorsque ce dernier est victime d'une rupture le rendant incapable de remplir son rôle, le système de commande est alors en panne. Traiter ce type de défaillances relève entièrement de la sûreté de fonctionnement. La mise en œuvre du principe de redondance matérielle (doublage du réseau de communication, des calculateurs, etc.) est souvent préconisée. Cependant, retenons dès à présent que nous ne nous intéresserons pas dans la suite de notre mémoire à cette dernière classe de défaillances. Seules les défaillances de la partie opérative retiendront toute notre attention. Cette précision étant faite, nous nous proposons maintenant de clarifier la terminologie du domaine.

2.2.1 Termes généraux

Avant d'aller plus avant dans la terminologie, il est nécessaire de bien s'accorder sur les concepts liés à la remise en cause d'une décision.

- **La faute** : action, volontaire ou non, dont le résultat est la non prise en compte correcte d'une directive, d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.
- **Le défaut** : écart existant entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale.
- **L'erreur** : partie du système ne correspondant pas (ou ne correspondant pas complètement) au cahier des charges. En toute logique, une erreur est la conséquence d'une faute.
- **L'erreur latente** : l'erreur est latente tant que la partie erronée du système n'est pas sollicitée. Elle devient effective au moment de la sollicitation de la partie erronée.

- **Le dysfonctionnement** : exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou est délivré de manière incomplète.
- **La panne** : état d'un système incapable (à la suite d'une défaillance) d'assurer le service spécifié.
- **Le symptôme** : événement ou ensemble de données au travers desquels le système de détection identifie le passage de la partie opérative dans un fonctionnement anormal. C'est le seul élément dont a connaissance le système de surveillance au moment de la détection d'une anomalie.
- **La défaillance** : événement caractéristique d'une situation pour laquelle une opération n'est pas exécutée par un appareillage parce que son état ne correspond pas aux spécifications nominales.

2.2.2 Supervision

La supervision recouvre les aspects fonctionnement normal et fonctionnement anormal d'un système automatisé :

- en fonctionnement normal, son rôle est surtout de prendre en temps réel les décisions correspondant aux degrés de liberté exigés par la flexibilité décisionnelle. Pour cela, elle est amenée à faire de l'ordonnancement temps réel, de l'optimisation, à modifier en ligne la commande et à gérer le passage d'un algorithme de surveillance à un autre.
- en présence de défaillances, la supervision doit prendre toutes les décisions nécessaires pour assurer le retour vers un fonctionnement normal. Il peut s'agir de choisir par exemple une solution curative, d'effectuer des ré-ordonnements "locaux", de déclencher des procédures d'urgence, etc.

Le concept de supervision s'applique dans un cadre hiérarchisé à deux niveaux au moins. A un niveau local, la supervision peut disparaître complètement (tout est prévu et figé à l'avance : la surveillance est intégrée à la commande). C'est typiquement le cas d'une protection dans un réseau électrique. En revanche, à des niveaux plus abstraits, la supervision doit devenir prépondérante par rapport à la commande et à la surveillance.

2.2.3 Surveillance

La surveillance est chargée de recueillir en permanence tous les signaux en provenance de la partie opérative et de la commande, de suivre en temps réel les évolutions du système commandé, de faire toutes les inférences nécessaires pour dresser des historiques de

fonctionnement, et, le cas échéant, pour mettre en œuvre un processus de traitement de défaillance.

Dans cette définition, la surveillance est limitée aux fonctions qui collectent des informations, les archivent, font des inférences, etc., sans agir réellement, ni sur le procédé, ni sur le système de commande. La surveillance a donc un rôle passif vis-à-vis du système de commande et du procédé. Elle intègre des fonctions telles que la détection, le diagnostic, la supervision ou la surveillance [HOL-1990] [ZAM-1997] [CHA-1994] [COM-1991].

2.2.4 Niveaux d'intégration de la supervision, de la surveillance, de la commande

Jusqu'à présent, nous nous sommes attachés à décrire, d'un point de vue fonctionnel, les systèmes de commande, de surveillance et de supervision. En revanche, nous ne nous sommes pas préoccupés de l'interaction de ces systèmes. Faut-il en effet considérer les systèmes de surveillance-supervision comme intégrés au système de commande ? séparés ? ou encore mixtes ?

La première approche consiste à intégrer la surveillance-supervision au système de commande. On parlera alors de "surveillance-supervision intégrée". Ici, toutes les évolutions possibles du système commandé doivent être prévues hors ligne, que ce soit en fonctionnement normal ou anormal, afin de leur affecter un traitement spécifique. De cette façon, et en particulier sur l'occurrence d'une défaillance de la partie opérative, le système de commande-surveillance-supervision peut appliquer le "bon" traitement correctif. Cependant, ce concept d'intégration pose un problème majeur. Est-il toujours envisageable de modéliser exhaustivement le comportement du système commandé à la fois en fonctionnement normal et anormal? Ceci peut se concevoir aisément pour un appareillage simple dont l'interface est constituée de peu de capteurs/actionneurs. Mais qu'en est-il pour des niveaux de commande plus agrégés ? Dans ce cas, la couverture totale des situations de défaillance est parfaitement illusoire. En conclusion, nous pouvons dire que ce type d'approche se prête bien à la commande de procédés non complexes et qui nécessitent de surcroît une forte réactivité.

La deuxième approche revient à séparer le système de surveillance-supervision de la commande. On parlera alors de "surveillance-supervision séparée". Ici, la commande a la charge du fonctionnement normal alors que la surveillance-supervision gère le fonctionnement anormal. Le principal avantage de cette approche réside dans le choix adapté des outils attribués à chacun des systèmes. Cependant, une telle séparation entraîne forcément un risque de conflits décisionnels. En effet, en présence de défaillances, la supervision peut être amenée à lancer des ordres (de reprise par exemple) vers le système commandé tout à fait

contradictoires avec ceux de la fonction commande. Une solution à ces problèmes consiste à jouer sur les avantages des deux approches précédentes. On parlera alors de surveillance – supervision mixte. Ici, la commande intègre un sous-ensemble de fonctions comme la détection et la reprise alors que les autres fonctions de surveillance – supervision sont séparées de la commande [COM-1991]. Dans ce cas, le besoin de recenser toutes les situations de défaillance observables disparaît. En effet, seules les évolutions normales doivent être prises en compte, toute évolution qui diffère de celle prévue par la commande est immédiatement considérée comme anormale.

Dans ce cas, la détection (intégrée dans le système de commande) caractérise cette situation sous la forme d'un symptôme de défaillance afin que le reste des fonctions de surveillance-supervision (diagnostic, décision, etc.) prenne le relais.

2.2.5 Reconfiguration des systèmes industriels

La reconfiguration [NIE-2002] [DES-2005] est donc clairement une fonction décisionnelle appartenant à la supervision. De manière plus détaillée, « le processus de reconfiguration est un processus de réorganisation matérielle et/ou logicielle du système. L’objectif de cette réorganisation est de pouvoir assurer la production dans des délais compatibles avec le cahier de charges en dépit d’un contexte indéterminé. L’indéterminisme résulte soit de la nécessité de produire de manière différente (en quantité et/ou en qualité) que celle prévue initialement ou de la nécessité de faire face à des aléas de fonctionnement issus de la partie opérative » [ZAM-2005]. Bien que de prime abord éloigné du domaine des réseaux électriques, il n’en demeure pas moins que cette définition se prête parfaitement à la problématique de la reconfiguration dans les réseaux électriques. En effet, si une défaillance se produit dans un réseau électrique, le travail des exploitants sera de réorganiser les composants matériels sains pour trouver une configuration de secours qui permette de réalimenter le maximum de clients (modification de la configuration du système).

Les raisons principales amenant une demande de reconfiguration dans des systèmes de conduite peuvent être nombreuses [HEN-2005], nous en listons ci-après les principales raisons :

- le développement continu des systèmes entraîne des changements de la structure du système comme les extensions des parties opératives avec de nouveaux appareils insérés.
- les exigences changeantes des demandes des clients vers le type ou vers la qualité du produit conduisent à ce que les séquences de commande doivent être changées.

- les défaillances des matériels dans le système mettent les exploitants dans la situation où il faut chercher une solution de secours pour exploiter coûte que coûte le système avant que les matériels défaillants soient changés ou réparés.
- Pour améliorer ou optimiser quelques caractéristiques du système afin d’améliorer un rendement, une satisfaction des clients, etc.

Afin de proposer des solutions rapides pour la reconfiguration du système de conduite, les systèmes industriels sont généralement conçus en intégrant une flexibilité physique [TRE-2002] [BER-1998]. Cette flexibilité physique apporte plusieurs possibilités pour fabriquer un même produit dans un système manufacturier par exemple ou pour réacheminer l’énergie électrique dans un réseau électrique. Elle offre également au système de conduite une plus grande réactivité aux variations de la demande client en jouant sur la redondance des machines. Cependant, et en anticipant un peu sur la suite de ce document, notons que cette flexibilité joue également un rôle primordial pour répondre aux incertitudes liées aux aléas de fonctionnement de la partie opérative.

La seule flexibilité physique ne permet pas de garantir la flexibilité de l'ensemble du système industriel. Le système de conduite doit lui aussi être en mesure de s'adapter d'une part à la demande du client, et d'autre part aux défaillances matérielles. Nous parlerons alors de flexibilité décisionnelle.

2.3 Etat de l’art

2.3.1 Approches de reconfiguration

Dans le passé, la reconfiguration des systèmes a été appliquée dans plusieurs domaines, on peut citer les domaines typiques comme celui des systèmes de production manufacturiers, l’informatique et l’électronique ou l’électricité etc. De nombreuses approches ont été proposées par divers auteurs et diverses communautés : chacune a des points forts et des points faibles différents. Cette section va présenter quelques unes de ces approches centrées sur la reconfiguration.

2.3.1.1 Approche de construction d’un arbre des décisions

Cette approche repose sur la réalisation d’un arbre des décisions possibles, plus ou moins complet suivant la méthode considérée. La décision est celle qui a des effets directs ou indirects sur le flux de produit (manière de transformer). Chaque branche dans l’arbre correspond à une solution possible pour reconfigurer le système. A partir des branches de

l’arbre, le choix de la meilleure solution est réalisé selon un ou plusieurs des critères (coût, temps, interventions humaines ...).

Sébastien Henry [HEN-2005] a développé dans ses travaux de thèse une méthode de reconfiguration pour la famille des systèmes de production. Chaque ressource du système est décrite par plusieurs opérations qui peuvent changer les états du produit (l’état physique du produit, sa position spatiale, etc.) ou l’état de ressource. Sur la base de l’ensemble des opérations possibles, la théorie des graphes est appliquée pour construire un arbre des opérations. La cime des branches dans l’arbre correspond aux états du système qui satisfont la fonction objectif proposée. A partir de cet arbre, il choisit une branche des opérations suivent un certain critère donné (par exemple, la branche plus courte qui contient alors le moins d’opérations).

Rupa Sampathe [SAM-2008] a développé une méthode pour reconfigurer les systèmes à événements discrets (DES - Discret Events System) dans le cas où la demande faite au système de pilotage est modifiée (modification du cahier des charges client). Le principe général de cette méthode consiste à utiliser la théorie des réseaux de Petri ordinaires pour modéliser un système à DES. Un système DES est représenté par les tâches et les états atteignables après l’exécution des tâches. S’il y a des changements d’états du système DES (la demande des clients ou les changements des ressources dans le système), un réseau de Petri est reconstruit et une séquence des tâches pour atteindre le nouvelle demande (objectifs) ou le nouvel état est proposé en se basant sur ce nouveau graphe. Dans le cas où plusieurs séquences sont possibles, la séquence choisie est celle qui a le coût minimal pour reconfigurer le système.

Morelato [MOR-1989] propose une méthode heuristique pour chercher la solution de reconfiguration en se reposant sur un arbre binaire. Pour construire un arbre binaire des décisions, il considère qu’un système électrique contient plusieurs disjoncteurs et interrupteurs (ils sont appelés « ressources »). Chaque ressource peut impliquer deux décisions : la décision d’ouverture va imposer l’état ouvert (représenté par la valeur 0) ; la décision de fermeture va imposer l’état fermé (représenté par la valeur 1). Le processus de construction de l’arbre commence par le point de départ (noté niveau 0) où toutes les décisions des ressources dans le réseau ne sont pas encore données. A chaque étape, une ressource est choisie pour donner la décision (1 ou 0). A la dernière étape, toutes les ressources se sont vues attribuer une décision. Après avoir construit l’arbre, l’auteur utilise la stratégie de recherche en profondeur « depth-first » [AGG-1990] avec le critère de minimisation du déséquilibre des charges entre les départs.

2.3.1.2 Approche de pré – calcul des topologies possibles

Cette approche repose sur un ensemble des topologies possibles d’un système suite à la défaillance d’une ou plusieurs ressources sans considération des contraintes sur le temps de calcul pour décrire tous les scénarios de défaut. Les exploitants du système vont alors chercher la topologie qui correspond le plus au cas réel pour assurer le bon fonctionnement du système.

Lin [LIN-1989] propose de créer une base de données (contenant les séquences de reconfiguration) pour différents défauts ou déclenchements qui ont été simulés et calculés a priori. Dans le cas de l’apparition d’un défaut, la méthode cherche et compare celui-ci avec ceux de la base de données. Si l’on trouve un cas assez proche, l’information est alors utilisée pour reconfigurer le système.

Ces deux approches sont de type supervision intégrée au système de commande puisqu’il s’agit ici de tout prévoir hors ligne. Ces approches sont donc fortement réactives mais ne permettent pas de prévoir tous les défauts qui peuvent se produire.

2.3.1.3 Approche par le choix des chemins de secours possibles mis en service

Cette approche n’est appliquée que pour les systèmes électriques. Ici, la zone de défaut est divisée en plusieurs petites zones suivant une règle propre correspondant à chaque méthode. Ces zones sont réalimentées les unes après les autres de façon indépendante et en essayant de ne pas créer de nouveaux problèmes. Nous présentons dans la suite quelques unes de ces approches.

Lee [LEE-1988] propose une méthode pour diviser la zone de défaut en plusieurs petits groupes de charges avec la condition que chaque groupe ait au moins une connexion de secours (cf. Chapitre 1, section 1.2.2.1, point b). Ensuite, il propose de réalimenter chaque groupe de façon à ne pas créer d’autres défauts. S’il y a des groupes où il existe toujours des défauts quand on met en service les connexions de secours, des procédures de transfert de charges sont mises en place [ENA-2007]. A la fin, s’il y a encore des groupes non réalimentés, ces groupes sont définis comme zones non réalimentables.

Chen [CHE-1989] propose une méthode de reconfiguration simple. Il découpe ainsi la zone de défaut en plusieurs sous-zones. Ensuite, une liste des chemins sans surcharges capables de réalimenter chaque sous-zone (via des chemins de secours) est établie. Dans les cas où plusieurs chemins sont possibles pour alimenter une même sous-zone, un choix se

porte sur celui qui minimise une fonction coût dans laquelle intervient le nombre de nœuds existant entre la source et la zone à reprendre.

Matsumoto [MAT-1989] propose aussi une méthode de découpage en sous-zones. Une réalimentation de ces sous-zones est réalisée par un ordre de priorité. La priorité des sous-zones est définie en fonction du type de charge ainsi que par le nombre de chemins de secours possibles et le type des appareils de coupure (télécommandé ou manuel) pour réalimenter la sous-zone. Toutes les solutions doivent toujours être compatibles avec les contraintes d’exploitations.

Aoki [AOK-1989] propose une méthode de reconfiguration comprenant 4 étapes :

- réalimentation de la partie en défaut par le départ voisin (en utilisant les chemins de secours associés) dans lequel on ne crée pas de violation de contrainte. Si aucun départ ne garantit cette condition, celui dans lequel on crée la plus petite surcharge est choisi.
- si des surcharges apparaissent dans le départ voisin, ce départ est délesté en transférant des charges vers un départ adjacent.
- s’il reste toujours des surcharges, la procédure de délestage est poursuivie jusqu’à ce que toutes les surcharges disparaissent.
- après quoi, des essais de réalimentation des charges délestées sont effectués.

Gotzig [GOT-1997] propose une méthode de reprise de service du réseau après un défaut en deux étapes :

- réalimentation de la zone saine hors tension directe par les départs voisins. Cette étape est réalisée tout d’abord en utilisant une ou plusieurs connexions de secours (appelées « connexions candidates »). La connexion candidate qui peut réalimenter cette zone sans créer des surcharges dans le réseau et satisfaire une critère supplémentaire quelconque (par exemple les pertes joule minimales) est prise. S’il n’existe aucune connexion candidate réalimentant cette zone, la zone hors tension est décomposée en plusieurs sous-zones et la méthode de Lee [LEE-1988] pour reprendre ces sous-zones est appliquée.
- Suite à la réalimentation par une ou plusieurs connexions candidates, s’il existe toujours des surcharges dans le réseau, un ou plusieurs transferts de charge vers des départs adjacents doivent être effectués jusqu’à ce que nous arrivons à un état sans surcharge (cf. la méthode de transfert des charges dans le chapitre 3, section 3.4.3 du mémoire de thèse de Gotzig [GOT-1997]).
- A la fin, s’il y a encore des surcharges, nous disons qu’il n’existe pas de solution pour reprendre la zone saine hors tension.

2.3.2 Synthèse des approches développées

Après avoir présenté un état de l’art des approches les plus significatives dans le domaine de la reconfiguration, nous proposons au lecteur un comparatif synthétique des avantages et inconvénients de chacune de ces approches (*cf. Tableau 2.1*).

Tableau 2.1 : points forts et points faibles des approches

Nom de l’approche	Points forts	Points faibles
1. Approche par construction d’un arbre des décisions	<ul style="list-style-type: none"> - La solution obtenue est proche de la solution optimale. - La méthode peut être exécutée en « temps réel ». - L’adaptation rapide aux changements structuraux du réseau dans le temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - La complexité algorithmique. - L’optimisation du temps de calcul de la méthode. - Non adaptée à des réseaux de très grande taille.
2. Approche de pré – calcul des topologies possibles	<ul style="list-style-type: none"> - Le temps de recherche de la solution dans le cas de défaut est court. - L’optimisation du temps de calcul de la méthode n’est pas nécessaire (le calcul de recherche des solutions est fait hors ligne). 	<ul style="list-style-type: none"> - La mémoire (stockage de données) utilisée est grande. - La solution trouvée n’est pas optimale ou peut-être aucune solution ne peut être trouvée. - La méthode ne peut pas être appliquée pour des réseaux dont la structure est modifiée fréquemment.
3. Approche par le choix des chemins de secours possibles mis en service.	<ul style="list-style-type: none"> - La masse de calcul de la méthode est plus petite par rapport aux autres approches. - Elle peut être appliquée pour traiter de grands réseaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il faut établir des règles de sélection des chemins de secours. - il faut formuler une fonction objectif complexe. - Le résultat obtenu peut être loin de la solution optimale.

2.3.3 Approche choisie pour notre problème

Au regard du tableau précédent, chacune a des catégories d’approches présentées a des avantages et des inconvénients. La finalité de notre recherche consiste à développer une méthode devant traiter les problèmes de reconfiguration d’un réseau dont :

- la structure évolue dans le temps [HEN-2005] [SAM-2008] [MOR-1989] [MAT-1989] [LEE-1988] [GOT-1992] ou [AOK-1989],
- le résultat trouvé est proche à la solution optimale [HEN-2005] [SAM-2008] [MOR-1989],
- la capacité à résoudre des problèmes de reconfiguration pour les réseaux de grande taille dans un temps imparti est avérée [MAT-1989] [LEE-1988] [CHE-1989] [GOT-1992] ou [AOK-1989].

Aujourd’hui, les avancées technologiques du monde de l’informatique sont telles que les limitations de la vitesse de calcul ou encore la place mémoire ont considérablement reculées. Nos recherches se sont alors principalement focalisées sur la résolution de problèmes de reconfiguration de systèmes dont la structure évolue dans le temps et dont la résolution conduit à un résultat proche la solution optimale. Aussi avons-nous retenu en priorité les approches de construction d’un arbre des décisions. L’approche sur laquelle nous avons ensuite développé nos travaux est la méthode de synthèse de loi de commande des systèmes à événements discrets proposée par Sébastien Henry ; comme nous allons le voir dans la suite de ce document, la notion de flux sur laquelle elle se base est fondamentale dans la résolution des problèmes dans le domaine des réseaux électriques.

2.4 Démarche retenue

Compte tenu non seulement de la complexité du système auquel nous nous intéressons, et de la proximité avérée de la gestion des flux (matière ou énergie) en présence d’aléas de fonctionnement de la partie opérative, nous avons proposé de reprendre à notre compte la méthodologie développée par M. Sébastien Henry. Pour cette raison, nous proposons au lecteur de détailler cette approche dans les sections suivantes avant d’en proposer un développement dédié aux réseaux électriques.

2.4.1 Synthèse des lois de commande pour la reconfiguration des systèmes à événement discret complexes

Sébastien Henry [HEN-2005] considère qu’un système automatique de production manufacturière est constitué de quatre éléments (cf. Figure 2.1). Au delà des éléments de base qui caractérisent un système de production (flux de produits et partie opérative), deux autres éléments sont à considérer en vue de son automatisation, à savoir une interface et un système de pilotage.

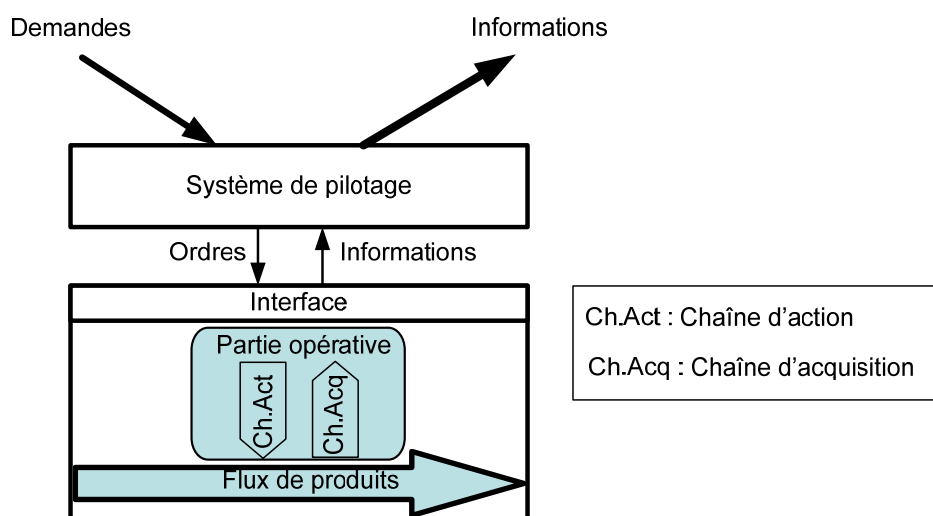


Figure 2.1 : système automatique de production manufacturière

Le Flux de produits représente l'ensemble des entités en cours de transformation ou d'acheminement.

La partie opérative (PO) regroupe l'ensemble des organes physiques appelés aussi ressources physiques (qui interagissent sur le flux de produits pour modifier son état au sens le plus large (état physique et position spatiale). Elle se compose des actionneurs et effecteurs.

Le système de pilotage [TRE-2002] dont la fonction est de définir, d'imposer et de surveiller l'évolution du flux de produits et de la partie opérative afin de les amener conjointement d'une situation à une autre concordant avec les demandes client tout en satisfaisant les contraintes de sécurité et d'environnement, et, de plus, en optimisant les critères de productivité et de qualité. Il se compose d'une partie matérielle (calculateurs, réseaux de communication) et d'une partie logicielle (système d'exploitation, interpréteur de commande, ...) dont la prépondérance est naturellement croissante (adaptabilité, reconfigurabilité, maintenabilité).

L’interface, constituée de pré-actionneurs transmet les ordres du système de pilotage à la **PO** et informe ce dernier de l’état de la **PO** et/ou du flux de produits.

Chaque ressource du système offre une ou plusieurs opérations qui influent directement ou indirectement sur la matière à travailler : le produit (*cf. Figure 2.2*). Les effets sur les produits peuvent être géographiques (convoyage d’un produit d’un point **A** à un point **B** par exemple), ou physique (décolletage, peinture, ...).

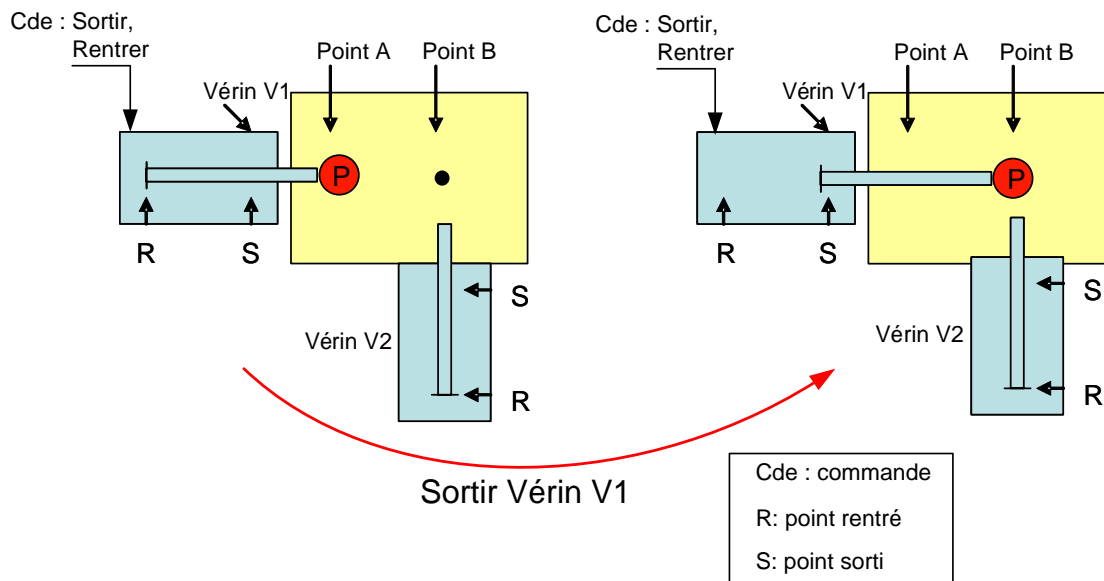


Figure 2.2 : chaîne fonctionnelle du vérin V1

Dans la *Figure 2.2*, la chaîne fonctionnelle du vérin **V1** exécute l’opération « sortir **V1** ». S’il existe un produit « **P** » au point **A**, il y aura un effet sur la position du produit : le produit « **P** » va être déplacé du point **A** au point **B**.

Selon le point de vue de l’auteur, généralement, une opération entraîne une évolution de la ressource considérée (représentant le processus de changement d’état de la ressource), et d’une ou plusieurs évolutions associées du flux de produits (représentant le processus de changement d’état du produit impliqué par l’évolution de la ressource correspondante). Quelques fois, il existe des opérations qui n’entraînent qu’une évolution de la ressource, ces opérations sont appelées « opération de préparation ». Il existe aussi des opérations qui ne contiennent que des évolutions associées du flux de produits, ces opérations sont appelées « opération induite ».

Le processus de changement de l’état de la ressource est défini par l’état initial, l’état intermédiaire et l’état final de la ressource. Le processus de changement d’état du produit associé se déroule en même temps que l’évolution de la ressource qui crée ce processus.

Comme le processus de changement d’état d’une ressource, le processus de changement du flux de produit est aussi défini par l’état initial, l’état intermédiaire et l’état final du produit.

Sur le plan de la modélisation, l’auteur a repris à son compte et étendu celle proposée dans le cadre de la planification automatique [GHA-2004], il s’agit du modèle d’opération (*cf. Figure 2.3*). Dans ce modèle, l’ensemble des variables d’états utiles pour la reconfiguration est représenté.

L’évolution de la chaîne fonctionnelle, dont l’exécution de l’opération implique toujours l’existence. Elle se caractérise par cinq champs de données :

- une **condition** sur l’état initial de la chaîne fonctionnelle. Si cette condition n’est pas satisfaite, le service à la base de l’opération ne peut pas être demandé. L’écriture de la condition est basée sur la logique de proposition (logique d’ordre 0).
- l’**effet transitoire** sur l’état de la chaîne fonctionnelle durant l’opération. Il affecte une valeur particulière à une ou plusieurs variables d’état de la chaîne fonctionnelle sur laquelle l’opération d’action est basée.
- l’**effet final** sur l’état de la chaîne fonctionnelle suite à l’opération. Il affecte une valeur particulière à une ou plusieurs variables d’état de la chaîne fonctionnelle sur laquelle l’opération d’action est basée.
- la **pré-contrainte** à satisfaire sur l’état du flux de produits et des chaînes fonctionnelles avant le début de l’opération si la condition est vraie. L’écriture de la pré-contrainte est également basée sur la logique de proposition.
- la **contrainte** à satisfaire sur l’état du flux de produits et des chaînes fonctionnelles durant l’opération. Elle est également spécifiée par une proposition logique.

Les évolutions associées du flux de produits pour une opération d’action avec N évolutions associées. Elle se caractérise par cinq champs de données :

- une **condition** sur l’état du flux de produits et des chaînes fonctionnelles depuis lequel l’exécution de l’opération implique l’effet. Si cette condition n’est pas satisfaite, l’exécution de l’opération d’action est tout de même possible.
- l’**effet transitoire** sur l’état du flux de produits durant l’opération. Il affecte une valeur particulière à une ou plusieurs variables d’état du flux de produits.
- l’**effet final** sur l’état du flux de produits suite à l’opération. L’effet final et l’effet transitoire forment les effets sur le flux de produits.
- la **pré-contrainte** à satisfaire sur l’état du flux de produits et des chaînes fonctionnelles avant le début de l’opération si la condition est vraie.

- la **contrainte** à satisfaire sur l’état du flux de produits et des chaînes fonctionnelles durant l’opération.

La *Figure 2.3* présente le modèle de l’opération « Sortir Vérin1 ». Ce modèle contient une évolution de la ressource et deux évolutions associées du flux de produits.

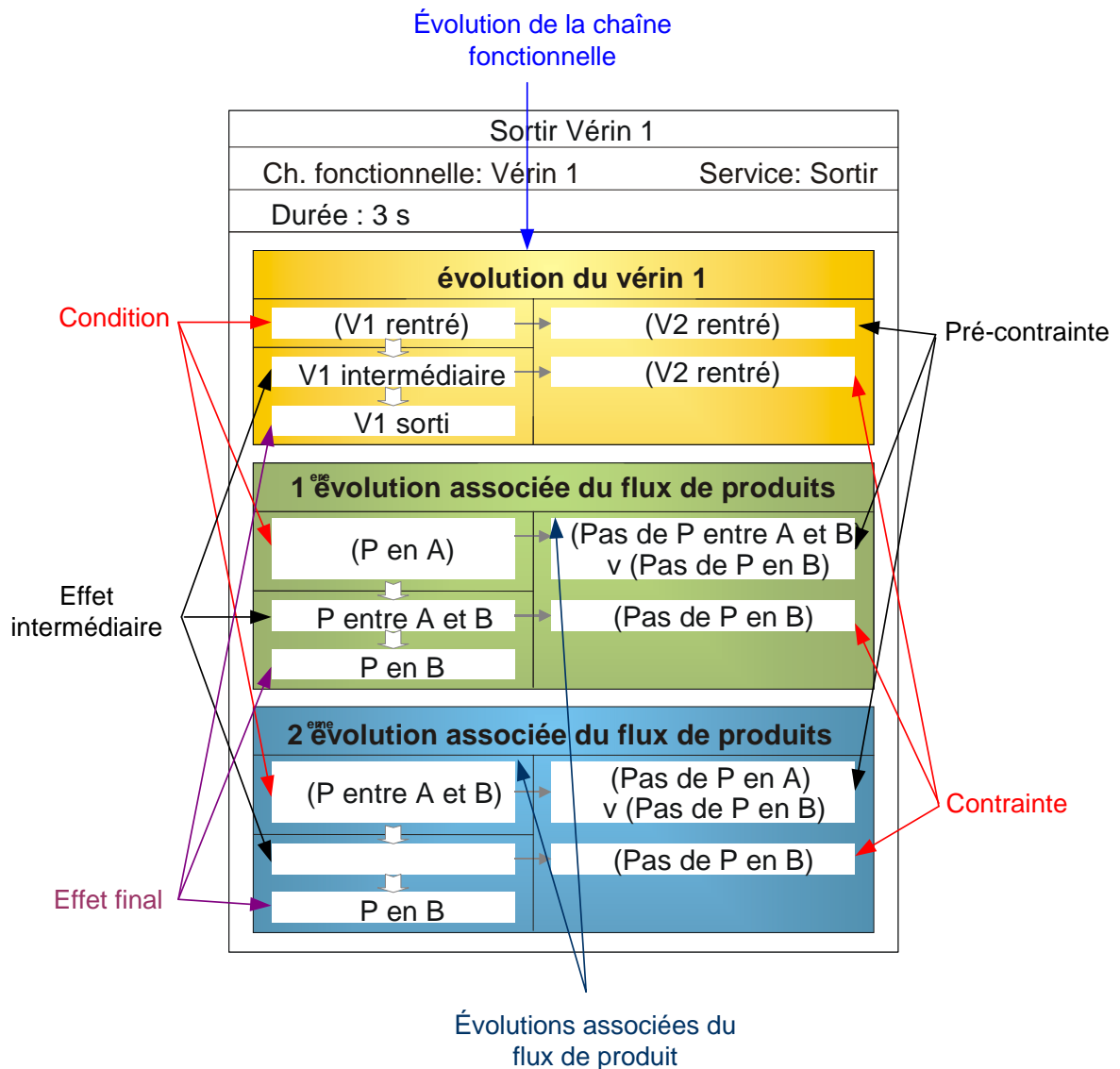


Figure 2.3 : opération « Sortir Vérin 1 »

Une ressource physique pouvant agir sur un ou plusieurs produits, autant d’évolutions sont à modéliser en reprenant la structuration à cinq variables d’états. Chacune de ces variables d’état peut être décrite par une expression logique mettant en relation d’autres variables d’états représentant en particulier l’état de l’environnement direct de la ressource considérée (i.e. autres ressources voisines, cf. interaction des vérins 1 et 2 dans la *Figure 2.3*). Nous noterons que dans sa thèse, M. Sébastien Henry a proposé un ensemble de propriétés

permettant en partie de vérifier et de valider la structure du modèle général obtenu (ensemble de modèles d’opérations).

Sur la base d’un tel outil de modélisation, l’expert ingénieur du système est chargé de répertorier toutes les ressources du système considéré et d’établir l’ensemble des modèles de toutes les opérations correspondantes. Le modèle global obtenu se présente donc sous la forme d’un ensemble de fiches opératoires.

2.4.2 La méthode de synthèse des lois de commande

L’idée générale proposée pour concevoir une loi de commande revient à parcourir le modèle instancié afin de trouver une séquence opératoire permettant d’aller de l’état courant du système considéré à un état respectant les objectifs de reprise décidés (un état étant caractérisé par un ensemble de variables d’états instanciés). Le mécanisme de recherche de séquence opératoire s’appuie sur la théorie des graphes et vise dans un premier temps à générer un graphe d’état représentant l’ensemble des chemins permettant d’aller de l’état initial courant à l’état objectif. Fort de ce graphe, il s’agit ensuite de le parcourir afin d’en déterminer le chemin respectant un critère (ici le critère du plus court chemin). Cependant, pour un système complexe, la taille du graphe résultant est telle que trouver un chemin devient généralement impossible dans des temps compatibles avec la dynamique du système considéré. Aussi, Sébastien Henry a proposé de réduire la complexité algorithmique en décomposant la recherche d’une séquence en 4 étapes (*cf. Figure 2.4*). Naturellement le résultat obtenu ne peut désormais être considéré comme optimal mais sous optimal.

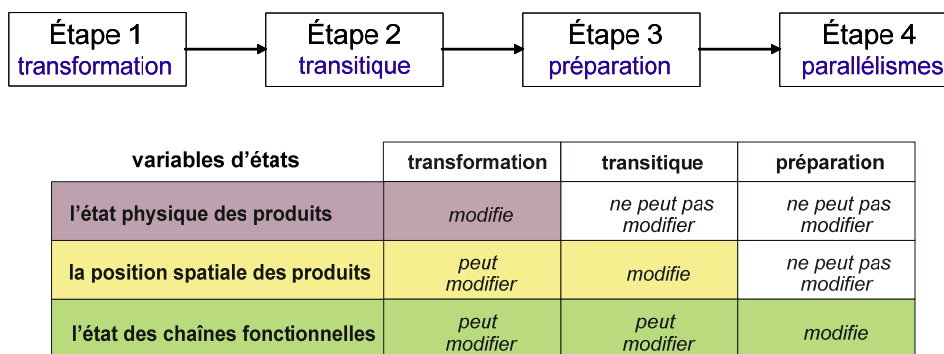


Figure 2.4 : étapes principaux de la méthode de synthèse de la loi de commande

Les trois premières étapes sont établies suite à une analyse fine des grandes classes de variables d’états du système considéré comme le montre le tableau de la *Figure 2.4*.

- **L’étape 1** : résolution de la problématique liée à la transformation d'un produit afin de le faire évoluer de son état d'entrée vers son état de sortie.
- **L’étape 2** : résolution de la problématique liée à la transitique afin de satisfaire d'une part la demande et d'autre part les conditions et les pré-contraintes des opérations de transformation sur la position du produit.
- **L’étape 3** : résolution de la problématique de préparations des chaînes fonctionnelles afin de satisfaire d'une part la demande et d'autre part les conditions et les pré-contraintes des actions de transformation et de transitique sur l'état des chaînes fonctionnelles.
- **L’étape 4** : permet d’optimiser la séquence opératoire linéaire trouvée à l’issue de l’étape 3 en tentant de paralléliser les opérations de la séquence.

En rentrant dans les détails, la méthode de synthèse de lois de commande proposée par S.Henry est la suivante :

a. Etape 1 : recherche du chemin des opérations de transformation

Les mécanismes proposés dans cette étape consistent tout d’abord à construire une séquence des opérations de transformation (à rapprocher d’un transformateur dans le cadre d’un réseau électrique).

Il s’agit ici de se focaliser sur l’état physique du produit (*cf. Figure 2.5*) afin de l’amener de son état initial (correspondant à son arrivée dans le système) à son état de sortie (correspondant aux spécifications clients attendues : forme géométrique, couleur, ...). Ainsi, seules les opérations de transformation ayant un effet sur les variables d’état du produit sont retenues pour créer l’espace d’états atteignables restreint.

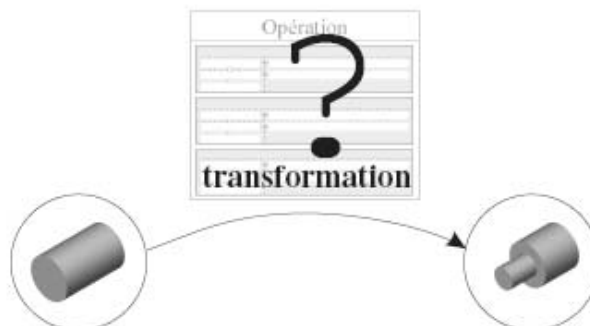


Figure 2.5 : opération de transformation du produit

L’algorithme de construction de cet espace d’état depuis un état initial est un algorithme de type glouton [LAC-2003] qui génère lui-même les nouveaux états à visiter. L’algorithme prend fin lorsque la liste des états à visiter est vide. A partir de cet espace d’états atteignables essentiellement restreint aux opérations de transformation, l’auteur propose de rechercher le chemin le plus court entre l’état initial et l’état satisfaisant les spécifications physiques attendues sur le produit. Pour cela, il choisit l’algorithme de Dijkstra [DIJ-1959], de faible complexité $O(S)$, S étant le nombre de sommets.

La *Figure 2.6* présente un espace d’état atteignable. L’état final dans cet arbre est l’état qui satisfait la fonction objectif.

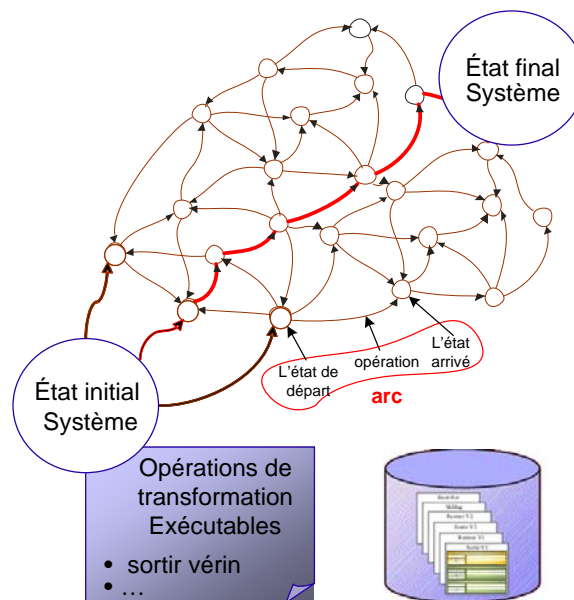


Figure 2.6 : espace d’état atteignable

La *Figure 2.7* représente le chemin trouvé après application de l’algorithme de Dijkstra.

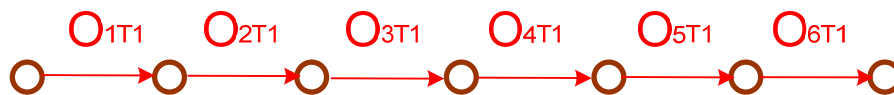


Figure 2.7 : meilleur chemin des opérations de transformation

b. Etape 2 : ajout des opérations de transitique

Dans l’étape 1, les conditions et les contraintes de l’état spatial du produit n’ont pas encore été examinées. Pour ce faire, l’auteur propose d’examiner chaque arc (un arc représente une opération et possède un sommet de départ et un sommet d’arrivée) entre deux

sommets de la séquence précédemment générée. Pour chacun de ces arcs, il propose d’appliquer le même algorithme de construction d’un espace d’état mentionné à l’étape 1 mais restreint aux opérations de transitique. L’algorithme de Dijkstra est ensuite à nouveau appliqué pour déterminer la séquence la plus courte. Cet algorithme (construction de l’espace d’état restreint aux opérations de transitique, et recherche du plus court chemin) est naturellement appliqué à tous les arcs de la séquence d’opération de transformation retenue à l’étape 1. Il en résulte ainsi un autre chemin cette fois-ci étendu aux opérations de transitique (cf. Figure 2.8).

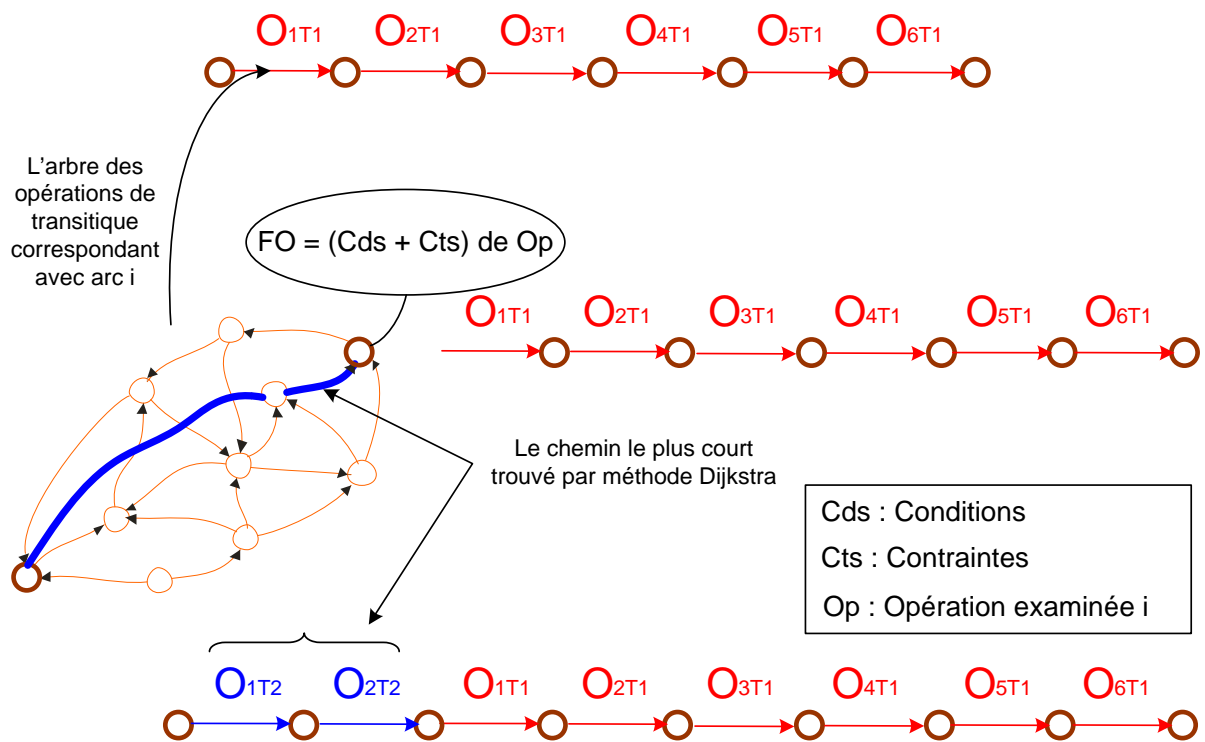


Figure 2.8 : processus d’ajout des opérations de transitique

c. Etape 3 : Ajout des opérations de préparation

Le même principe qu’aux étapes 1 et 2 est appliqué dans cette étape ; les opérations de préparation sont ajoutées pour satisfaire les conditions et les contraintes de l’état des ressources de toutes les opérations dans le chemin qui a été trouvé après l’étape 2. Après cette étape, le résultat trouvé correspond à celui de la Figure 2.9.



Figure 2.9 : meilleur chemin après l’ajout des opérations de préparation

d. Etape 4 : Optimisation de la séquence linéaire, introduction des parallélismes

La liste des opérations trouvées après les trois premières étapes n’est pas encore optimale par rapport au temps opératoire. En effet, il peut exister dans cette séquence des opérations qui peuvent être réalisées en même temps (parallélismes). C’est ce que propose de réaliser le dernier algorithme proposé par S.Henry. A l’issue de cette dernière étape, une séquence opératoire sous optimale est générée pour fabriquer un seul produit. Pour la fabrication de plusieurs produits, l’auteur propose d’autres algorithmes reposant sur des mécanismes de fusion et d’imbrication [HEN-2005]. Au final, la séquence opératoire cyclique obtenue est traduite dans le formalisme réseaux de Petri afin que cette loi de reprise puisse directement être interprétée par un automatisme (i.e. automate programmable).

2.5 Applicabilité de la méthode au domaine des systèmes électriques

Après avoir présenté non seulement la problématique de reconfiguration dans les réseaux électriques (cf. Chapitre 1, section 1.5) ainsi que la méthode de reconfiguration proposée dans la thèse de S. Henry [HEN-2005] pour les systèmes manufacturiers (cf. section 2.4), nous nous proposons désormais de mener une étude visant à mettre en exergue la pertinence d’appliquer une telle technique au domaine des réseaux de distribution.

Nous proposons de démarrer cette étude par un comparatif rapide de deux domaines d’application (cf. *Tableau 2.2*).

Tableau 2.2 : comparatif des différences entre les deux systèmes (électrique et production)

Élément de comparaison	Système électrique	Système de production
1. Parties opératives équivalentes entre deux systèmes	- Transformateurs de tension - Lignes électriques - Interrupteurs, ...	- Cabine de peinture - Convoyeurs - Vérin, ...
2. Comportements des opérations	- Transformation - Transitique - Préparation	- Transformation - Transitique - Préparation
3. évolution transitoire dans des opérations	- Non prise en compte	- Prise en compte
4. Nature du flux	- Électrique (tension, courant, fréquence)	- Matière physique
5. Sens de déplacement du flux	- Multidirectionnel - Isotrope	- Unidirectionnel - Orienté
6. Temps de réponse des opérations induites	- Immédiat	- Lent
7. Impact des opérations d’actions sur le flux	- Global à tous les éléments physiques électriquement reliés entre eux.	- Localisé à la ressource physique impliquée
8. Caractéristiques du système de commande	- Continu / Discret - Partiellement automatisé	- Continu / Discret - Automatisé
9. Caractéristiques de la loi de commande	- Loi de commande acyclique - Mono produit	- Loi de commande cyclique - Multi produits

2.5.1 Extensions de l’approche choisie aux systèmes électriques

Le fonctionnement général de la méthode proposée peut se résumer comme il est montré dans la *Figure 2.10*. Dans un premier temps, une modélisation sous la forme de modèles d’opération doit être effectuée par l’expert du domaine afin de répertorier l’ensemble des services offerts par l’ensemble des ouvrages physiques du réseau électrique et les demandes des exploitants du réseau (la fonction objectif) sont formulées et proposées (sous la forme de variables d’états la demande de l’exploitant). Nous utilisons une méthode de reconfiguration du réseau afin de proposer à l’exploitant du réseau électrique la séquence des opérations à manœuvrer, en manuel et/ou automatique.

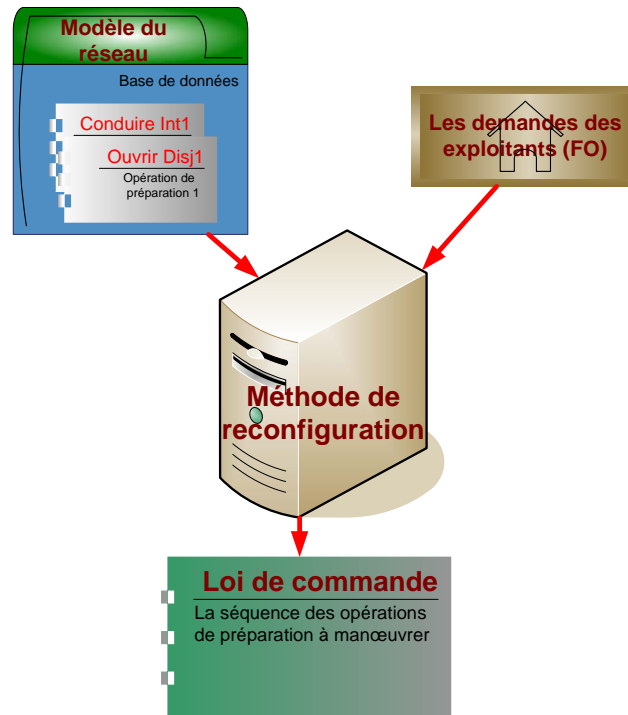


Figure 2.10 : fonctionnement général de la méthode de reconfiguration du réseau

A la lecture du *Tableau 2.2* présenté, quelques points identiques/différents entre ces deux domaines existent dans la modélisation et dans la méthode de reconfiguration d’un réseau. Dans la suite, nous nous proposons de les approfondir et de proposer des extensions à l’approche considérée.

2.5.1.1 Modélisation

Pour adapter la modélisation d’un système de production à un système électrique, nous devons procéder à quelques extensions.

La première extension est liée aux propriétés multidirectionnelles et isotropes du flux électrique (cf. point 5 du *Tableau 2.2*) : il est nécessaire d’étendre la représentation de l’évolution du flux dans des modèles des opérations du système électrique par rapport au système de production. Nous illustrons cette problématique sur la base de la figure suivante.

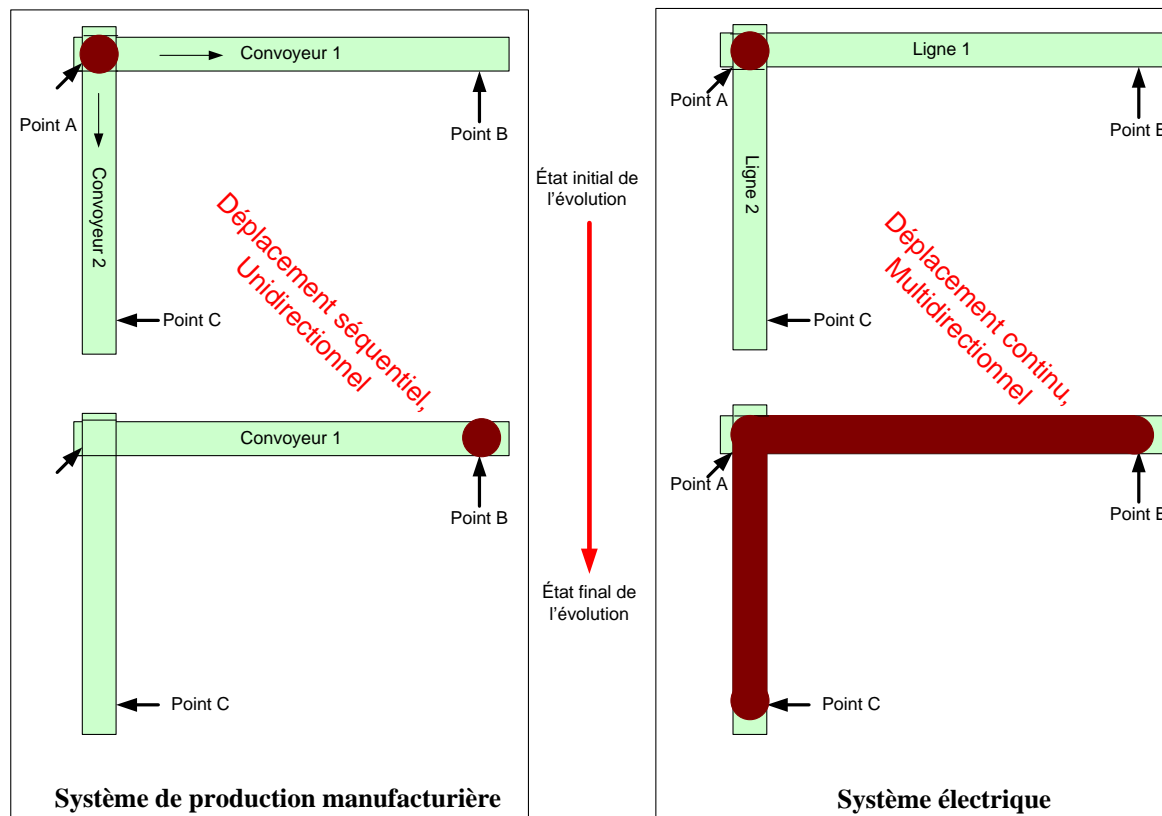


Figure 2.11 : sens de déplacement du flux

Considérons un système de production manufacturière. Si un produit est positionné sur le convoyeur 1 (sur le point A, par exemple, cf. Figure 2.11 à gauche), après un temps dépendant de la vitesse du convoyeur, il terminera sa course au point B. Dans un système électrique, si nous injectons une tension au point A du réseau, instantanément tous les points des lignes 1 et 2 seront sous tension et le resteront tant que A restera alimenté (par exemple, la Figure 2.11 à droite). Ceci doit donc être représenté au sein des modèles des opérations.

La deuxième modification est due au fait que la grande majorité des ouvrages (i.e. interrupteurs sans pouvoir de coupure, etc.) doivent être manœuvrés hors tension. La modélisation des effets transitoires dans un système électrique n’a donc pas de raison d’être prise en compte. D’autre part, pour les opérations pouvant s’exécuter sous tension (i.e. disjoncteur), la durée du régime transitoire est telle que nous pouvons considérer le système en régime permanent. Aussi, les états transitoires du modèle appliqué aux systèmes électriques ne seront pas pris en compte (cf. point 3 du Tableau 1.1) dans notre approche (cf. Figure 2.13).

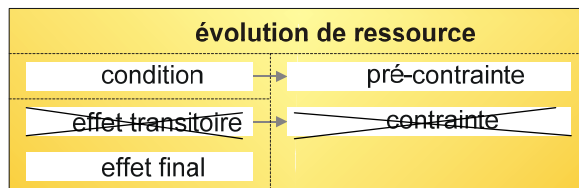


Figure 2.12 : évolution de ressource sans la prise en compte des états transitoires

2.5.1.2 Méthode de reconfiguration

a. Démarche de la méthode

Nous rappelons que dans la méthode de S.Henry, la démarche de traitement du problème de reconfiguration est décomposée en quatre sous – problèmes (correspondant aux quatre étapes de la Figure 2.4).

Pour les systèmes électriques, en s’appuyant sur le comparatif et notamment les points 2, 4, 6, 7, 8, 9 du Tableau 2.2, nous pouvons avancer l’idée de décomposer le problème en quatre sous-problèmes (cf. Figure 2.13) :

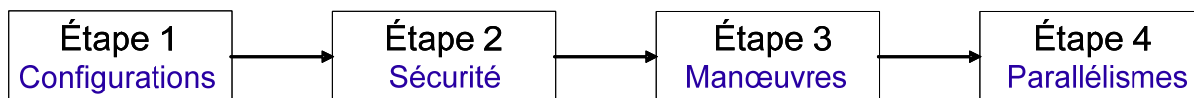


Figure 2.13 : démarche de la méthode de reconfiguration du système électrique

- l’**étape 1** aura pour l’objectif de chercher toutes les configurations possibles du réseau électrique qui satisfont la demande de l’exploitant. Cette étape utilisera la théorie des graphes et la méthode de recherche du chemin le plus court dans le graphe résultant (comme proposé dans les trois premières étapes de la méthode de S.Henry).
- l’**étape 2** aura ensuite le rôle d’examiner les contraintes électriques du réseau pour qu’il fonctionne en sécurité (cf. Chapitre 1, section 1.2.3.1). Ici, toutes les configurations possibles proposées seront vérifiées et seules les configurations admissibles (ou configurations exploitables) seront retenues avant de passer à l’étape 3. Une phase de calcul de répartition des charges sera également intégrée à cette étape.
- l’**étape 3** visera à générer les séquences des manœuvres (qui contiennent des opérations de préparation) pour amener le réseau de la configuration après le défaut aux configurations exploitables. Ensuite, nous nous proposons de chercher une séquence sous - optimale sur le critère du temps de manœuvre des séquences.

- l’**étape 4** analysera la séquence obtenue pour l’optimiser, notamment sur l’aspect du temps de manœuvre total en gérant les parallélismes opératoires. Cette étape reprendra la méthode de recherche et d’insertion des opérations parallélisables proposée par S.Henry [HEN-2005].

b. Extensions supplémentaires

Au-delà de la méthode proposée précédemment, il sera nécessaire de :

- mettre à jour l’état électrique du réseau après chaque opération sur une ressource.
- calculer les valeurs électriques du réseau et de vérifier les contraintes électriques de fonctionnement du réseau (les surcharges, les valeurs de tension, courant...).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l’art centré sur la problématique de la reconfiguration et ouvert à différents domaines applicatifs. Une terminologie issue de cette thématique de recherche a dans un premier temps été présentée afin de rendre plus aisée la lecture de ce document. Après quoi, les approches caractéristiques en reconfiguration ont été présentées et critiquées afin d’en extraire les avantages et inconvénients en vue d’une application dans le domaine des réseaux électriques. Ceci nous a conduit à sélectionner l’approche de « synthèse de lois de commande pour la configuration et la reconfiguration des systèmes industriels complexes » proposée par M. Sébastien Henry comme base à nos travaux. Bien que proche dans les concepts de notre problématique, nous avons terminé ce chapitre par une étude d’applicabilité directe de cette approche au domaine des réseaux électriques. Nous avons ainsi pu mettre en exergue des ressemblances, mais également des différences majeures nécessitant une extension significative de l’approche proposée dans le manufacturier. Notons par exemple que le flux manipulé dans le domaine des réseaux électriques est très différent dans sa nature de celui utilisé dans le manufacturier ; le flux électrique est multidirectionnel, sa propagation est instantanée, etc.

Fort de ces concepts et pistes dévoilées, nous nous proposons désormais dans le chapitre suivant d’étendre les outils de modélisation aux besoins des réseaux électriques.

Chapitre 3

Modélisation d'un réseau de distribution pour la reconfiguration

3.1 Introduction

Nous nous proposons tout au long de ce chapitre de présenter et d'étendre le formalisme de modélisation de systèmes contrôlés que nous préconisons d'utiliser dans le domaine des réseaux électriques. Il s'agira en particulier de présenter les concepts tels que l'état mécanique des ressources (interrupteur, disjoncteur), l'état de la tension sur les nœuds du réseau, les paramètres des nœuds (valeur de la charge en ces points), les paramètres des lignes etc. Ces concepts seront utilisés dans les modèles de chaque partie opérative.

Ce troisième chapitre est donc naturellement dédié à la présentation des principales caractéristiques du modèle que nous proposons. En premier lieu, nous décrirons, avec précision, les caractéristiques et paramètres fondamentaux d'un réseau électrique. Après quoi, la deuxième section s'attachera à argumenter et à présenter la structuration des paramètres et informations retenues. Enfin, la dernière section de ce chapitre s'attachera à présenter le modèle des nœuds d'un réseau électrique.

3.2 Caractéristiques générales d'un réseau électrique

Avant de passer à la présentation détaillée de la modélisation du réseau électrique, nous proposons au lecteur de définir ici quelques éléments relatifs à la topologie d'un réseau.

3.2.1 Réseau complet et réseau réduit

Comme nous l'avons rappelé au chapitre I, un réseau de distribution électrique est composé de postes sources, de lignes, de dispositifs de coupure (interrupteurs et disjoncteurs, encore appelés ressources) et de charges. La *Figure 3.1* donne une vue d'ensemble d'un réseau électrique complet.

Dans ce réseau, nous pouvons nous apercevoir qu'il existe des liaisons entre deux nœuds qui contiennent un organe de coupure (par exemple, la liaison entre le nœud 1 et le nœud 2) ainsi que des liaisons entre deux nœuds qui ne contiennent pas d'organes de coupure (par exemple, la liaison entre le nœud 2 et le nœud 3).

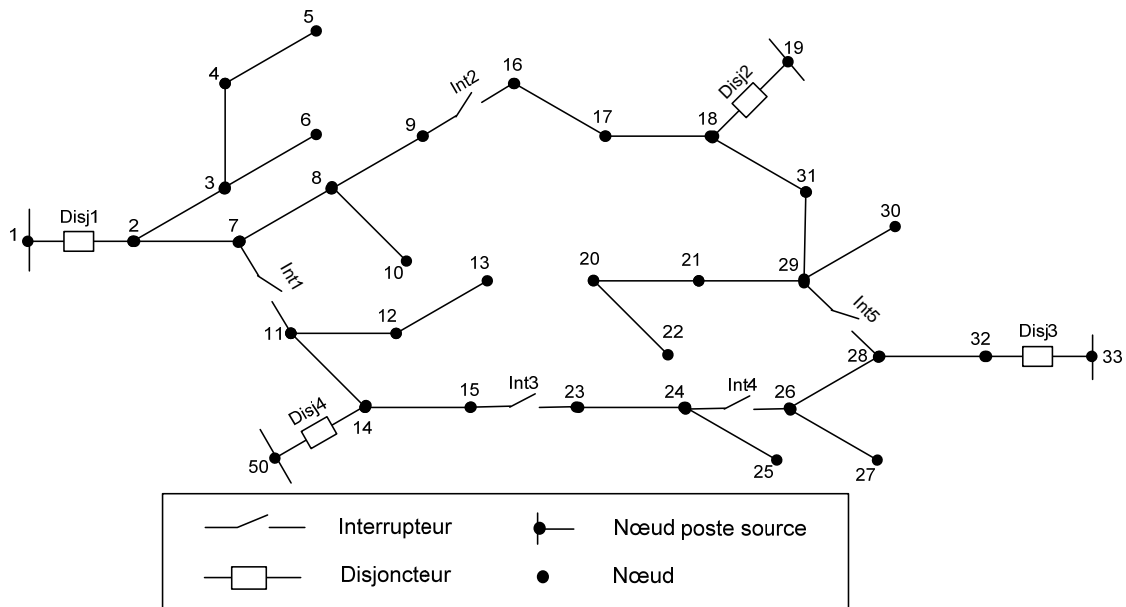


Figure 3.1 : exemple d'un réseau électrique complet

Afin de simplifier l'étape de modélisation, sans en perdre évidemment les éléments fondamentaux, nous nous proposons ici de réduire le réseau en groupant tous les nœuds qui sont liés par seulement une ligne (sans ressource). Le réseau dans ce cas est appelé « le réseau réduit ». Une structure du réseau réduit résultant est présentée dans la *Figure 3.2*. Nous procédons à cette « simplification » pour ne considérer que les éléments ayant un impact sur la modification de la configuration du réseau (interrupteurs et disjoncteurs).

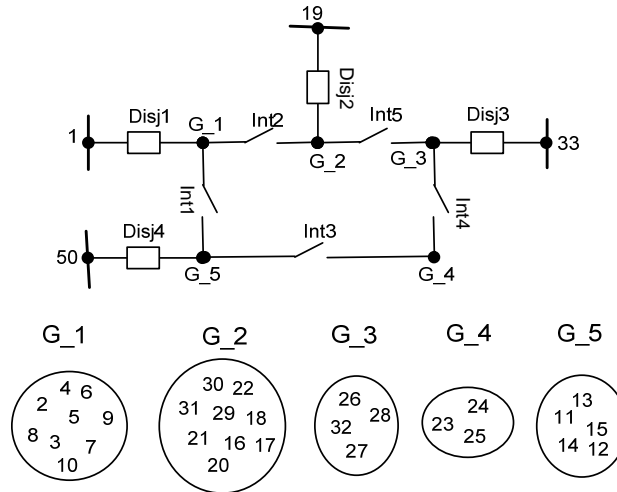


Figure 3.2 : réseau électrique réduit correspondant

Dans ce réseau réduit, un nœud représente un client ou un groupe de clients qui sont raccordés sur ce nœud (appelé « nœud groupé »). Sur la *Figure 3.2*, il y a cinq nœuds groupés, quatre nœuds poste source, quatre disjoncteurs et cinq interrupteurs.

Désormais, nous considérerons le terme de réseau (ou structure ou configuration) comme correspondant à un réseau (ou structure ou configuration) réduit.

Une hypothèse importante concerne les types de dispositifs de coupure existant dans un réseau : il en existe de plusieurs types (*cf. Tableau 1.1* du Chapitre 1). Dans l'optique de la modélisation du réseau, nous considérons qu'un interrupteur de secours (interrupteur normalement ouvert) et un disjoncteur sont identiques. Cette supposition est uniquement valable du point de vue de la reconfiguration où l'on considère seulement la possibilité de manœuvrer sous ou hors tension un dispositif de coupure. Aussi, pouvons-nous décomposer les dispositifs de coupure dans un réseau de distribution en deux catégories : Interrupteur (manœuvrable hors tension) et Disjoncteur (pouvant être manœuvré sous tension). Un réseau est ainsi considéré comme étant composé par des nœuds poste source, des nœuds groupés, des lignes représentant des liaisons qui contiennent des ressources, des interrupteurs et des disjoncteurs.

3.2.2 Connexion, structure et configuration du réseau

Connexion : il s'agit d'un élément principal du réseau reliant deux nœuds, un défini comme le nœud de départ (*Nœud – D*) et un autre défini comme le nœud d'arrivée (*Nœud – A*) (*cf. Figure 3.3*). La distinction entre nœud de départ et nœud d'arrivée permet de fixer une origine sur la connexion. Sur la base de cette origine et du sens du flux de puissance sur cette

connexion, nous pouvons déterminer que ce flux transite vers la direction « positive » ou vers la direction « négative » en respectant la règle suivante :

- si le flux électrique circule du nœud de départ au nœud d'arrivée d'une connexion, nous dirons que le flux électrique circule vers la direction positive.
- si le flux électrique circule du nœud d'arrivée au nœud de départ d'une connexion, nous dirons que le flux électrique circule vers la direction négative.

Une connexion dans un réseau est composée par un et un seul organe de coupure (interrupteur - *Int* ou disjoncteur - *Disj*) et une ligne.

Muni de cette définition d'une connexion, nous proposons que le nom de la connexion soit noté par « Conn » suivi du nom d'un disjoncteur ou d'un interrupteur correspondant. Par exemple, la connexion qui contient un disjoncteur est appelée « *ConnDisjX* », la connexion qui contient un interrupteur est appelée « *ConnIntX* » (X est le numéro du disjoncteur ou de l'interrupteur dans le réseau simplifié).

Structure d'un réseau : la structure d'un réseau représente l'ensemble de toutes les connexions constituant un réseau indépendamment de leurs états.

Configuration d'un réseau : elle représente un état du réseau en régime établi dans laquelle chaque connexion a un état défini (composé de l'état mécanique de la ressource et de l'état électrique de chaque connexion).

Notons cependant que si nous connaissons la configuration d'un réseau réduit, il est aisé de retrouver la configuration complète correspondante.

La *Figure 3.3* illustre à gauche une structure topologique d'un réseau et à droite une configuration associée.

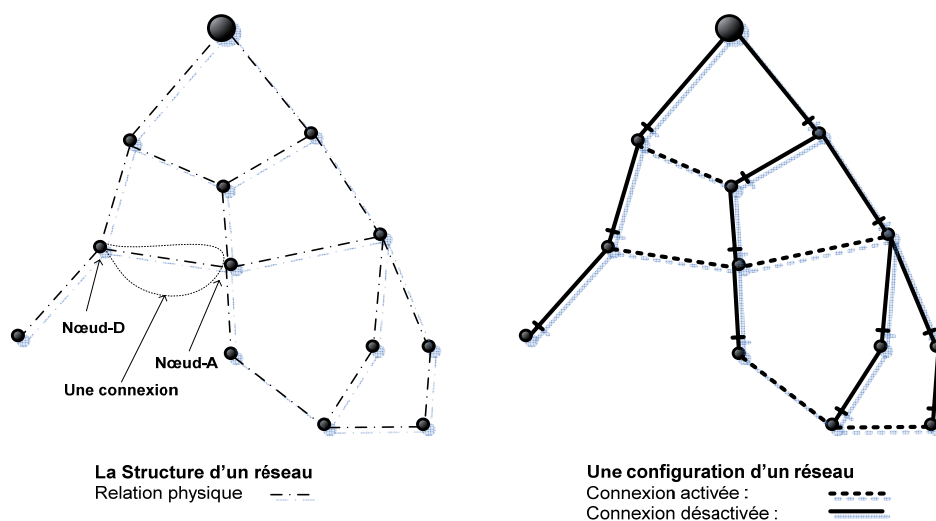


Figure 3.3 : structure et configuration d'un réseau

3.2.3 Types des nœuds

Sur la base des deux définitions d'un réseau (réseau complet et réseau réduit), nous proposons ici quelques définitions supplémentaires utiles pour la compréhension de la suite du mémoire.

Nœud groupé : correspond à un nœud du réseau réduit. A chaque nœud groupé correspond un ensemble de paramètres de connexions ne contenant pas de ressources. Ces paramètres seront utilisés pour le calcul de répartition de charges d'un réseau complet.

Nœud détaillé : correspond à un nœud du réseau complet. Les informations relatives représentent les paramètres du nœud considéré.

Nœud source : nœud (détaillé ou groupé) qui a la possibilité de fournir de l'énergie (il existe de la tension sur ce nœud). Si un nœud joue le rôle de nœud source, nous pouvons dire que des clients qui sont raccordés sur ce nœud sont alors alimentés (*cf. Figure 3.4*).

Nœud séparé : contrairement au nœud source, un nœud séparé (détaillé ou groupé) est un nœud qui n'a pas la possibilité de fournir de l'énergie aux clients (un nœud séparé est caractérisé par une absence de tension du groupe des clients qui sont raccordés en ce point) (*cf. Figure 3.4*).

Nœud source primaire/secondaire : dans un réseau de distribution, les configurations d'exploitation seront généralement radiales ou arborescentes [DOU-2001]. Il n'existe donc aucune boucle dans le réseau. Aussi, le flux électrique qui circule dans chaque départ du réseau va du poste source vers les nœuds extrémités via toutes les connexions actives de ce départ. Si une connexion est activée, les deux nœuds de cette connexion jouent le rôle de nœuds source. Parmi ces deux nœuds, un a le rôle de nœud source primaire (plus proche du poste source), l'autre a le rôle de nœud source secondaire (plus loin du poste source).

Reportons nous à la *Figure 3.4*. Nous partons d'un réseau dans lequel toutes les connexions sont désactivées (tous les nœuds dans ce réseau sont séparés sauf le nœud « poste source », pour le réseau à gauche dans la *Figure 3.4*). Supposons l'activation de la connexion 1 dans la *Figure 3.4*, un nœud séparé va donc être connecté au nœud source via une connexion active, il devient alors un nœud source secondaire (la connexion 1 de la *Figure 3.4* à droite).

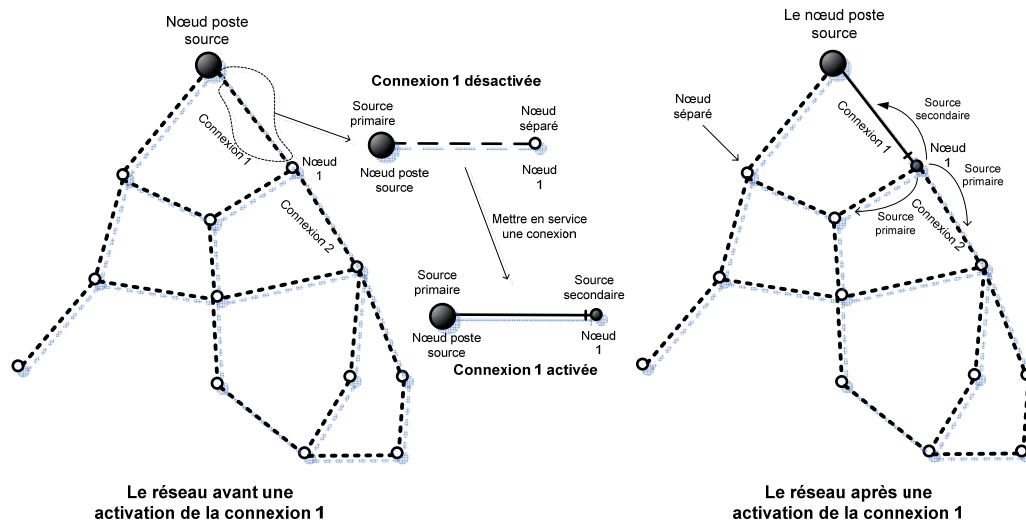


Figure 3.4 : nœuds poste source : source primaire et source secondaire

Notons cependant qu'un nœud peut avoir le rôle de nœud source secondaire pour une connexion, mais il peut également jouer le rôle de nœud source primaire pour une autre connexion. Par exemple, sur la *Figure 3.4* à droite, le nœud 1 a le rôle de nœud source secondaire par rapport à la connexion 1 mais il a le rôle de nœud source primaire par rapport à la connexion 2 si cette connexion est activée.

3.2.4 Variables d'état du réseau

A un instant t , l'état du réseau complet intègre des informations relatives aux connexions du réseau en régime établi. Si nous connaissons la configuration du réseau complet (l'existence de la tension sur des nœuds ainsi que la configuration du réseau complet) et les valeurs électriques en régime établi, l'état de ce réseau est aisément déterminable.

Mais la configuration d'un réseau complet reste également vraie en considérant la configuration du réseau réduit correspondant ce qui nous permet de réduire le volume de calculs. Nous considérons donc deux groupes de variables qui représentent une configuration d'un réseau réduit :

V_{EMd} : variables d'état mécanique des ressources du réseau réduit.

V_{EEs} : variables d'état caractérisant l'existence de la tension sur les bornes des connexions du réseau réduit.

Les valeurs électriques en régime établi du réseau complet (comme la valeur du courant circulant dans les connexions et la valeur du tension aux deux bornes des connexions, la

valeur de flux de puissance circulant dans les connexions) sont regroupées quant à elles dans l'ensemble suivant :

V_{VEd} : variables électriques du réseau complet en régime établi.

Les définitions détaillées des variables pour chaque groupe sont présentées dans la suite de cette section.

3.2.4.1 Variables d'état mécanique des ressources

Comme nous disposons de deux types de ressources dont l'état mécanique peut évoluer, nous définissons deux variables d'état mécanique correspondant :

- à un interrupteur X - **Ressource.IntX.Etat**
- à un disjoncteur X - **Ressource.DisjX.Etat**.

La *Figure 3.5* illustre ce concept sur la base de deux types de ressources.

Variable d'état mécanique de la ressource Int-X		Variable d'état mécanique de la ressource Disj-X	
Nom:	Ressource.IntX.Etat	Nom:	Ressource.DisjX.Etat
Connexion:	ConnIntX	Connexion:	ConnDisjX
Ressource:	Interrupteur X	Ressource:	Disjoncteur X
Valeurs:	Ouvert, Fermé	Valeurs:	Ouvert, Fermé

Figure 3.5 : variables d'état mécanique

3.2.4.2 Variables d'état liées à la tension des connexions

L'état de la tension d'une connexion du réseau représente en fait l'existence ou non de cette tension ainsi que la direction du transit d'énergie sur la connexion considérée. Cet état est donc représenté par trois variables d'état pour une connexion :

- une variable d'état qui correspond à l'existence d'une tension sur le Nœud-D de la connexion : **Flux.Nœud-D**.
- une variable d'état qui correspond à l'existence d'une tension sur le Nœud-A de la connexion : **Flux.Nœud-A**.
- une variable d'état qui permet de déterminer le sens du transit d'énergie dans une connexion : **Ressource.Int-X.Sens** pour le type de ConnInt-X ou **Ressource.Disj-Y.Sens** pour le type de ConnDisj-Y.

La *Figure 3.6* en illustre un jeu des valeurs. Pour simplifier la description, nous affecterons la valeur « 0 » à l'état «*NœudSéparé*» et « 1 » à l'état «*NœudSource*».

Variable d'état d'existence de la tension d'un nœud-D

Nom: Flux.Nœud-D
 Connexion: ConnDisjX/ConnIntX
 Nœud: Nœud-D
 Valeurs: NœudSéparé (0), NœudSource (1)

Variable d'état d'existence de la tension d'un nœud-A

Nom: Flux.Nœud-A
 Connexion: ConnDisjX/ConnIntX
 Nœud: Nœud-A
 Valeurs: NœudSéparé (0), NœudSource (1)

Variable pour déterminer le sens de flux électrique dans la ConnInt-X/ConnDisj-Y:

Nom: Ressource.Int-X.Sens/Ressource.Disj-Y.Sens
 Connexion: ConnInt-X/ConnDisj-Y
 Ressource: Interrupteur-X/Disjoncteur-Y
 Valeurs: Aucun, Positif, Négatif

Signification des modalités:

Aucun : Il n'y a pas de nœud source secondaire
 Positif : Le sens de flux électrique est déterminé du nœud – D au nœud – A
 Négatif : Le sens de flux électrique est déterminé du nœud – A au nœud – D

Figure 3.6 : Variables d'état électrique

3.2.4.3 Variables électriques du réseau complet

La méthode que nous développons doit permettre d'obtenir une séquence d'ordres de commande conduisant à une configuration respectant les objectifs fixés, mais nous devons aussi garantir que la configuration du réseau complet (cf. section 3.2.1) obtenue puisse fonctionner en toute sécurité (cf. Chapitre 1, section 1.2.3.1). Ici, nous nous proposons de définir les variables qui représentent les valeurs électriques sur chaque connexion dans un réseau complet en régime établi. Dans notre cadre d'étude, ces variables sont :

- les variables qui correspondent aux valeurs du flux de puissance sur les connexions du réseau complet : P_{ij}, Q_{ij}
- les variables qui correspondent aux valeurs de tension sur les nœuds du réseau complet : E_i
- les variables qui correspondent à la phase de la tension sur les nœuds du réseau complet : θ_i
- les variables qui correspondent aux valeurs du courant circulant dans chaque connexion du réseau complet : I_{ij}

La *Figure 3.7* résume les variables en rapport avec les valeurs électriques du réseau complet en régime établi ainsi que leurs significations.

Descriptions des variables représentant des valeurs électriques		
P_{ij}	(MW) :	La puissance active circulant dans la connexion qui lie le nœud-i et le nœud-j
Q_{ij}	(MVAR):	La puissance réactive circulant dans la connexion qui lie le nœud-i et le nœud-j
E_i	(kV) :	La tension sur le nœud-i
Φ_i	(Rad) :	La phase entre la tension et le courant au nœud-i
I_{ij}	(A) :	Le courant circulant dans la connexion qui lie le nœud-i et le nœud-j

Figure 3.7 : variables d'état électrique du réseau complet

Ces valeurs électriques peuvent être déterminées par un calcul de répartition des charges pour le réseau complet [PAN-1999]. Nous y reviendrons plus en détails dans le Chapitre 4.

3.3 Modèle du réseau

Comme nous l'avons déjà mentionné dans ce mémoire, un réseau de distribution est constitué de connexions qui lient les nœuds du réseau entre eux. La configuration d'un réseau à chaque moment peut être déterminée via l'état des connexions de ce réseau.

L'idée d'appliquer la modélisation des systèmes de production présentée dans la thèse de S.Henry (cf. chapitre V, thèse de S.Henry [HEN-2005]), avec les extensions présentées dans la section 2.5.1 du Chapitre 2, au contexte des réseaux électriques est détaillée dans cette section.

Nous considérerons ainsi qu'un réseau est constitué par un ensemble de connexions. Chaque connexion est décrite par des opérations qui ont la capacité de modifier l'état (mécanique et même électrique) de cette connexion. Dans le cadre de notre étude, en lieu et place des opérations de : transformation, transitive et préparation, nous proposons des opérations suivantes pour le réseau électrique : les opérations de préparation et les opérations induites. Les définitions de ces deux types d'opérations sont présentées dans ce qui suit. Notons bien que des opérations de transformation existent dans un réseau électrique (transformateurs), nous ne les modéliserons pas ici car les transformateurs seront directement assimilés à des postes sources ; nous nous focalisons en effet uniquement sur le réseau de distribution et non l'ensemble des réseaux de transport et de répartition.

Opération de préparation d'une connexion : c'est une opération commandable par l'opérateur. Pour une telle opération, seule une évolution mécanique de la ressource est prise en compte (ceci sera illustré dans la section 3.3).

Opération induite pour une connexion : c'est l'opération qui est réalisée naturellement si toutes ses conditions et ses contraintes sont vérifiées. Pour une telle opération, seules les

évolutions associées sur le flux électrique doivent être modélisées. Il n'existe pas d'évolution mécanique de la ressource dans ce cas (ceci sera illustré dans la section 3.3).

Ces opérations vont être présentées en détails dans la suite.

3.3.1 Forme générale du modèle des opérations d'une connexion

3.3.1.1 Modèle d'une opération de préparation

La forme générale du modèle d'une opération de préparation est présentée dans la *Figure 3.8*. Sous cette forme, il existe seulement une évolution de la ressource. Les parties qui sont mises entre guillemets « ... » sont à renseigner pour les différentes opérations considérées. La signification de ces champs est décrite dans la suite du texte.

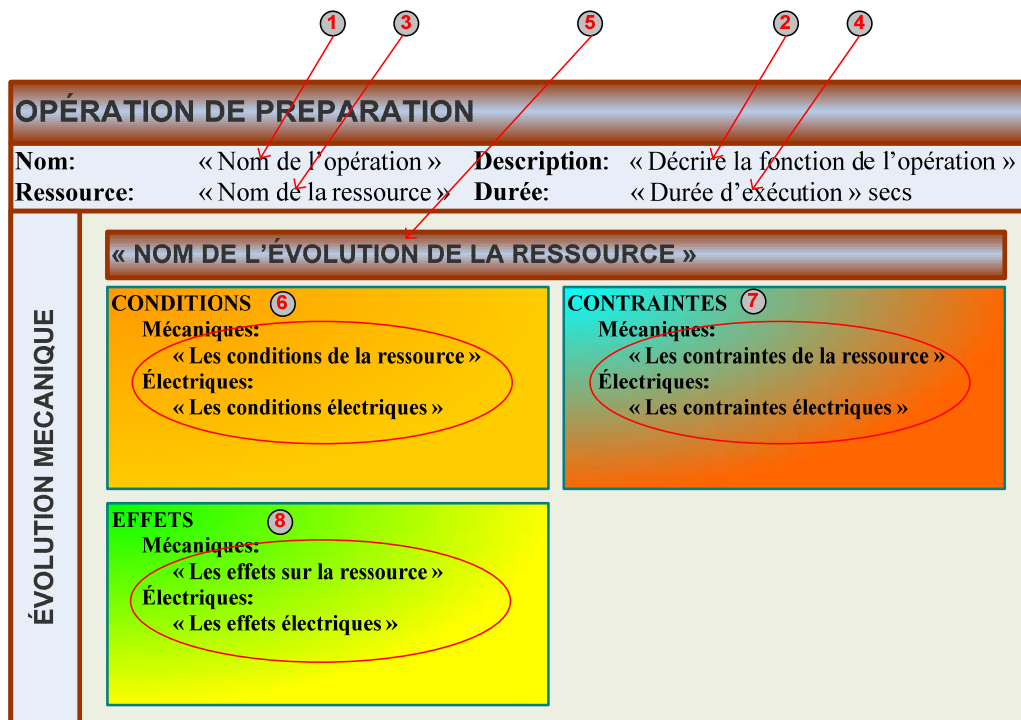


Figure 3.8 : forme générale d'une opération de préparation

1 - « **Nom de l'opération** » : ce champ correspond au nom de l'opération. En général, le nom d'une opération contient des informations brèves pour l'identifier comme par exemple : FermerInt-X.

2 - « **Décrire la fonction de l'opération** » : ce champ est utilisé pour décrire en détails la fonction de cette opération comme par exemple : Fermer l'interrupteur-X.

3 - « **Nom de la ressource** » : le nom de la ressource dans la connexion considérée est mentionné dans ce champ : la ressource Int-X.

4 - « **Durée d'exécution** » : une opération est utilisée pour changer l'état d'une connexion. Le temps opératoire est compris dans cette durée. Elle est utile pour la recherche de la séquence des manœuvres la plus courte (en durée d'exécution). Dans notre cas, ceci aura une importance pour les opérations mettant en œuvre des ressources manuelles (temps d'accès à la ressource comme trajet en voiture par exemple et de manœuvre à prendre en compte).

5 - « **Nom de l'évolution de la ressource** » : c'est le nom du processus de changement d'état de la ressource pour la connexion examinée.

6 - « **Les conditions** » : champ contenant les expressions logiques représentant toutes les conditions qui doivent être vérifiées pour que l'évolution de la ressource puisse se produire. Dans le réseau électrique, il existe deux types de conditions : les conditions qui ont des relations avec des ressources appelées « les conditions des ressources » et les conditions qui ont des relations avec le flux électrique (existence de la tension sur des nœuds) appelées « les conditions électriques ».

7 - « **Les contraintes** » : dans ce champ, nous plaçons les contraintes de l'environnement de la ressource qui doivent être respectées afin de garantir le fonctionnement en sécurité de l'opération considérée. Parmi ces contraintes, nous distinguons « les contraintes sur les ressources » et « les contraintes électriques ».

8 - « **Les effets** » : état attendu de la ressource après exécution d'une l'opération. Dans ce champ, nous ne mentionnons que les effets sur la ressource car il n'y a pas d'effets sur le flux électrique.

Selon la classification des opérations dans un réseau ci-dessus, le type des opérations de préparation comprend :

- les opérations de fermeture des ressources (Interrupteur/Disjoncteur),
- les opérations d'ouverture des ressources (Interrupteur/Disjoncteur).

3.3.1.2 Modèle d'une opération induite

La forme générale du modèle d'une opération induite est présentée dans la *Figure 3.9*. Pour une opération induite, il peut exister plusieurs évolutions induites. Il n'y a pas d'évolution de la ressource associée. Les parties qui sont mises entre guillemets « ... » peuvent varier selon les différentes opérations.

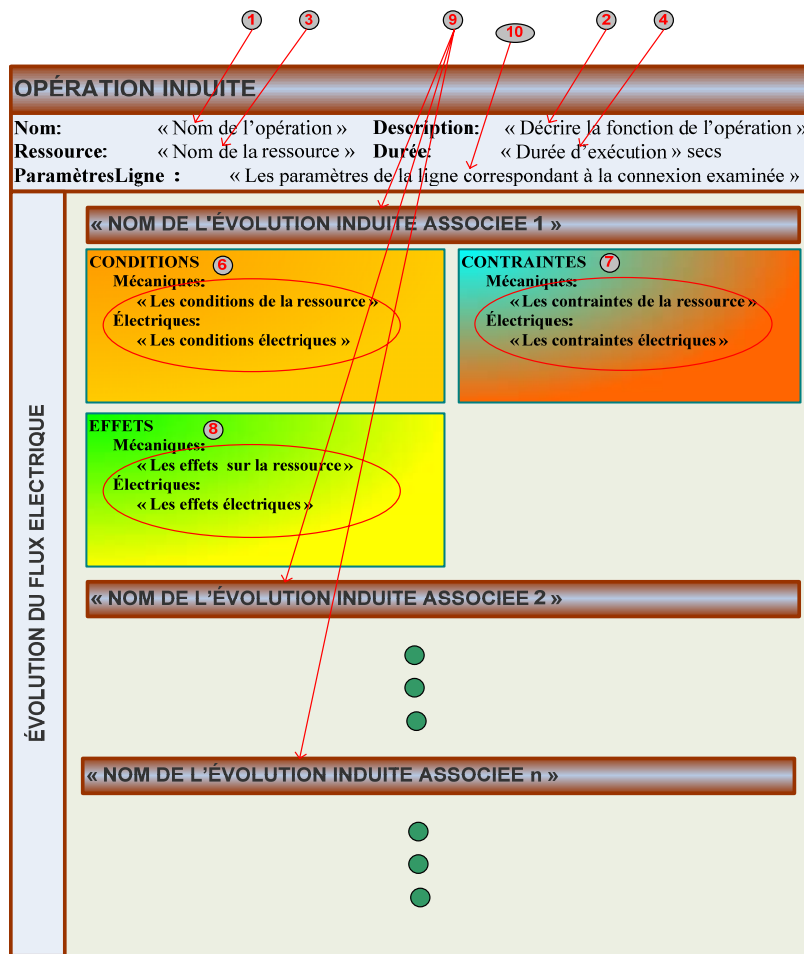


Figure 3.9 : modèle d'une opération induite

Sous cette forme, les champs numérotés 1, 2, 3, 4, 6 et 7 ont une signification identique à celle d'une opération de préparation. Nous ne mentionnons ici que les autres champs.

8 - « *Les effets* », correspond à l'état attendu après exécution de l'opération. Il contient seulement les effets sur le flux électrique. Il n'y a pas d'effets sur les ressources.

9 – « *nom de l'évolution induite associée au flux électrique n* » correspond au nom de l'évolution n du changement d'état d'une connexion.

10 – « *Les paramètres de la ligne correspondant à la connexion examinée* » représentent les paramètres de la ligne de la connexion examinée. Cette partie n'existe que dans les opérations d'activation d'une connexion (ce type d'opération va être présenté à la section 3.3). Pour les autres opérations induites, elle n'a pas d'utilité.

Pourquoi ajoute-t-on les paramètres de la ligne dans ce type de modèle ? L'idée consiste à mettre à disposition toutes les informations requises pour le calcul de répartition de charges afin de déterminer les valeurs électriques du réseau complet en régime établi. Nous savons qu'une configuration du réseau complet peut être déterminée par les connexions activées qui

contiennent des ressources et les connexions qui ne contiennent pas de ressources regroupées dans les nœuds groupés dans le réseau réduit correspondant. Ainsi, le calcul de la répartition des charges du réseau complet peut être déterminé à partir de la configuration du réseau réduit, les paramètres des connexions activées et les paramètres des nœuds alimentés (groupés ou détaillés).

Les paramètres dans cette partie des connexions activées correspondent à ceux d'une ligne. Le modèle d'une ligne est représenté pour un schéma en π [ARR-1990] comme dans la *Figure 3.10*. Ce modèle est constitué par une impédance série (la résistance R_l de la ligne et la réactance X_l de la ligne) et une susceptance shunt B_s . Cette susceptance shunt est cumulée et scindée en 2 parties égales localisées par hypothèse aux deux extrémités de la ligne.

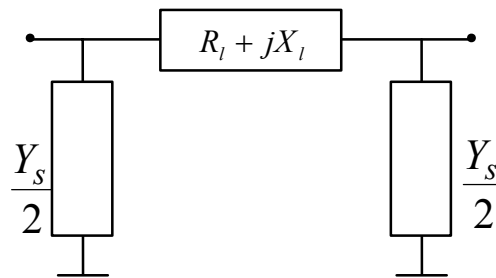


Figure 3.10 : modèle d'une ligne

Enfin, un dernier paramètre de la ligne doit être pris en compte, il s'agit de la valeur maximale de puissance pouvant circuler sur une ligne : P_{\max} . En régime établi, si la puissance circulant sur une ligne dépasse P_{\max} , cette ligne est considérée «*en surcharge*».

La forme et la signification des variables d'une ligne du réseau (réduite/complet) sont présentées dans la *Figure 3.11*.

```
ParamètresLigne = "[Nœud-D, Nœud-A, Résistance, Réactance, Susceptance, Pmax]"
Exemple : paramettresLigne="[U_8, U_14, 0.07, 0.20, 6.00, 45.64]"
```

Descriptions des variables d'une ligne

- Nœud-D : Le nom du nœud groupe de départ de la ligne
- Nœud-A : Le nom du nœud groupe d'arrivée de la ligne
- Résistance : Résistance totale de la ligne R_l
- Réactance : Réactance totale de la ligne X_l
- Susceptance : Susceptance totale de la ligne Y_s
- Pmax : La puissance maximale de la ligne

Figure 3.11 : description des paramètres d'une ligne du réseau complet

Selon aussi la classification des opérations dans un réseau, le type des opérations induites comprend :

- les opérations d'activation des connexions (ConnDisjX/ConnIntX),
- les opérations de désactivation des connexions (ConnDisjX/ConnIntX),
- les opérations de séparation des connexions (ConnDisjX).

En résumé, dans un modèle du réseau, il existe au moins 25% des opérations d'activation. 75% des autres opérations sont les opérations de fermeture, d'ouverture, de désactivation et de séparation. Les évolutions associées aux opérations (de type préparation et de type induite) vont être présentées dans la section 3.3.2.

3.3.2 Evolutions des opérations d'une connexion

Considérons le réseau en régime établi et donc dans un état déterminé. S'il y a un effet de l'extérieur (par exemple : une manœuvre de l'opérateur du réseau) qui agit sur une des ressources du réseau, tout d'abord, l'état physique de cette ressource est changé. Suite à ce changement d'état physique de la ressource, l'état électrique de la connexion qui contient cette ressource est aussi changé et peut éventuellement entraîner le changement d'état d'autres connexions qui ont une relation directe ou indirecte avec cette connexion. L'état du réseau va alors atteindre un autre état. Ces changements d'état peuvent s'effectuer de manière instantanée (par exemple, les opérations induites relatives à l'ouverture d'un interrupteur dans un départ). Cependant, pour les besoins de la modélisation et de la compréhension des liens entre les opérations, nous allons les considérer comme une suite d'opérations de durée brève.

A un instant t , une connexion du réseau a un état électrique déterminé. Si une connexion conduit l'énergie électrique, nous dirons que l'état de cette connexion est « *actif* ». Si une connexion ne conduit pas l'énergie électrique, nous dirons que l'état de cette connexion est « *inactif* ». Nous introduisons ainsi deux nouvelles définitions : l'état actif et l'état inactif d'une connexion.

Etat actif d'une connexion : une connexion a un état actif si et seulement si cette connexion conduit l'énergie.

L'évolution associée à l'activation d'une connexion conduit à un changement de l'état de la connexion de l'état inactif à l'état actif. Les conditions pour activer une connexion sont :

- l'état mécanique de la ressource de cette connexion est fermé.
- l'état électrique de cette connexion est inactif.

Cette connexion va alors réaliser le raccordement électrique d'un nœud (nœud A sur la *Figure 3.12*) sur l'autre nœud de type « nœud source ».

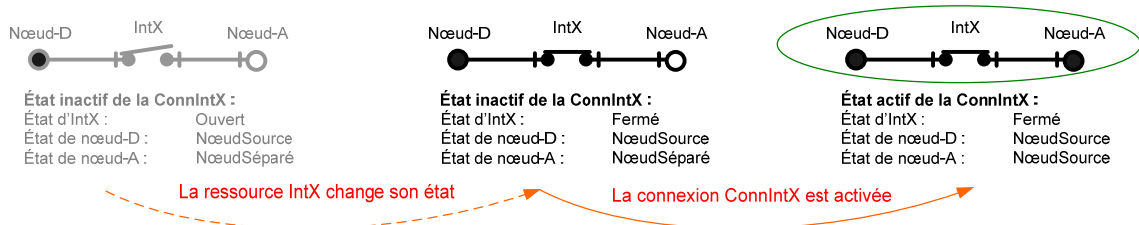


Figure 3.12 : activation d'une connexion

Etat inactif d'une connexion : une connexion est dans un état inactif si et seulement si elle ne conduit pas l'énergie électrique.

L'évolution associée à la désactivation d'une connexion conduit à un changement d'état de la connexion de l'état actif à l'état inactif. Deux cas de désactivation d'une connexion doivent être considérés :

- il y a un changement de l'état mécanique de la ressource de cette connexion active de l'état fermé à l'état ouvert. Cette action va amener le nœud source secondaire à se séparer du nœud source primaire de cette connexion. Dans ce cas-là, la connexion va être désactivée (*cf. Figure 3.13*).

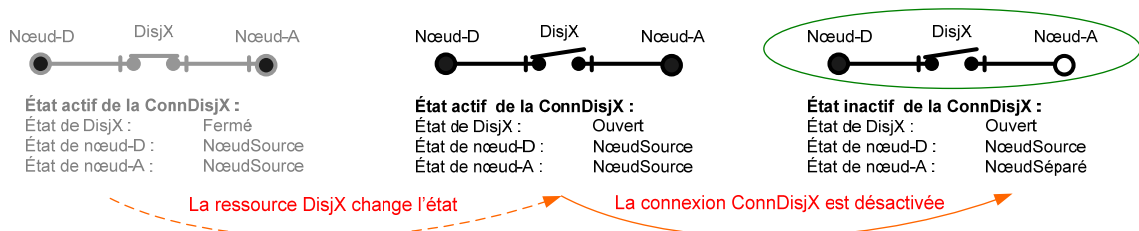


Figure 3.13 : désactivation d'une connexion suite au changement d'état mécanique

- à cause de la désactivation d'une connexion en amont de la connexion considérée, l'état du nœud source primaire de cette connexion change et devient alors un nœud séparé. Dans ce cas-là, la connexion est aussi désactivée (*cf. Figure 3.14*).

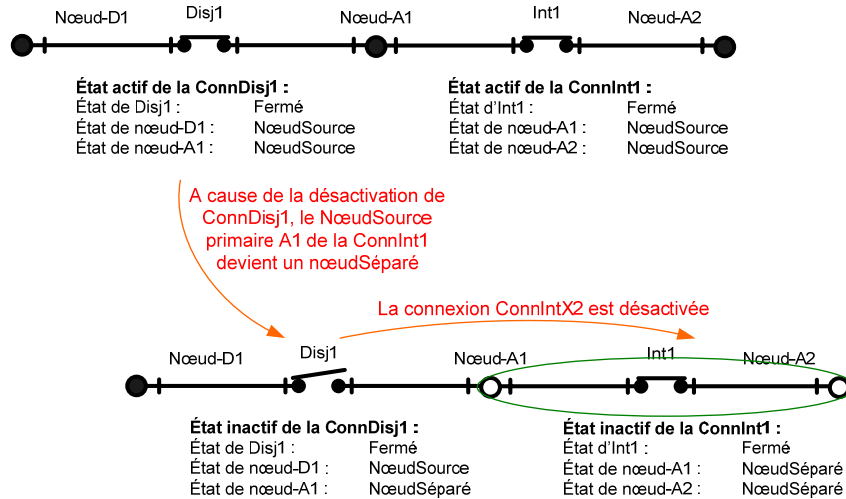


Figure 3.14 : désactivation d'une connexion par effet « induit »

Nous pouvons constater que les actions telles que fermer ou ouvrir une ressource (interrupteur ou disjoncteur) jouent le rôle d'opérations qui modifient les conditions mécaniques pour que les connexions correspondantes puissent changer leur état électrique.

Pour comprendre les évolutions analysées dans cette section, nous allons les présenter associées à un exemple d'un réseau électrique (cf. Figure 3.15).

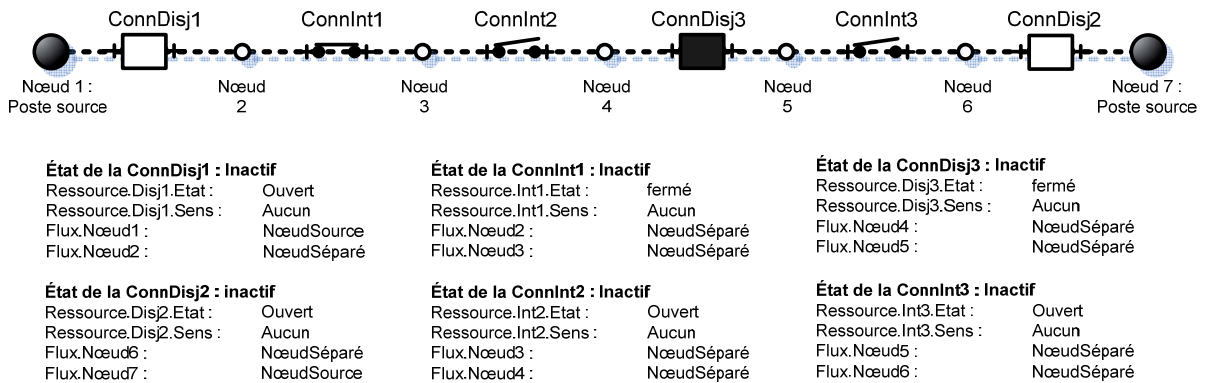


Figure 3.15 : cas d'étude

Dans cet exemple, il y a six connexions. L'état électrique de toutes les connexions est inactif. L'état mécanique des Disj1, Disj2, Int2, Int3 correspond à l'état « ouvert ». L'état mécanique des Disj3 et Int1 est « fermé ». Le nœud 1 et le nœud 7 sont des nœuds postes source. Les autres nœuds sont donc des nœuds séparés.

Les symboles qui vont être utilisés dans les figures de la suite du mémoire sont introduits et définis dans la Figure 3.16.

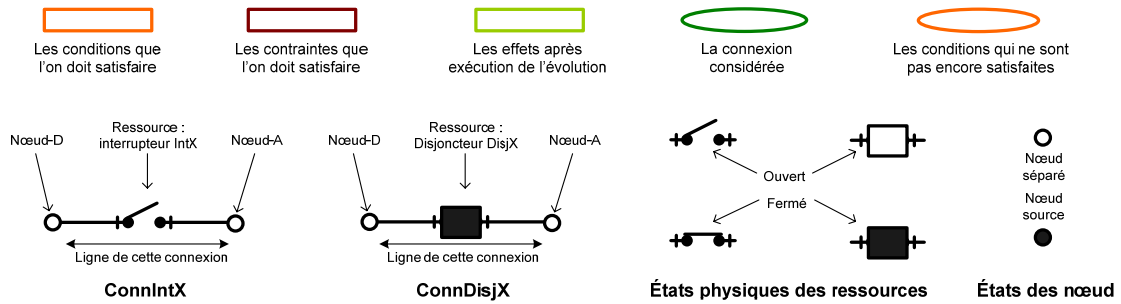


Figure 3.16 : symboles utilisés dans ce mémoire

3.3.2.1 Evolutions associées aux opérations de préparation

Dans cette section, nous ne présentons que des évolutions possibles qui sont associées aux opérations de préparation. Ces évolutions sont appelées « *les évolutions associées aux ressources* ». Dans ces évolutions, nous considérons seulement les effets sur l'état mécanique des ressources. Les évolutions induites qui sont associées aux opérations induites vont être présentées dans la section suivante.

a. Evolutions associées à l'ouverture d'une ressource Int-X/Disj-X

La condition pour ouvrir un interrupteur ou un disjoncteur réside dans le fait que son état mécanique doit être « Fermé ».

Cependant, il existe une différence dans la façon de manœuvrer un disjoncteur et un interrupteur. L'interrupteur est un dispositif de coupure manœuvrable hors tension. Ainsi, dans l'évolution associée à l'ouverture de l'Int-X, nous devons ajouter les contraintes électriques correspondantes : pas de tension sur les deux nœuds nœud-D et nœud-A de cette connexion (« nœud-D est un nœud séparé » et « nœud-A est un nœud séparé »).

La Figure 3.17 introduit ces évolutions (Ouverture de l'Int-X, Ouverture du Disj-X).

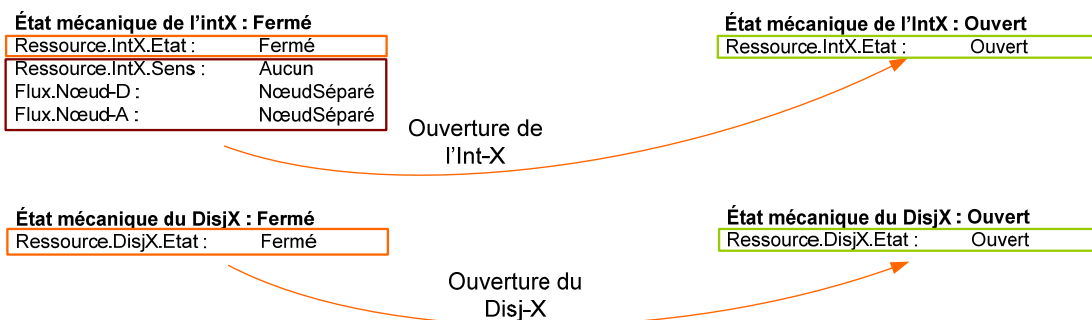


Figure 3.17 : évolutions associées à l'ouverture d'un Int-X/d'un Disj-X

Dans la *Figure 3.18*, nous présentons deux exemples de deux évolutions associées à l'ouverture d'une ressource :

- une évolution « ouverture de l'Int1 » pour illustrer l'évolution d'un interrupteur,
- une autre évolution « ouverture du Disj3 » pour illustrer l'évolution d'un disjoncteur.

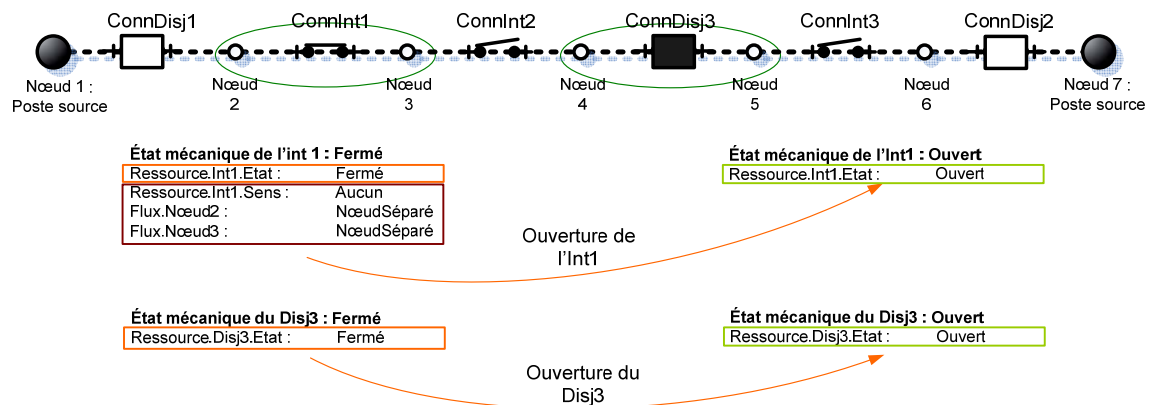


Figure 3.18 : exemple des évolutions associées à l'ouverture de l'Int1/du Disj3

Dans l'évolution « Ouverture de l'Int1 », la condition nécessaire à garantir est que l'état de la ressource « Int1 » soit fermé. En plus de cette condition, des contraintes électriques doivent aussi être garanties. Ces contraintes sont que les nœuds aux bornes de l'Int1 (Nœud2 et Nœud3) doivent être des nœuds séparés (pour autoriser la manœuvre hors tension). L'effet de cette évolution se traduit par le passage de l'état de l'Int1 de « Fermé » à « Ouvert ».

Avec l'évolution « Ouverture du Disj3 », seule la condition (l'état du Disj3 est « Fermé ») est vérifiée. En effet, il n'existe pas de contraintes. L'effet de cette évolution entraîne le passage de l'état du Disj3 de « Fermé » à « Ouvert ».

b. Evolutions associées à la fermeture d'une ressource IntX/DisjX

L'évolution associée à la fermeture d'une ressource correspond à un processus de changement d'état mécanique d'une ressource (Int-X ou Disj-X) de l'état « Ouvert » à l'état « Fermé ». Pour que ces évolutions puissent se produire, la condition « Ouvert » sur l'état de l'Int-X ou du Disj-X doit être satisfaite.

Comme pour les évolutions associées à l'ouverture d'un Int-X, nous devons aussi ajouter les contraintes électriques pour les évolutions associées à la fermeture d'un Int-X. Ces

contraintes sont : nœud-D et nœud-A séparés. Ces évolutions sont introduites dans la *Figure 3.19*.

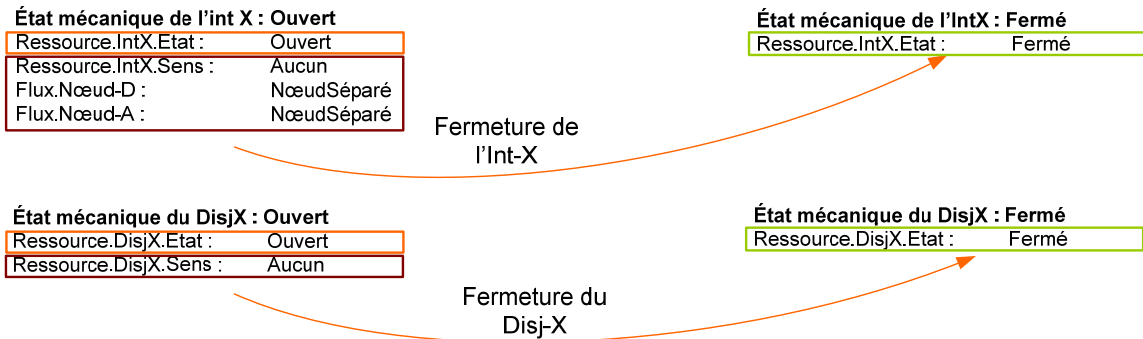


Figure 3.19 : évolutions associées à la fermeture de l'Int-X/du Disj-X

Par exemple, avec l'Int1 et le Disj1, l'évolution associée à la fermeture de ces ressources est présentée dans la *Figure 3.20*.

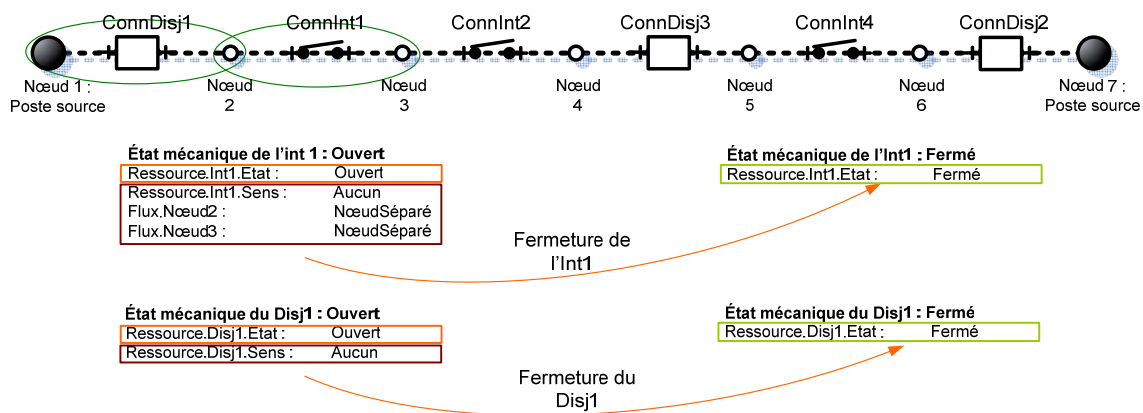


Figure 3.20 : évolutions associées à la fermeture de l'Int-1/du Disj-1

L'état de l'Int1 et du Disj1 est « Ouvert ». Avant l'activation de la ConnDisj1, tous les nœuds aux bornes de l'interrupteur Int1 sont des nœuds séparés (pas de tension à ces deux nœuds). Nous pouvons ainsi fermer ces deux ressources. Après la fermeture de ces ressources, l'état de l'Int1 et du Disj1 est « Fermé ».

3.3.2.2 Evolutions associées aux opérations induites

Ce type d'évolution est le seul à posséder des effets sur l'état électrique des nœuds et des connexions. Dans le cadre des réseaux électriques, la durée d'exécution de ces évolutions induites est très courte (cf. *Tableau 2.2* du Chapitre 2).

a. Evolutions associées à l'activation d'une connexion

L'évolution associée à l'activation d'une connexion correspond au raccordement d'un nœud séparé à un nœud source. L'état de la connexion considérée avant l'activation est inactif. Si le nœud raccordé est le nœud-A de la connexion considérée, ce nœud devient alors le nœud source (existence d'une tension sur ce nœud) et cette connexion est activée vers le sens positif (on appelle cette évolution « *évolution associée à l'activation positive d'une connexion* »). Si le nœud raccordé est le nœud-D de la connexion considérée, ce nœud devient le nœud source et cette connexion est activée vers le sens négatif (on appelle cette évolution « *évolution associée à l'activation négative d'une connexion* »).

Dans le cas où les nœuds aux bornes d'une connexion considérée sont alimentés (ces nœuds sont des nœuds sources), si cette connexion est activée, une boucle est créée. Cette connexion constitue le point de fermeture de la boucle. Ce comportement n'est pas autorisé dans notre étude. Dans le modèle des opérations, l'évolution correspondant à ce cas n'est pas autorisée (cf. *Figure 3.21*).

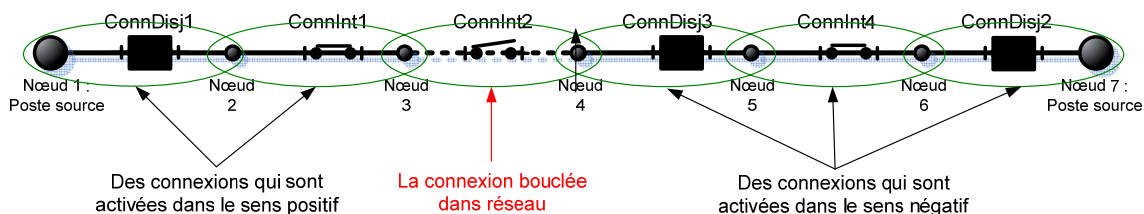


Figure 3.21 : connexion activée dans le sens positif/négatif

Aussi, pour une opération d'activation d'une connexion, il existe deux évolutions possibles. Pour chaque régime de fonctionnement, une seule évolution est activée car nous considérons une circulation unidirectionnelle du courant dans les conducteurs. Nous distinguons dans la suite du document le cas d'un interrupteur et le cas d'un disjoncteur.

- **Evolutions associées à l'activation de la ConnDisjX.**

Pour activer une connexion, les conditions nécessaires que l'on doit satisfaire sont :

- un des deux nœuds à ses bornes est un nœud source,

- l'autre nœud est un nœud séparé.

Les contraintes de ces évolutions sont :

- l'état de cette connexion est inactif,
- l'état physique de la ressource est « fermé ».

Les effets de ces évolutions sont :

- le nœud séparé devient le nœud source
- le sens d'activation de cette connexion devient « positif » ou « négatif ».

La Figure 3.22 présente les évolutions associées à l'activation (positive/négative) de la ConnDisj-X.

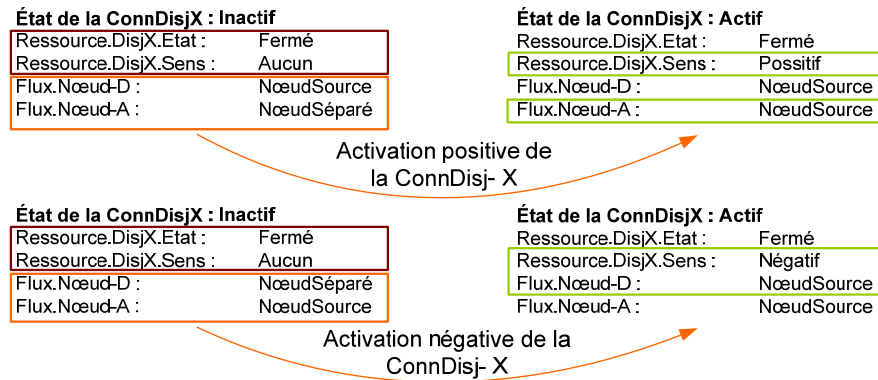


Figure 3.22 : évolutions associées à l'activation de la ConnDisj-X

Un exemple d'illustration de cette évolution est présenté dans la Figure 3.23.

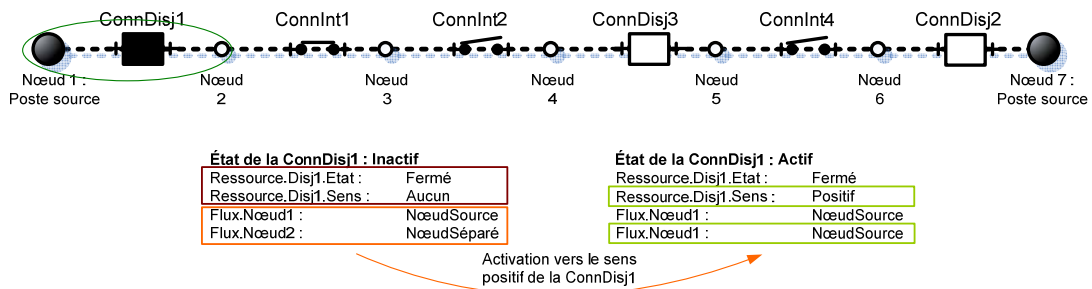


Figure 3.23 : exemple de l'évolution associée à l'activation de la ConnDisj1

Concentrons-nous sur la connexion ConnDisj1 de cette figure. Toutes les conditions et les contraintes sont satisfaites. Aussi, le changement d'état électrique de cette connexion peut se produire. Après cette évolution, le nœud-A de la connexion ConnDisj1 devient le nœud

source (Nœud-2). Cette évolution est appelée « *évolution associée à l'activation positive de la ConnDisj1* ».

- **Evolutions associées à l'activation de la ConnIntX.**

Les remarques faites précédemment restent valides pour cette évolution « *Activation de la ConnIntX* » (cf. Figure 3.24). Nous ne les reprendrons donc pas ici.

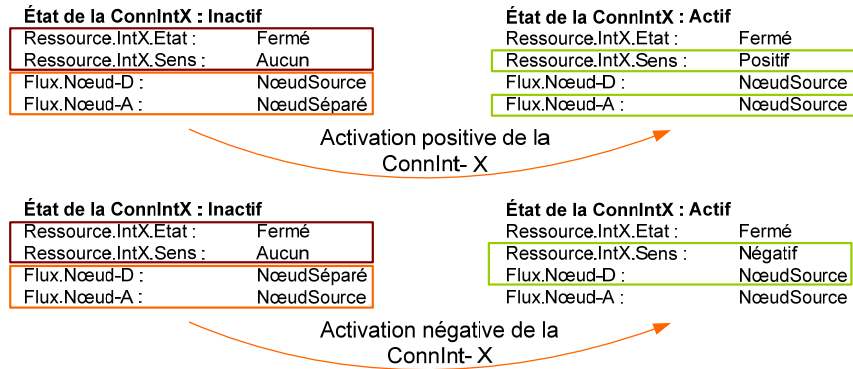


Figure 3.24 : évolutions associées à l'activation de la ConnInt-X

Illustrons cependant l'activation de la ConnInt1 dans la Figure 3.25.

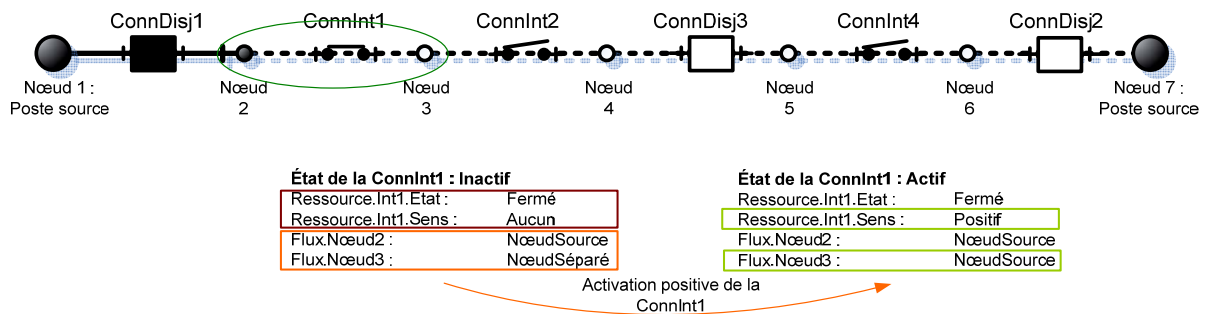


Figure 3.25 : exemple de l'évolution associée à l'activation de la ConnInt1

Les conditions (le Nœud2 est le nœud source, le Nœud3 est le nœud séparé) et les contraintes (l'état de l'Int1 est fermé, l'état de la ConnInt1 est inactif) sont vérifiées. Aussi, cette évolution peut se produire. Après l'activation de la ConnInt1, l'état du nœud séparé Nœud3 devient un nœud source. Parce que le nœud d'arrivée de la ConnInt1 est le Nœud3, cette évolution est alors appelée « *évolution associée à l'activation positive de la ConnInt1* ».

b. Les évolutions associées à la désactivation d'une connexion

- **Evolutions associées à la séparation d'une connexion**

Ces évolutions représentent un des deux cas possibles pour la désactivation d'une connexion (le premier cas dans la *Figure 3.13*). Ce cas existe seulement pour les connexions dont la ressource est un disjoncteur (Ouverture sous tension).

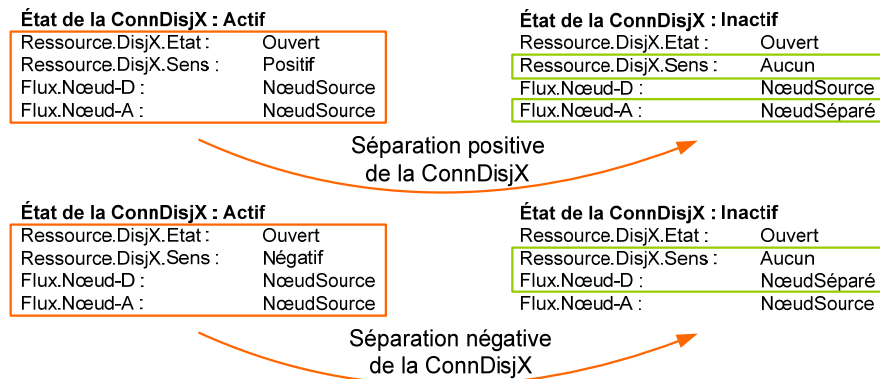


Figure 3.26 : évolutions associées à la séparation de la ConnDisj-X

Considérons la ConnDisj-X de la *Figure 3.26*. L'état de cette connexion est actif. Si nous ouvrons la ressource « Disj-X » de cette connexion, l'état du Disj-X va changer de l'état « Fermé » à l'état « Ouvert ». Cette action va amener une évolution qui sépare le nœud source secondaire du nœud source primaire sur cette connexion. Cette évolution est appelée « *évolution associée à la séparation d'une ConnDisjX* ».

Les conditions qui garantissent que cette évolution puisse se dérouler normalement sont les suivantes : l'état du disjoncteur X est « Ouvert », l'état électrique des deux nœuds bornes est « nœud source », l'état de la connexion est « Active » avec la valeur du sens « Positif » ou « Négatif ».

Si cette évolution se produit, l'état électrique de la connexion considérée devient «Inactif» et le nœud source secondaire devient un nœud séparé.

La *Figure 3.27* introduit un exemple d'une évolution associée à la séparation de la ConnDisj1.

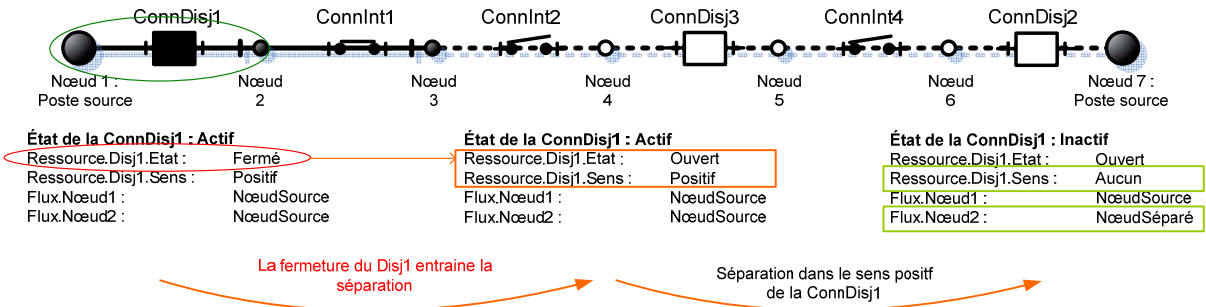


Figure 3.27 : exemple de l'évolution associée à la séparation dans le sens positif de la ConnDisj1

Une évolution de la séparation d'une connexion se produit toujours après une évolution associée à l'ouverture sous tension d'un disjoncteur. Remarquons que ces deux événements s'enchaînent de manière quasi instantanée. Nous avons fixé la durée d'exécution des opérations de séparation à 0.001s dans la continuité d'une opération d'ouverture d'une ressource.

- **Evolutions associées à la désactivation d'une ConnInt-X/ConnDisj-X.**

Si l'état d'une connexion est actif, suite à une séparation ou à une désactivation d'une autre connexion en amont de cette connexion dans le départ, le nœud de source primaire de cette connexion devient un nœud séparé (il y a une coupure électrique en amont). Dans ce cas-là, la connexion est désactivée (c'est le deuxième cas de la Figure 3.14) et le nœud source secondaire dans cette connexion devient un nœud séparé (ce sont des effets de l'évolution induite). Cette évolution est appelée « évolution associée à la désactivation d'une ConnInt-X » (cf. Figure 3.28) ou ConnDisj-X (cf. Figure 3.29).

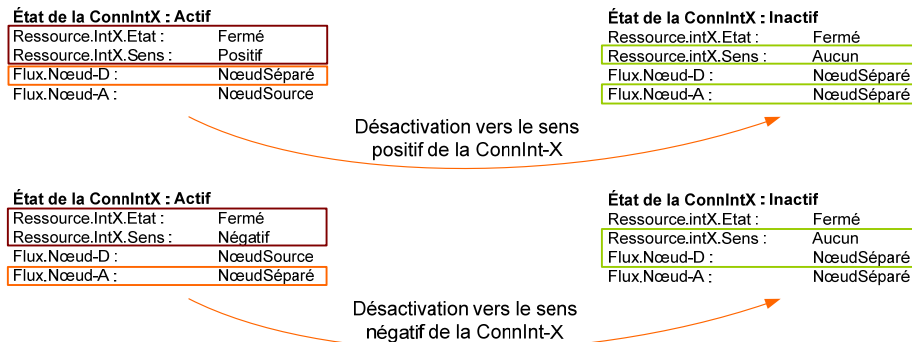


Figure 3.28 : évolutions associées à la désactivation de la ConnInt-X

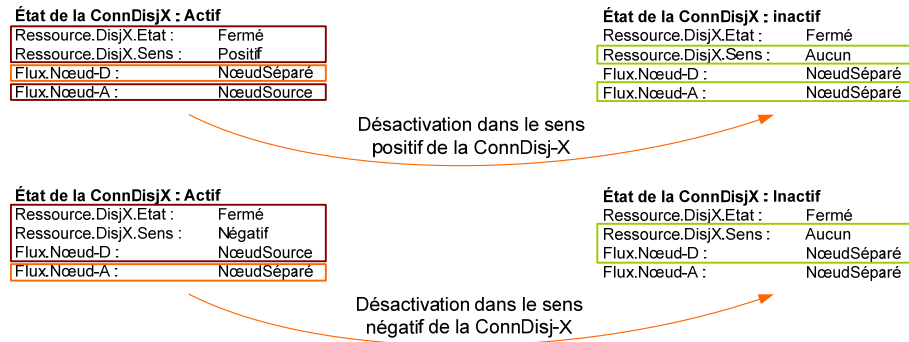


Figure 3.29 : évolutions associées à la désactivation de la ConnDisj-X

Les conditions qui garantissent l'exécution de cette évolution se résument à l'état du nœud source primaire de la connexion correspondant à un « Nœud séparé ». Les contraintes correspondent quant à elles à l'état de la ressource sur la connexion considérée affecté de la valeur « fermée », l'état du nœud source secondaire de la connexion à la valeur « Nœud source » et l'état de la connexion considérée à la valeur « active ».

Dans la Figure 3.30, nous présentons un exemple de désactivation d'une connexion.

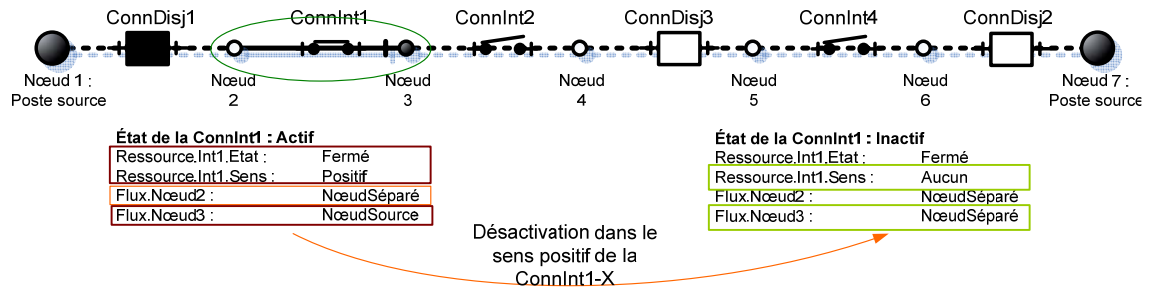


Figure 3.30 : exemple de l'évolution associée à la désactivation dans le sens positif de la ConnInt1

Considérons la ConnInt1. L'état de cette connexion est actif (elle conduit l'énergie). A cause de la désactivation dans le sens positif de la ConnDisj1, le nœud2 devient un nœud séparé. La conséquence du changement d'état du nœud2 (c'est le nœud source primaire de la ConnInt1) revient à ce que la connexion ConnInt1 soit désactivée, c'est-à-dire que l'évolution associée à la désactivation dans le sens positif de la ConnInt1 se produise.

3.4 Modèles des nœuds

Un nœud est un lieu du réseau complet/réduit où deux connexions (ou plus) sont reliées. Généralement, un nœud représente une sous-station dans laquelle une charge consomme et/ou un générateur est connecté. Le modèle d'un nœud (détaillé ou groupé) comporte des informations qui vont être utilisées dans la méthode de reconfiguration d'un réseau présenté au Chapitre 4. Nous disposons de deux types de modèle d'un nœud : le modèle d'un nœud groupé du réseau réduit et le modèle d'un nœud détaillé du réseau complet. Nous présentons ces modèles ci-après.

3.4.1 Modèle d'un nœud détaillé

Le modèle d'un nœud détaillé du réseau complet est présenté dans la *Figure 3.31*. Dans ce modèle, les informations fournies sont le nom du nœud et les paramètres comme le type de nœud, la tension du nœud, P_g , Q_g , P_d , Q_d , Q_{\min} et Q_{\max} .

Nom="XXX" paramètres = [Type, Tension, Pg, Qg, Pd, Qd, Qmin, Qmax]

Exemple : Nom="U_1" paramètres = [2, 1.05, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Descriptions des paramètres d'un nœud

Nom :	Le nom du nœud
Type :	Type du nœud 0 – nœud PQ, 1 – nœud PV, 2 – nœud slack (bilan)
Tension :	Tension apparente du nœud
Pg :	Puissance active générée
Qg :	Puissance réactive générée
Pd :	Puissance active consommée
Qd :	Puissance réactive consommée
Qmin :	Puissance réactive min
Qmax :	Puissance réactive max

Figure 3.31 : modèle d'un nœud détaillé du réseau complet

Le modèle des nœuds détaillés présenté dans cette section va être utilisé dans le calcul de la répartition des charges d'un réseau complet.

3.4.2 Modèle d'un nœud groupé

Le modèle d'un nœud groupé représente les informations des lignes correspondant aux connexions sans ressources qui sont regroupées sous certains groupes du réseau réduit (cf. section 3.2).

Les informations de chaque ligne d'un nœud groupé sont les paramètres de la ligne présentée dans la partie « *Les paramètres de la ligne correspondant à la connexion examinée* » dans le modèle des opérations induite (cf. section 3.3.1.2).

La *Figure 3.32* représente un modèle d'un nœud groupé.

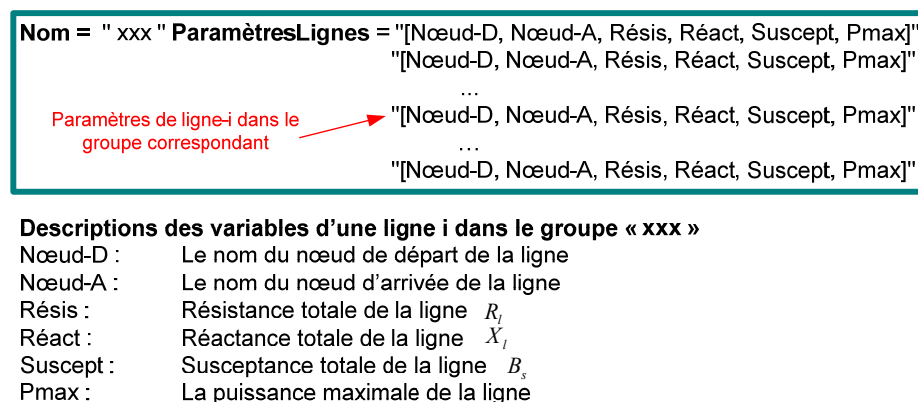


Figure 3.32 : modèle d'un nœud groupé du réseau

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes employés à présenter le formalisme de modélisation que nous avons étendu aux besoins du domaine des réseaux électriques. Ceci nous a conduit à proposer une modélisation du réseau compatible avec l'approche retenue pour procéder à la reconfiguration suite à un défaut. Pour chaque connexion, nous avons détaillé les opérations de préparation (action sur l'état mécanique de la ressource dans la connexion examinée) et les opérations induites (actions sur les variables électriques de la connexion).

Ainsi pour une connexion de type ConnIntX (manœuvrable hors tension), nous avons proposé quatre opérations :

- deux opérations de préparation : Fermer et Ouvrir la ressource IntX.
- deux opérations induites : Activer et Désactiver la ConnIntX.

Pour une connexion de type ConnDisjX (manœuvrable sans tension), nous avons proposé cinq opérations :

- deux opérations de préparation : Fermer et Ouvrir la ressource DisjX.

- trois opérations induites : Activer, Séparer et Désactiver la ConnDisjX.

L'ensemble de ces modèles étant complété par l'intégration des paramètres électriques nécessaires au calcul de répartition de charges.

Le formalisme de modélisation ayant été désormais présenté, le chapitre suivant se propose de développer la méthode de reconfiguration dynamique que nous promouvons.

Chapitre 4

Méthode de reconfiguration des réseaux de distribution

4.1 Introduction

Sur la base de la démarche choisie pour la méthode de reconfiguration d'un réseau après défaut qui est décrite dans le chapitre II ainsi que des modèles développés dans le chapitre III, ce chapitre détaille cette démarche en s'appuyant sur la théorie des graphes afin de chercher et de proposer une meilleure solution (au sens de la configuration exploitable et de la séquence de manœuvres correspondant à la configuration choisie). Pour ce faire, nous effectuons la construction d'un graphe non exhaustif des solutions de reconfiguration à exécuter. À partir des solutions trouvées, nous pouvons alors choisir la meilleure solution adaptée à nos besoins.

Les chapitres précédents ont fourni une vue claire du réseau de distribution et ils ont aussi permis de spécifier et de proposer une mise en forme de toutes les données d'entrée nécessaires à la méthode de reconfiguration. Dans ce chapitre, nous tâcherons de répondre aux questions suivantes : quels sont les principes généraux de la méthode ? Que contient chaque étape de la méthode développée ? Tous ces détails seront abordés.

4.2 Principes généraux de la méthode

Comme nous l'avons mentionné dans la section 2.5.1.2 du Chapitre 2, la démarche proposée est décomposée en 4 étapes : Configurations - Sécurité - Manœuvres - Parallélismes (*cf. Figure 4.1*).

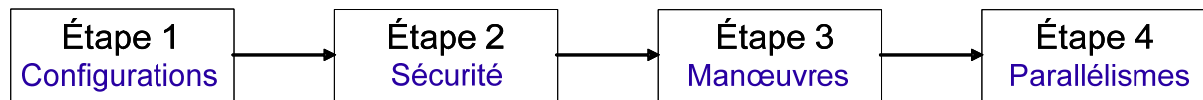


Figure 4.1 : principe général de l'algorithme

L'objectif est de non seulement satisfaire la fonction objectif (alimenter tous les clients) mais également de satisfaire un autre critère d'importance : le temps de calcul de la méthode proposée ne doit pas dépasser la limite d'une coupure brève (cf. section 1.2.3.2 du Chapitre 1).

Cependant, force est de constater que le temps de calcul est difficile à prévoir. Il dépend de plusieurs éléments comme la complexité algorithmique, la taille du réseau ou encore la performance des ressources de l'ordinateur utilisé pour les calculs.

Aussi, pour réduire au mieux le temps de calcul et au-delà du choix d'un ordinateur performant, nous avons privilégié une baisse de nos ambitions en terme d'optimalité de la solution générée au profit du temps de calcul. Notons cependant, car ceci sort largement du cadre de notre étude, que nous n'apportons pas ici de garanties de performance temporelle ; notre souci principal étant ici de générer, au plus vite, une solution sous-optimale de séquence de manœuvres permettant à l'exploitant de reconfigurer le réseau après un défaut. C'est ce qui explique le découpage en quatre grandes étapes de l'algorithme que nous proposons. L'optimalité est obtenue pour chacune des étapes, mais la solution globale générée sera qualifiée de sous-optimale. La suite du document va s'attacher à présenter chacune de ces étapes algorithmiques.

4.3 Définitions

Avant de présenter les quatre étapes de l'algorithme proposé, nous allons donner ici quelques définitions utilisées :

Etat initial du réseau d'étude (e_{init}) : après le défaut, et suite au processus de diagnostic (manuel ou automatique), le réseau est dit dans un état déterminé, nous parlerons d'« état initial » du réseau (l'état des connexions et l'état des ressources sont déterminés, cf. Figure 4.2).

Fonction objectif (FO) : la fonction objectif consiste à réalimenter le maximum des clients sains dans le réseau après un défaut.

Etat objectif du réseau de distribution (e_{obj}) : l'état objectif correspond à l'état qui satisfait la fonction objectif.

Connexions interdites : ce sont des connexions du réseau qui n’ont pas l’autorisation d’être manœuvrées.

Par exemple, dans la *Figure 4.2*, suite à un défaut, nous considérons un réseau de sept nœuds. Le point de défaut réside au nœud N_5. Deux interrupteurs Int2 et Int3 sont ouverts pour isoler la zone de défaut.

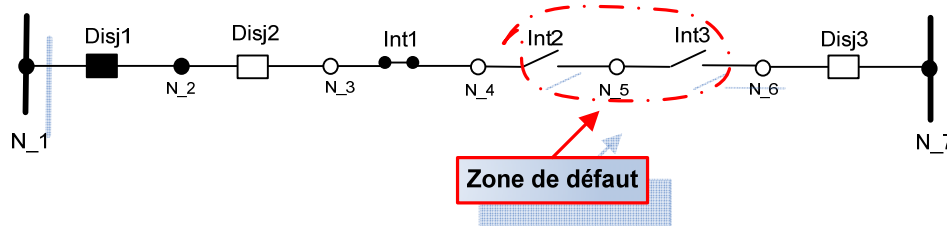


Figure 4.2 : état initial du réseau suite à un défaut

L' e_{init} du réseau est le suivant :

- l'état des connexions ConnDisj1 est actif. L'état des connexions ConnDisj2, ConnDisj3, ConnInt1, ConnInt2, ConnInt3 est inactif,
- la ConnInt2 et ConnInt3 sont interdites (pour isoler la zone de défaut),
- l'état mécanique des ressources Disj1, Int1 est fermé. L'état mécanique des ressources Disj2, Disj3, Int2, Int3 est ouvert.

La *FO* de notre recherche dans cet exemple vise à ce que les nœuds sains non alimentés comme N_3, N_4, N_6 soient réalimentées après la reconfiguration.

Notons que le nœud N_5 dans la zone de défaut ne fait pas partie des nœuds à alimenter suite au défaut.

Structure avant et après le défaut : après l'occurrence d'un défaut, la structure du réseau sera changée car nous avons consigné quelques parties opératives dans l'état ouvert et elles n'ont pas l'autorisation de se refermer (une ou plusieurs parties en défaut du réseau sont isolées). Aussi, certaines connexions dans la partie de défaut qui sont éliminées de la structure initiale. Par exemple, dans le réseau à la *Figure 4.3*, suite à un défaut, deux connexions (ConnInt7 et ConnInt10) sont ouvertes et interdites d'être manœuvrées. La structure après un défaut devient alors comme celle à droite dans la figure (seulement 15 connexions sont utilisables à la place des 17 connexions avant le défaut).

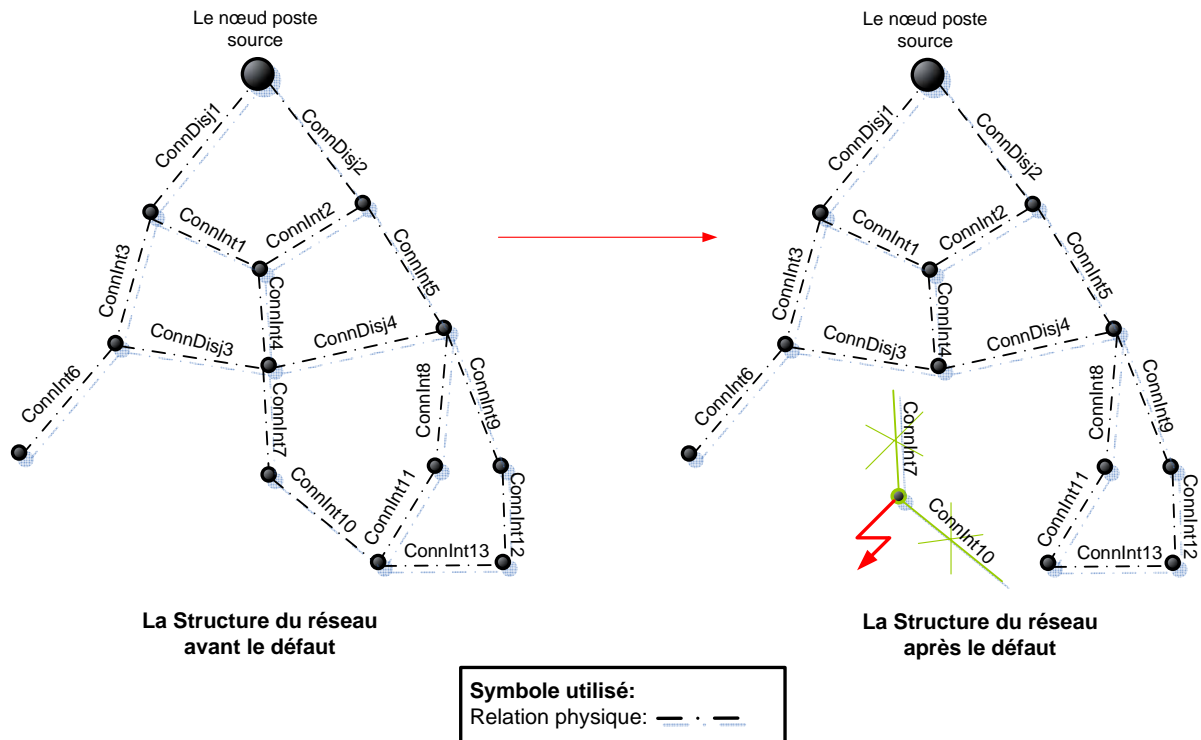


Figure 4.3 : structure avant et après la zone de défaut isolée

4.4 Etape de recherche des configurations possibles (étape 1)

Le but de cette étape consiste à chercher toutes les configurations possibles qui garantissent la *FO*. Cette étape est réalisée en deux phases : la première phase consiste à construire un graphe des opérations possibles en utilisant la théorie des graphes [DIE-2005] et le modèle du réseau décrit au Chapitre 3. La deuxième phase repose sur ce graphe résultant et vise à chercher tous les chemins qui partent de l'état initial du réseau à un des états objectifs du graphe. Ces chemins conduisent à un ensemble de configurations possibles à exploiter suite au défaut (E_{CP}).

$$E_{CP} = \{cp_1, cp_2, \dots, cp_n\}$$

cp_i : configuration possible i

Pour construire un graphe des opérations possibles, il existe plusieurs techniques : construire un graphe des opérations possibles en se basant sur l'ensemble complet des opérations du réseau, construire un graphe en se basant sur l'ensemble des opérations induites du réseau (cf. Chapitre 3, section 3.3.1.2) ou encore construire un graphe en se basant sur les opérations d'activation des connexions (cf. Chapitre 3, section 3.3.1.2) etc. Dans l'objectif de rechercher toutes les configurations possibles, la voie choisie est celle de la construction d'un

graphe des opérations d'activation des connexions du réseau. Avec ce choix, l'objectif de notre recherche est toujours garanti et le temps de construction du graphe est réduit grâce à l'utilisation d'un ensemble partiel des opérations (au lieu d'utiliser l'ensemble complet des opérations) du modèle d'un réseau. Le point de départ du graphe est l'état hypothèse initial (cf. la définition dans la section 4.4.1.1). Ce choix peut toujours apporter suffisamment d'informations pour générer les configurations possibles et permet d'imposer l'état des parties opératives. Le graphe résultant est un graphe orienté qui ne contient pas d'arcs multiples entre deux sommets donnés ainsi que des boucles multiples en un sommet [SIG-2002]. Ainsi, le graphe construit est plus simple (par rapport au graphe non orienté - pas de boucles, pas de graphe multiple) et le temps de construction du graphe est réduit (parce que nous construisons le graphe en nous reposant sur un sous-ensemble des opérations au lieu de l'ensemble complet des opérations du réseau).

4.4.1 Construction d'un graphe des opérations d'activation

Comme nous avons remarqué ci-dessus, le processus de recherche des configurations possibles se base sur un graphe des opérations d'activation. Aussi, dans cette section, nous allons présenter plus en détails la technique de construction de ce graphe.

4.4.1.1 Mise en forme du problème

Chaque réseau électrique a une structure déterminée. En exploitation, le réseau fonctionne sous une certaine configuration qui est déterminée par l'ensemble des connexions actives et l'ensemble des connexions inactives de la structure du réseau.

Par exemple dans la *Figure 4.4*, la structure du réseau exemple est composée de dix sept connexions. A partir de ces connexions, nous pouvons former plusieurs configurations possibles selon la façon d'activer et de désactiver certaines connexions dans cette structure. Ici, deux configurations possibles sont présentées.

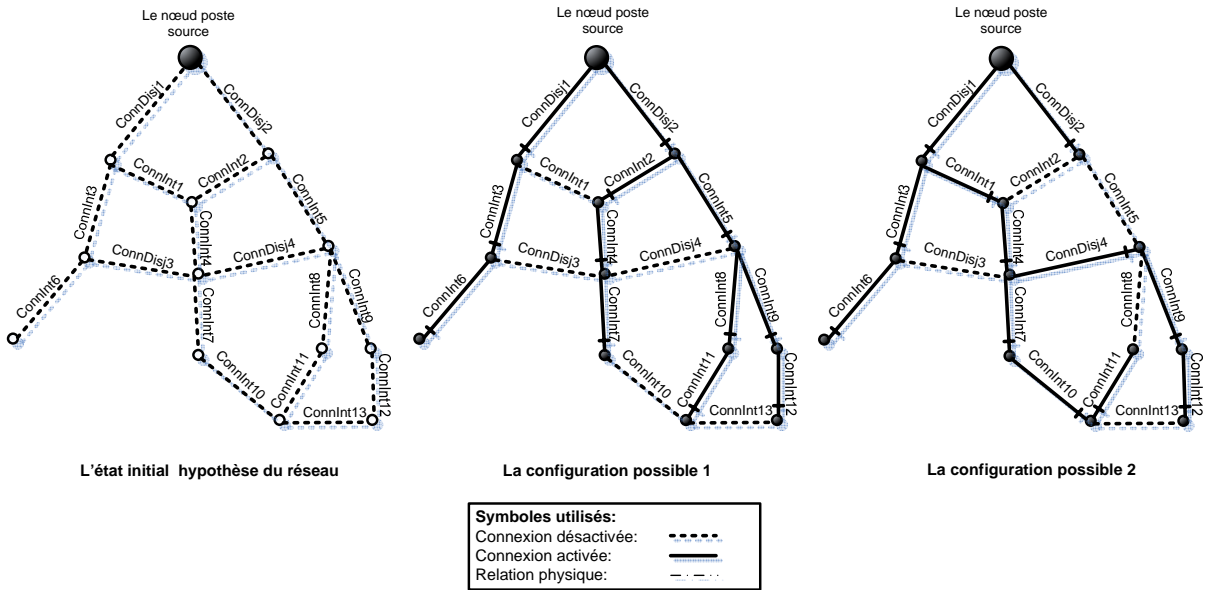


Figure 4.4 : exemple de la structure et deux configurations possibles du réseau

Le point de départ de la phase de construction du graphe repose sur la structure du réseau examiné et sur l'état hypothèse initial du graphe (cet état est l'origine du graphe construit).

Qu'est-ce que l'état hypothèse initial ? C'est un état du réseau dont :

- toutes les connexions sont désactivées,
- toutes les ressources sont fermées (interrupteurs et disjoncteurs),
- tous les nœuds (sauf les nœuds poste source) sont séparés.

Nous considérons qu'un sommet x_i dans un graphe représente l'état où la tension est présente dans les nœuds et la configuration du réseau à l'instant i (on appelle « l'état de la configuration d'un réseau e_i »). Ici, nous ne prenons pas encore en compte les valeurs électriques du réseau, elles seront examinées dans l'étape 2.

Dans chaque x_i , il existe une variable supplémentaire portant le nom « objectif » qui est utilisée pour marquer le sommet correspondant en tant que sommet objectif (1) ou sommet normal (0).

$$x_i = e_i \cup \text{objectif}$$

$$e_i = e_i^R \cup e_i^C \cup e_i^N$$

- e_i^R : contient les variables d'état mécanique des ressources et leurs valeurs (fermé ou ouvert) d'un réseau au moment i (voir la définition des variables dans l'ensemble V_{EMd} au Chapitre 3, section 3.2.4).

- e_i^C : contient les variables d'état électrique des connexions et leurs valeurs (activée dans la direction positive/négative ou désactivée) d'un réseau au moment i (voir la définition des variables dans l'ensemble V_{EEs} au Chapitre 3, section 3.2.4).
- e_i^N : contient les variables d'état d'existence de la tension sur les nœuds et leurs valeurs (nœud source ou nœud séparé) d'un réseau au moment i (voir la définition des variables dans l'ensemble V_{EEs} au Chapitre 3, section 3.2.4).

Un sommet est décrit par :

$$\text{Sommet} = \{e_i, \text{objectif}\}.$$

Par exemple, avec le réseau de la Figure 4.5, le sommet x_1 (qui représente l'état initial du réseau) est composé de :

- l'état mécanique des ressources e_1^R : Disj1, Disj2, Int1 sont ouverts,
- l'état électrique des connexions e_1^C : ConnDisj1, ConnDisj2 et ConnInt1 sont inactives,
- l'état électrique des nœuds e_1^N : N_2 et N_3 sont des nœuds séparés ; N_1 et N_4 sont des nœuds poste source,
- le type de l'état : x_1 n'est pas l'état objectif.

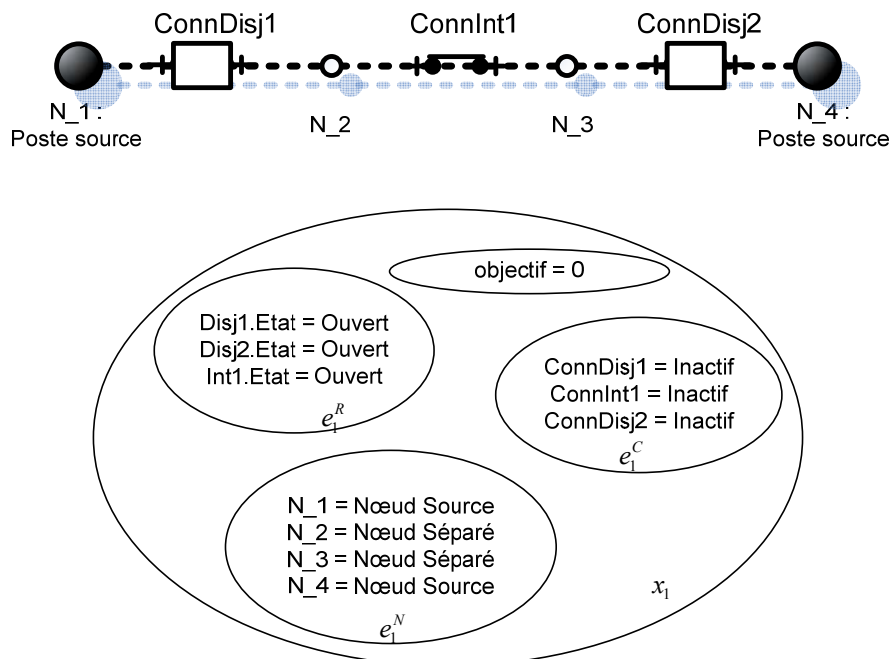


Figure 4.5 : exemple des états d'un sommet du graphe

Un arc du graphe représente une opération op_j (cf. Chapitre 3) dont l'exécution amène un changement du réseau d'un état (sommet de départ x_D) à un autre état (sommet d'arrivée x_A) :

$$a_j = (x_D, x_A, op_j)$$

Le poids des arcs sera, dans notre recherche, la durée d'exécution des opérations du réseau. Le graphe obtenu est un graphe orienté dont le poids des arcs est positif.

Le sommet x_D satisfait les conditions et les contraintes de l'opération op_j pour qu'elle puisse se produire.

Par exemple, dans la *Figure 4.6*, nous présentons deux arcs :

$$a_1 = (x_1, x_2, FDisj1) \text{ et}$$

$$a_2 = (x_2, x_3, ActConnDisj1)$$

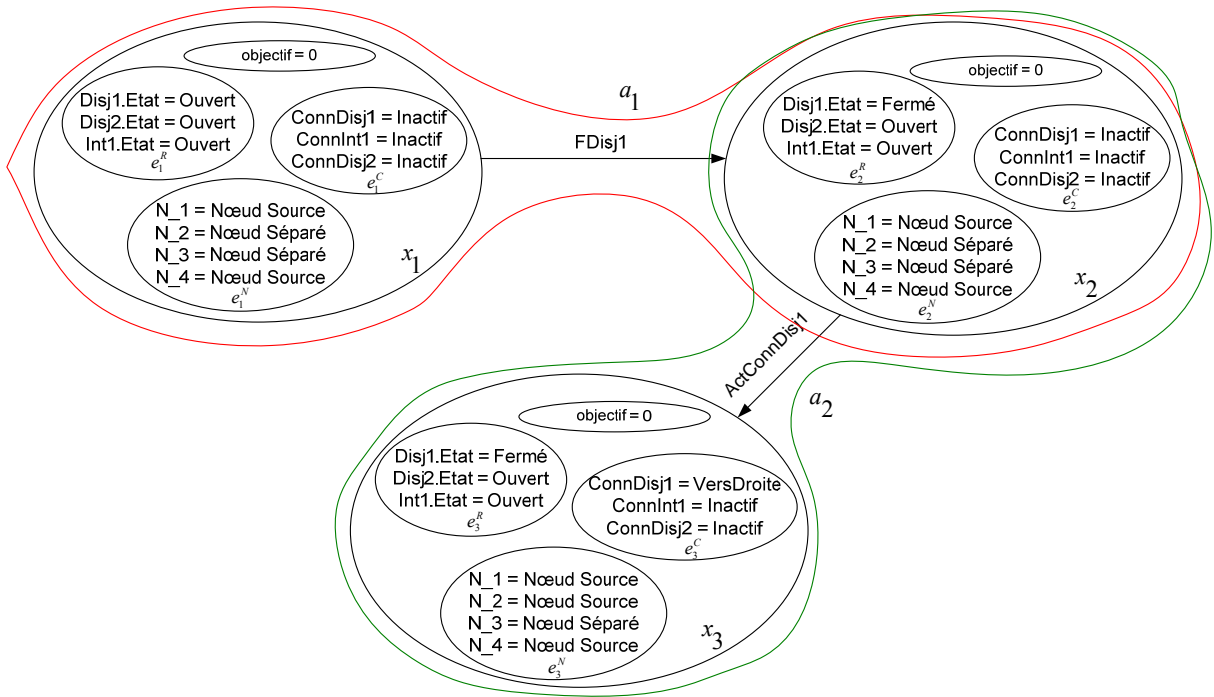


Figure 4.6 : exemple d'un arc du graphe

Un graphe G est formé de deux ensembles : un ensemble $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ dont les éléments sont des sommets possibles du réseau, et un ensemble $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, dont les éléments sont des arcs exécutables du réseau :

$$G = (X.A)$$

4.4.1.2 Construction d'un graphe en utilisant la technique classique

Pour construire un graphe, nous nous sommes appuyés sur la technique classique « parcours en largeur d'un graphe » [CHA-2006]. Un graphe est construit par les niveaux des sommets atteignables (cf. Figure 4.7) et des arcs exécutable créés entre deux niveaux du graphe.

Nous appelons « niveau d'un graphe » est l'ensemble de sommets atteignables à une même largeur qui peuvent être trouvés par des recherches et des créations d'arcs exécutable. Le premier niveau du graphe contient seulement un sommet hypothèse initial.

Par exemple, si nous considérons le réseau de la Figure 4.5, le premier niveau (niveau 0) du graphe est présenté ainsi :

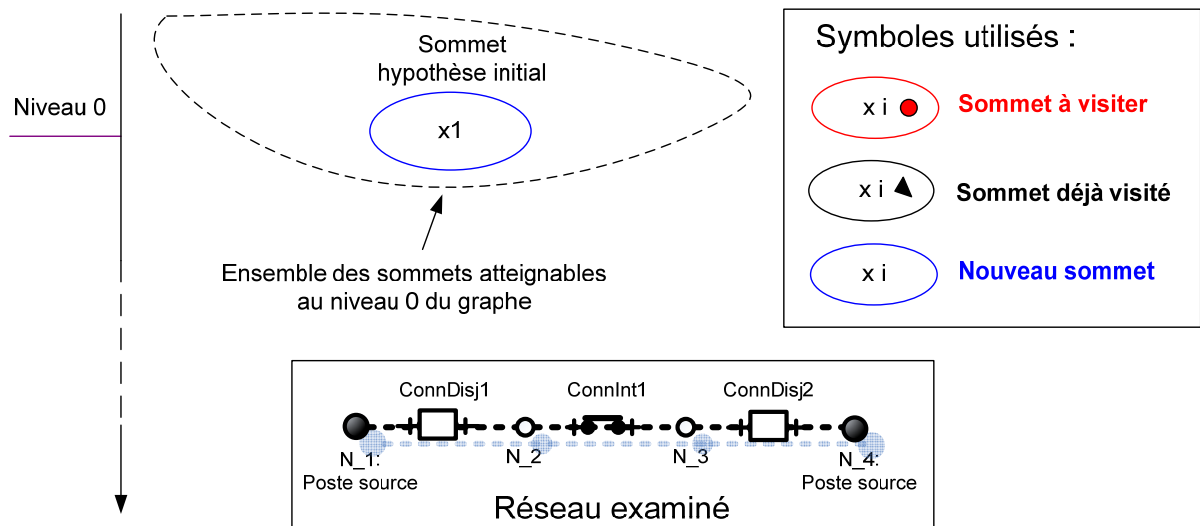


Figure 4.7 : premier niveau du graphe et son espace des sommets atteignables

Le principe de la recherche et de la création des arcs à partir des sommets au niveau k du graphe est exposé comme suit :

- nous commençons à partir d'un sommet x_i de l'ensemble des sommets au niveau k (appelé le sommet à examiner ou le sommet à visiter), nous cherchons des opérations d'activation des connexions qui peuvent être exécutées. Notons que dans ce processus, une opération est appelée « exécutable » si ses conditions et ses contraintes électriques sont satisfaites. Les conditions et les contraintes mécaniques de la ressource de la connexion correspondant à cette opération ne sont pas examinées. Elles seront ajoutées lors de la troisième étape,

- chaque opération exécutable trouvée est « virtuellement » exécutée (ceci revient à activer une connexion) et l'état du réseau est mis à jour : création du sommet d'arrivée et de l'arc correspondant. Si le sommet d'arrivée est un nouveau sommet, il est ajouté à l'ensemble des sommets au niveau $k + 1$,
- après chaque visite d'un sommet, ce dernier est marqué comme un sommet déjà visité. La recherche et la création des opérations exécutables vont passer au sommet x_{i+1} du niveau k ,
- si tous les sommets du niveau k ont été visités, la première étape de recherche et de création des arcs à partir des sommets du niveau k est terminée. Nous allons passer au niveau $k + 1$ des nouveaux sommets qui viennent d'être créés.

Dans la *Figure 4.8*, nous présentons un exemple de recherche et d'exécution des opérations d'activation à partir d'un sommet du niveau 0, le sommet x_1 . Nous cherchons des opérations d'activation qui peuvent être exécutées à partir de ce sommet là. Le résultat de cette recherche permet de mettre en exergue deux opérations d'activation possibles : ActConnDisj1 (activer la ConnDisj1) et ActConnDisj2 (activer la ConnDisj2). Si nous exécutons (virtuellement) chacune d'elles, nous obtenons deux branches d'activation d'une connexion et nous pouvons trouver deux nouveaux sommets (x_2 et x_3) correspondant à deux possibilités d'activation d'une connexion. Nous pouvons créer deux arcs (a_1 et a_2) correspondant aux deux opérations trouvées ci-dessus :

$$a_1 = (x_1, x_2, ActConnDisj1)$$

$$a_2 = (x_1, x_3, ActConnDisj2)$$

Ces deux nouveaux sommets (x_2 et x_3) appartiennent à l'espace des sommets 1 du graphe.

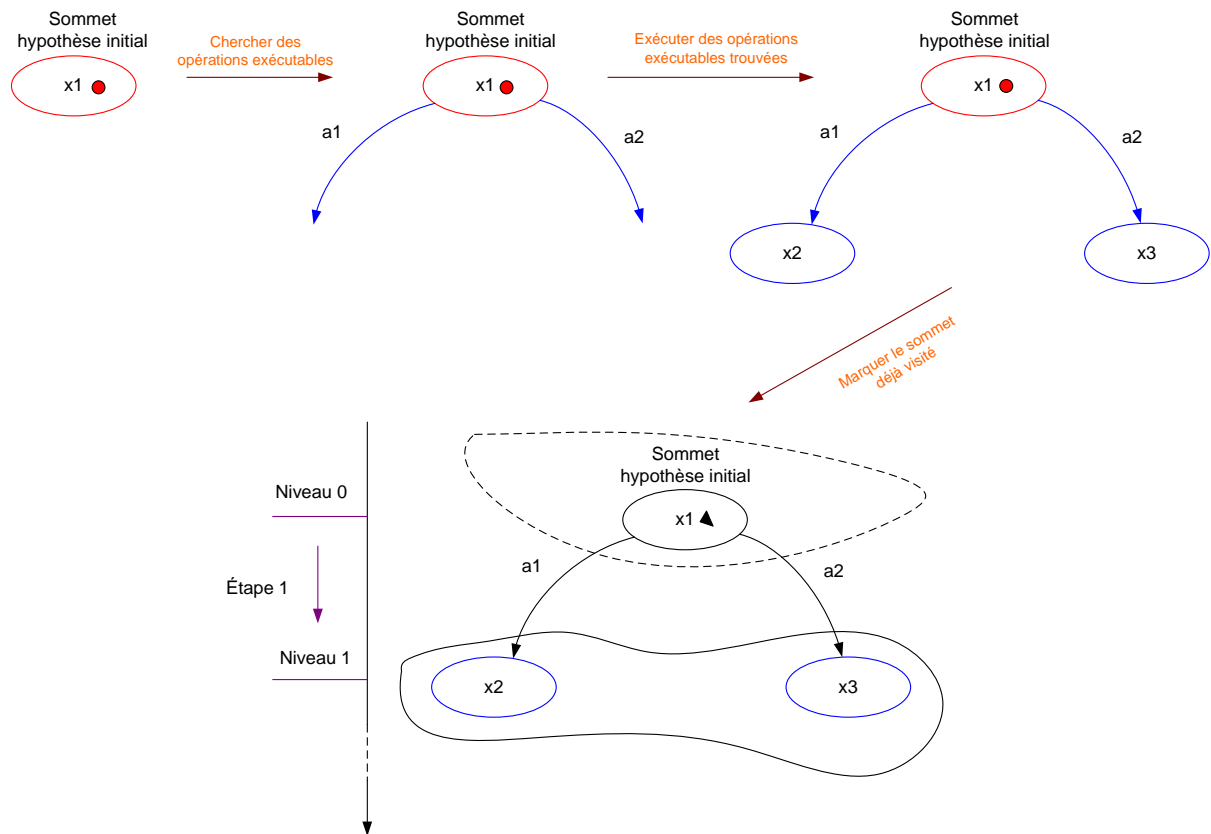


Figure 4.8 : recherche et exécution des opérations d'activation

Nous continuons ainsi à chercher et à exécuter virtuellement des opérations exécutables progressivement avec tous les nouveaux sommets de l'espace des sommets du niveau 1 dans l'exemple de la Figure 4.8. Nous visitons tout d'abord le x_2 (cf. Figure 4.9), les opérations exécutables trouvées sont : *ActConnInt1* (activer la *ConnInt1*) et *ActConnDisj2* (activer la *ConnDisj2*). Si nous exécutons ces deux opérations, nous allons trouver deux nouveaux sommets x_4 et x_5 . Deux arcs correspondant à ces deux opérations sont alors créés :

$$a_3 = (x_2, x_4, ActConnInt1)$$

$$a_4 = (x_2, x_5, ActConnDisj2)$$

Nous visitons ensuite le sommet x_3 (cf. Figure 4.8), les opérations exécutables trouvées sont : *ActConnDisj1* (activer la *ConnDisj1*) et *ActConnInt1* (activer la *ConnInt1*). Si nous exécutons ces deux opérations, nous allons trouver un nouveau sommet x_6 et un sommet déjà créé x_5 . Deux arcs a_5 et a_6 sont alors créés.

$$a_5 = (x_3, x_5, ActConnDisj1)$$

$$a_6 = (x_3, x_6, ActConnInt1)$$

Ces trois nouveaux sommets (x_4 , x_5 , x_6) appartiennent à l'espace des sommets de niveau 2 du graphe.

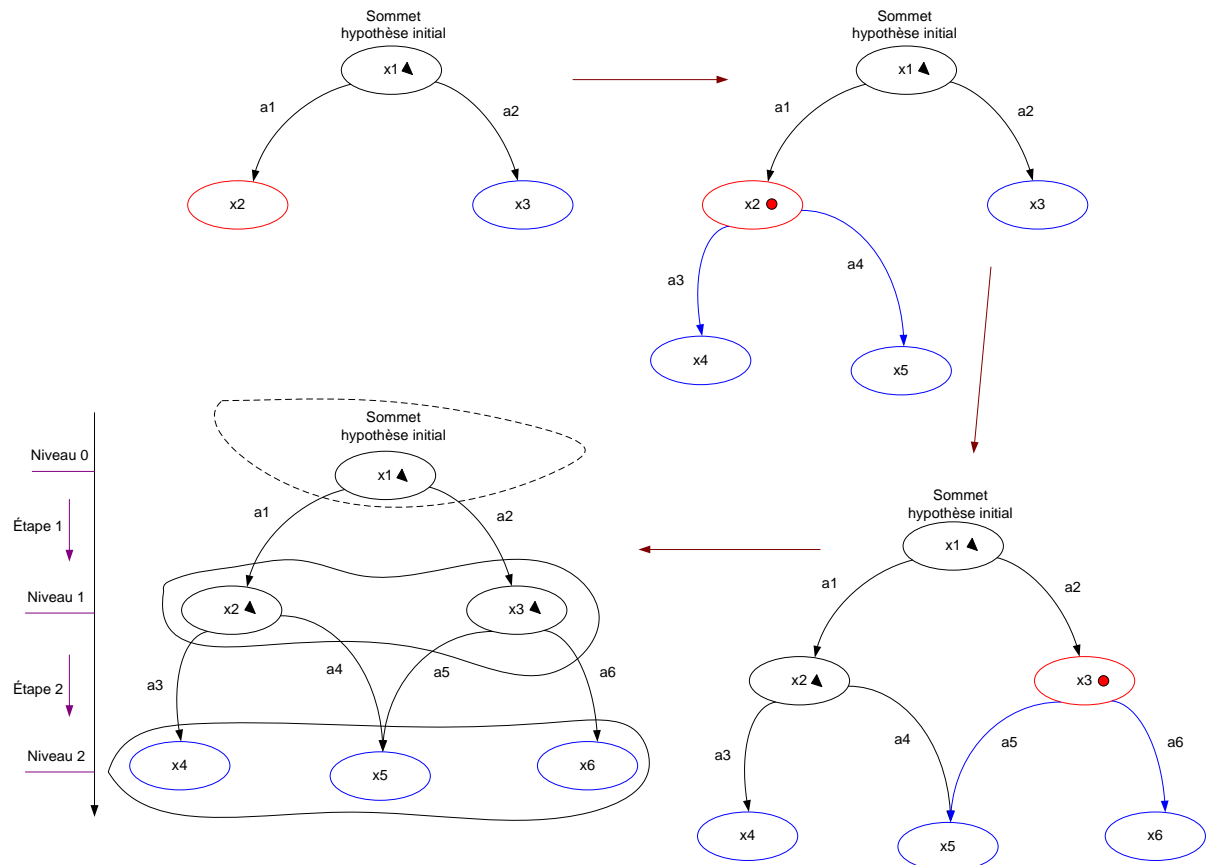


Figure 4.9 : suite de la construction du graphe présenté dans la Figure 4.8

Si à partir d'un sommet, nous ne trouvons aucune opération à exécuter, cela revient à conclure qu'il n'y a aucune opération dans l'ensemble des opérations d'activation dont les conditions et les contraintes électriques sont satisfaites ; ce sommet respecte donc la *FO* (physiquement, nous ne pouvons plus raccorder d'autres charges au réseau, dans ce cas, le maximum de clients possible réalimentés est atteint). Aussi, nous le marquons comme un sommet objectif en attribuant la valeur « 1 » à sa variable « objectif ».

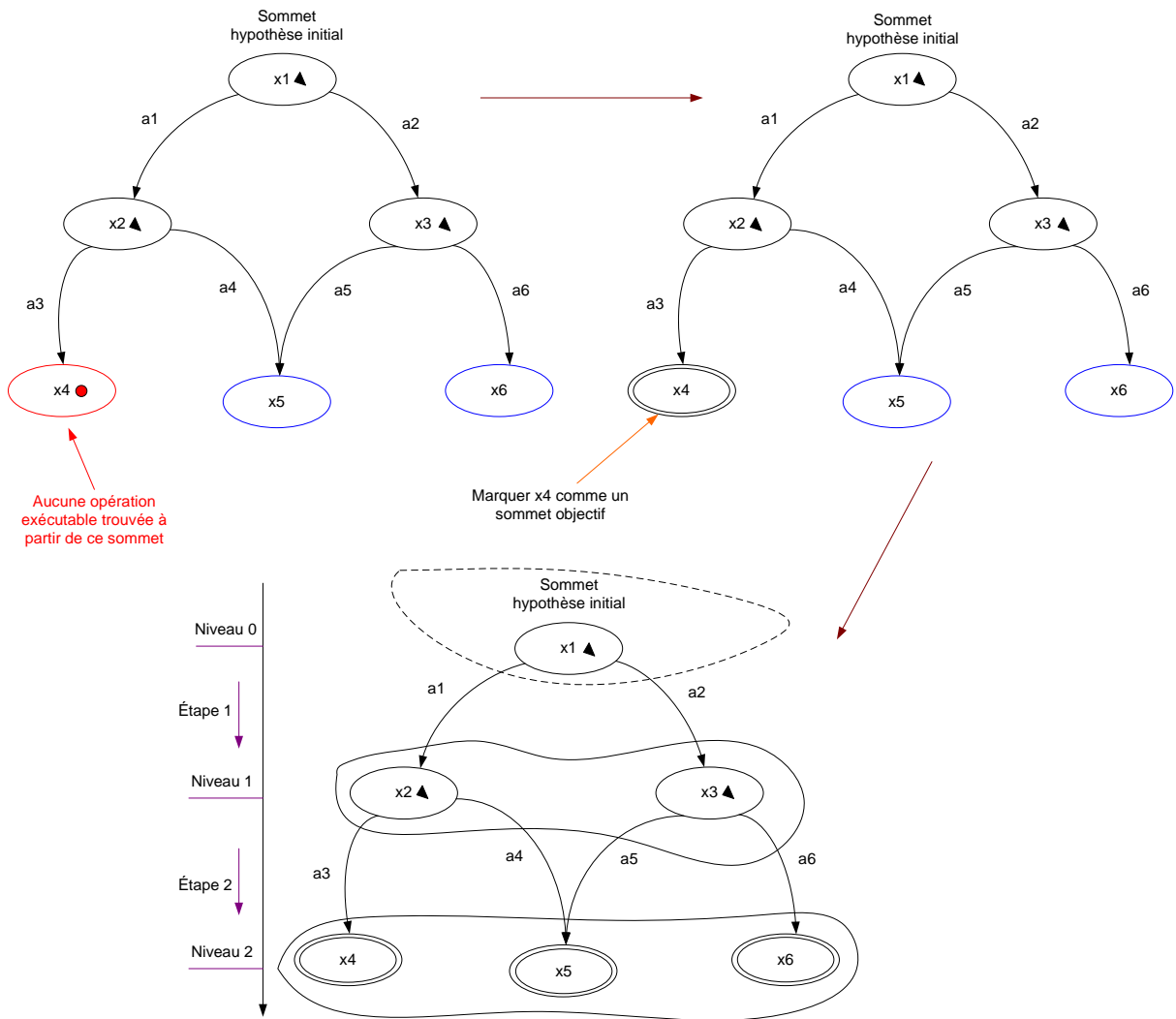


Figure 4.10 : sommets objectifs dans un graphe

Par exemple (cf. Figure 4.10), après l'étape 2 présentée dans la Figure 4.9, nous avons trouvé trois nouveaux sommets x_4 , x_5 et x_6 appartenant au niveau 2. Nous allons progressivement visiter ces trois sommets. Pour chacun, nous ne trouvons aucune opération exécutable, ces trois sommets x_4 , x_5 et x_6 sont alors marqués comme des sommets objectifs (sommets représentés par un double cercle).

Nous pouvons nous apercevoir qu'il existe plusieurs sommets objectifs dans ce graphe (x_4 , x_5 et x_6). Ces sommets objectifs ont les mêmes états caractéristiques électriques mais ils n'ont pas les mêmes connexions activées (cf. Figure 4.10). Ainsi, n'importe quel chemin qui part du sommet initial à un des sommets objectifs sera considéré comme un chemin possible.

Cet algorithme va s'arrêter s'il n'existe plus de nouveaux sommets à visiter. Considérons l'exemple de la Figure 4.10. Après cette étape, tous les nouveaux sommets ont été visités ; le processus de construction du graphe est terminé.

Dans ce graphe, chaque chemin qui part du sommet hypothèse initial à un des sommets objectifs constitue une configuration possible à exploiter cp_i .

$$cp_i = \{a_p, a_q, \dots, a_r\}$$

p, q, r : sont des indices des arcs

Dans un cp_i , chaque arc représente une connexion activée. Aussi, en se basant sur un cp_i et la structure du réseau après le défaut, nous pouvons déterminer quelles connexions du réseau sont activées et quelles connexions du réseau sont désactivées et ainsi, nous pouvons déterminer une configuration possible.

A partir de chaque configuration possible ci-dessus et avec les informations du réseau complet correspondant, nous pouvons déterminer la configuration du réseau complet qui va être utilisée pour calculer la répartition des charges (vérification du respect des contraintes sur les variables électriques). Le calcul de la RDC va être mentionné plus en détails dans l'étape 2 de l'algorithme.

4.4.1.3 Algorithme classique pour construire un graphe

L'algorithme est présenté par le diagramme dans la *Figure 4.11* : « parcours en largeur d'un graphe ».

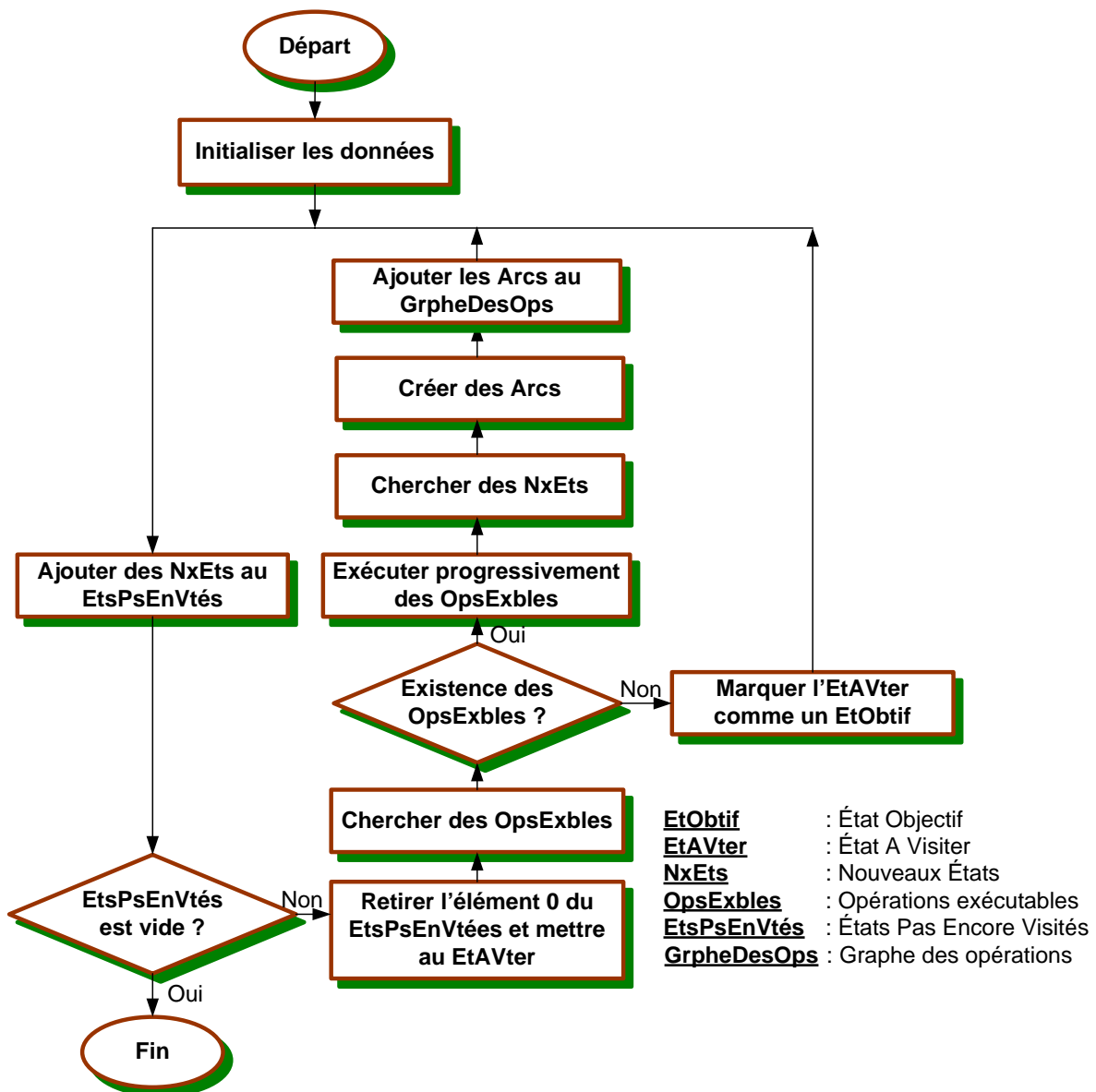


Figure 4.11 : algorithme classique de construction d'un graphe des opérations d'activation

Cet algorithme est structuré autour de plusieurs fonctions :

- « **Initialiser les données** » vide les différents listes utilisées : liste des opérations d'action **GrpheDesOps**, liste des états pas encore visités **EtsPsEnVtés**, liste des opérations exécutables **OpsEtables**, liste des nouveaux états **NxEts** et ajoute l'état initial au tableau **NxEts**,
- « **Ajouter des Nxets au EtsPsEnVtés** » ajoute tous les nouveaux états (les états qui ne sont pas encore visités) à la liste des états pas encore visités,
- « **Retirer l'élément 0 du EtsPsEnVtés et Mttre au EtAVter** » retire le premier élément de la liste **EtsPsEnVtés** et, ensuite, le rajoute à la variable **EtAVter**,

- « *Chercher des OpsExbles* » recherche toutes les opérations qui ont la capacité d’être exécutées à partir de l’état examiné (état courant décrit dans la variable **EtAVter**) et les positionne à la fin de la liste **OpsExbles**,
- « *Exécuter progressivement des OpsExbles* » retire et exécute virtuellement toutes les opérations exécutables de la liste **OpsExbles**,
- « *Chercher des NxEts* » recherche tous les nouveaux états qui viennent d’être créés par les opérations venant d’être exécutées,
- « *Créer des Arcs* » crée les arcs à partir des opérations exécutées, les sommets de départ et d’arrivée de ces opérations,
- « *Ajouter les Arcs au GrpheDesOps* » ajoute tous les arcs qui viennent d’être créés par « **Créer des Arcs** »,
- « *Marquer l’EtAVter comme un EtObtif* » marque l’état qui est indiqué par l’**EtAVter** comme un état objectif,
- « *EtsPsEnVtées est vide?* » teste si la liste **EtsPsEnVtées** est vide ou non,
- « *Exister des OpsExbles ?* » vérifie s’il existe des opérations exécutables dans la liste **OpsEtables**.

Les données d’entrée pour l’algorithme sont l’ensemble des opérations d’activation du réseau, le sommet hypothèse initial du réseau, la structure du réseau après le défaut et la fonction objectif. La sortie de l’algorithme est le graphe des opérations d’activation.

Appliquons cet algorithme sur le réseau exemple décrit à la *Figure 4.12*. Le graphe trouvé est présenté dans la même figure.

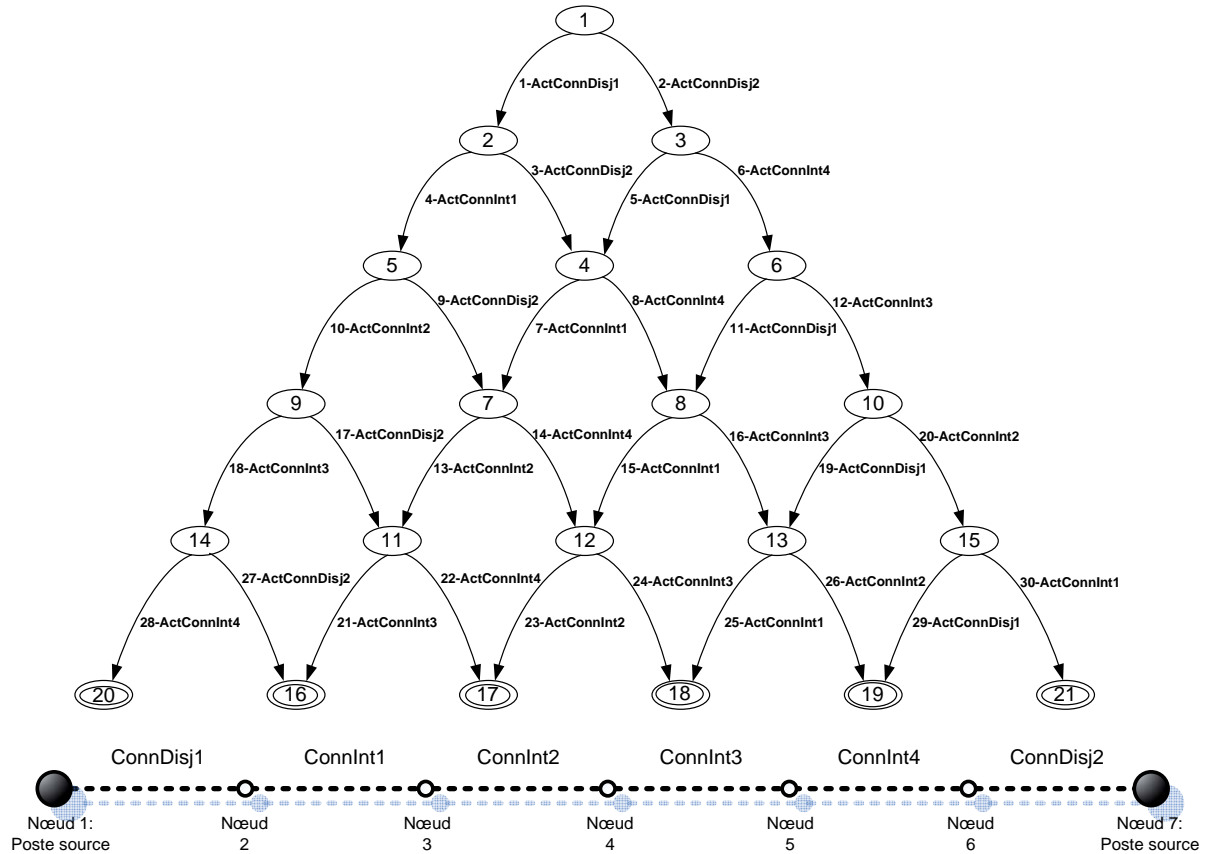


Figure 4.12 : graphe des opérations d'activation du réseau

L'algorithme que nous avons proposé permet de réduire le temps de construction du graphe puisqu'il s'appuie uniquement sur l'ensemble partiel des opérations d'activation dont le nombre est réduit d'au moins de 75 % par rapport à l'ensemble complet des opérations du réseau. Rappelons en effet, (cf. Chapitre 3, section 3.3.1).

4.4.1.4 Discussion et amélioration

Comme nous pouvons le constater, le graphe résultat en utilisant l'algorithme classique contient plusieurs chemins superflus. Qu'est-ce qu'un chemin superflu ? Nous allons le montrer sur la *Figure 4.13*.

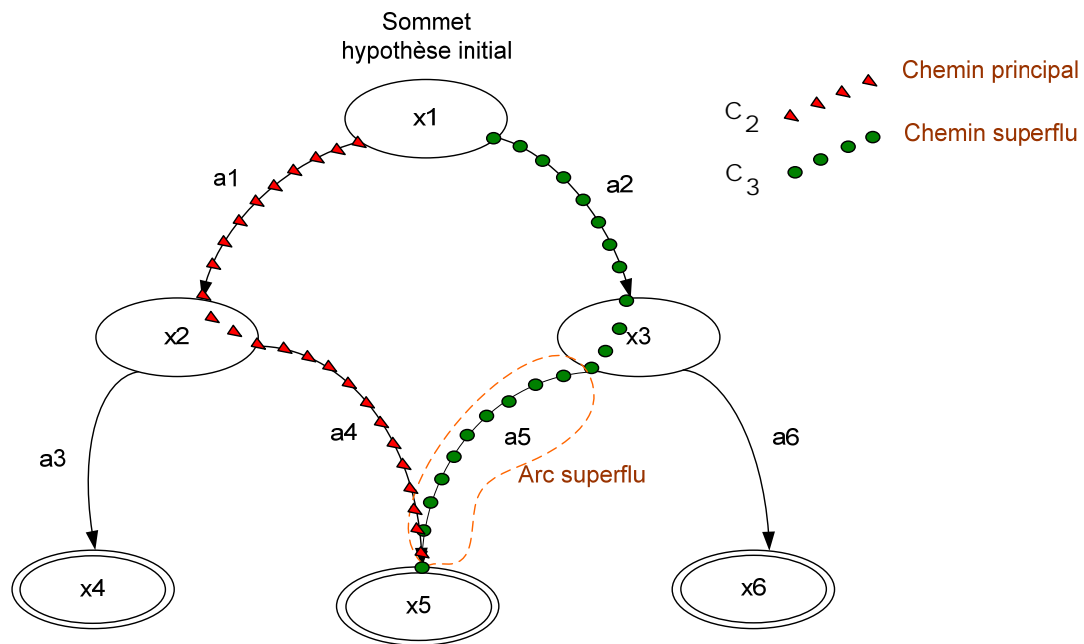


Figure 4.13 : arc superflu et chemin superflu

Quatre chemins peuvent être parcourus pour arriver à un des états objectifs à partir du sommet hypothèse initial :

$$cp_1 = \{a_1, a_3\}; cp_2 = \{a_1, a_4\}; cp_3 = \{a_2, a_5\}; cp_4 = \{a_2, a_6\}$$

Dans ces quatre chemins, deux chemins équivalents peuvent être mis en exergue : ce sont cp_2 et cp_3 :

$$cp_2 = \{a_1, a_4\} = \{(x_1, x_2, ActConnDisj1), (x_2, x_5, ActConnDisj2)\}$$

$$cp_3 = \{a_2, a_5\} = \{(x_1, x_3, ActConnDisj2), (x_3, x_5, ActConnDisj1)\}$$

Chemins équivalents : ils ont le même sommet initial, le même sommet final et les mêmes opérations portées sur les arcs constituant ces chemins. Ils diffèrent seulement dans l'ordre d'apparition des opérations des arcs dans les chemins. Physiquement, ils conduisent donc à une même configuration.

Ces chemins équivalents ne représentent qu'une configuration possible. Le traitement de tous les chemins équivalents ici n'est pas nécessaire (redondance des informations). Il conduit à ce que le temps de calcul de la répartition des charges de toutes les configurations possibles soit élevé (à cause de nombreux chemins possibles du réseau). Si nous choisissons un chemin (appelé « chemin principal »), nous pouvons alors éliminer les autres chemins (appelés « chemins superflus ») dans chaque ensemble de chemins équivalents afin de supprimer la redondance d'informations. Ainsi le temps de calcul de la répartition des charges pour tous les chemins possibles sera réduit.

Aussi proposons-nous de supprimer des chemins superflus et de garder seulement des chemins principaux.

Dans l'exemple de la *Figure 4.13*, nous pouvons nous apercevoir que cp_2 et cp_3 contiennent les mêmes opérations (*ActConnDisj1* et *ActConnDisj2*) mais l'ordre d'apparition de ces opérations est différent. Ces deux chemins produisent la même configuration (*ConnDisj1* et *ConnDisj2* sont actives, *ConnInt1* est inactive). Donc, le problème supplémentaire est que nous allons chercher la façon pour éliminer un des deux chemins. Le chemin éliminé est appelé « **chemin superflu** ».

Avant de présenter la technique d'élimination des chemins superflus, nous introduisons ici deux nouvelles définitions :

Arc superflu : c'est un arc qui part d'un sommet vers un autre sommet déjà visité avant que l'opération soit virtuellement exécutée (cf. *Figure 4.13*).

Chemin superflu : chemin qui contient au moins un arc superflu.

Dans la *Figure 4.13*, nous nous apercevons que a_4 et a_5 arrivent au même sommet x_5 mais l'opération de l'arc a_4 est exécutée avant celle de l'opération de l'arc a_5 . Avant l'exécution de l'opération de l'arc a_4 , le sommet x_5 n'existe pas encore (x_5 est créé par l'exécution de l'opération de l'arc a_4). Aussi, l'arc a_4 n'est pas éliminé. Il est créé et ajouté au graphe. En revanche, avant l'exécution de l'opération de l'arc a_5 , le sommet x_5 existe déjà. Donc, cet arc n'est pas créé et n'est pas ajouté au graphe. Nous avons ainsi éliminé un arc superflu.

Si nous supprimons tous les arcs superflus d'un graphe, naturellement, nous supprimons aussi les chemins superflus. Le graphe des opérations d'activation des connexions va être alors simplifié.

Le fait de supprimer des arcs superflus n'altère en rien des résultats obtenus par la méthode parce que les sommets ne sont en effet pas modifiés ou supprimés. Il n'y a donc pas de perte d'informations sur les configurations possibles par rapport au graphe complet.

4.4.1.5 Algorithme final

Le nouvel algorithme de construction d'un graphe des opérations d'activation est présenté dans la *Figure 4.14*. Dans ce nouvel algorithme, le principe de base est toujours le même. Il diffère seulement sur la création d'un arc de façon à ce que l'on évite de créer des arcs superflus. Pour ce faire, à partir des opérations exécutables d'un sommet examiné, nous

prenons les unes après les autres les opérations et les exécutons virtuellement. Pour chacune d'elles, nous cherchons le sommet d'arrivée correspondant et l'examinons afin de savoir si ce sommet existe déjà ou s'il s'agit d'un nouveau sommet. Si ce sommet existe, nous ne créons pas l'arc correspondant et nous ne l'ajoutons pas au graphe. Si ce sommet est nouveau, nous créons l'arc correspondant et nous l'ajoutons au graphe.

Dans le nouvel algorithme, il existe ainsi quelques nouveaux champs :

- « *Existence des OpsExbles ?* » examine la liste des opérations exécutables *OpsExbles* afin de savoir s'il y existe ou non des opérations exécutables,
- « *Retirer l'élément 0 de l'OpsExbles et le mettre dans OpAExter* » retire la première opération dans la liste *OpsExbles* et place cette opération dans la variable *OpAExter*,
- « *Exécuter OpExter* » exécute l'opération qui est contenue dans la variable *OpExter*.

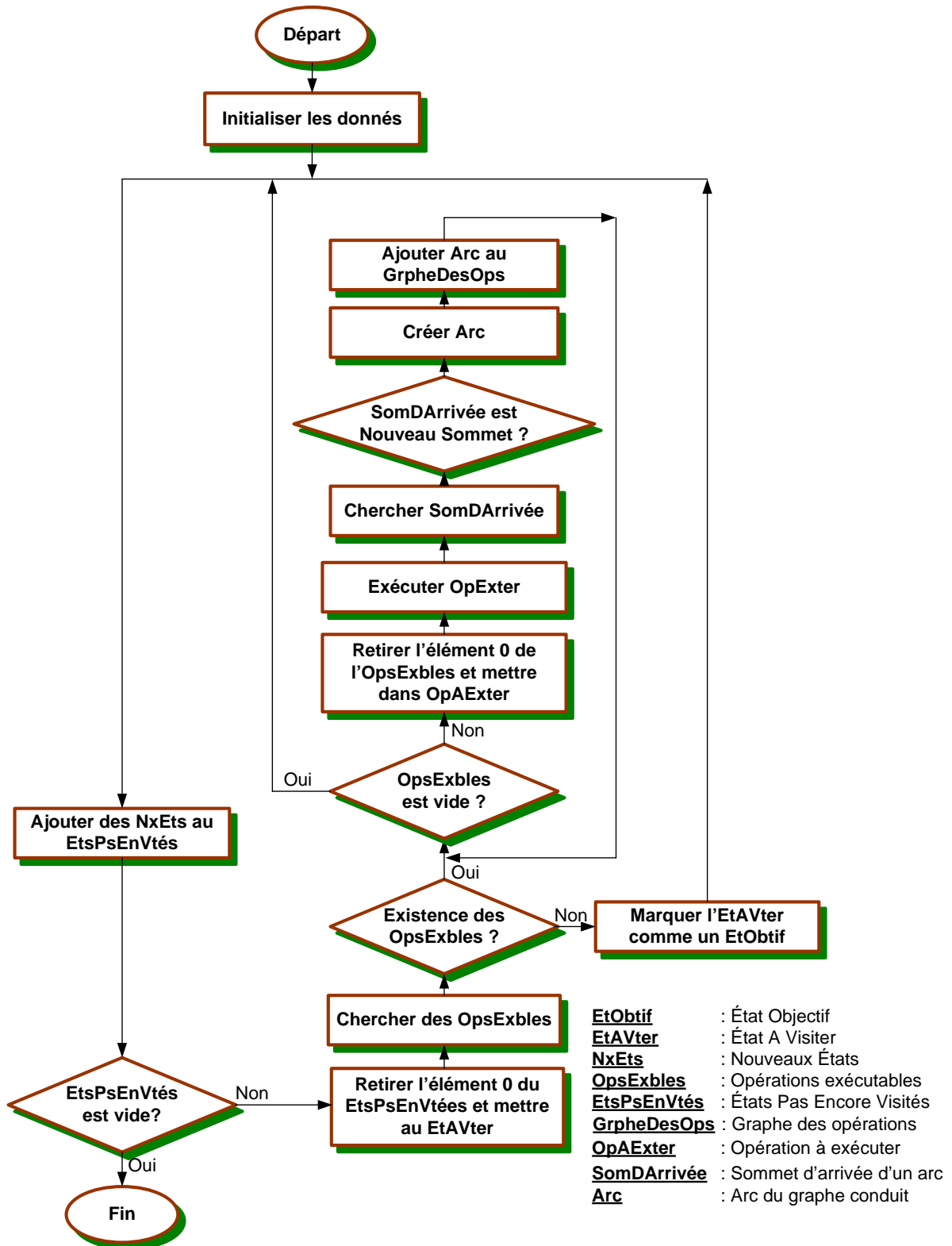


Figure 4.14 : algorithme final de construction d'un graphe des opérations d'activation

La Figure 4.15 présente le graphe obtenu en appliquant l'algorithme final mentionné ci-dessus.

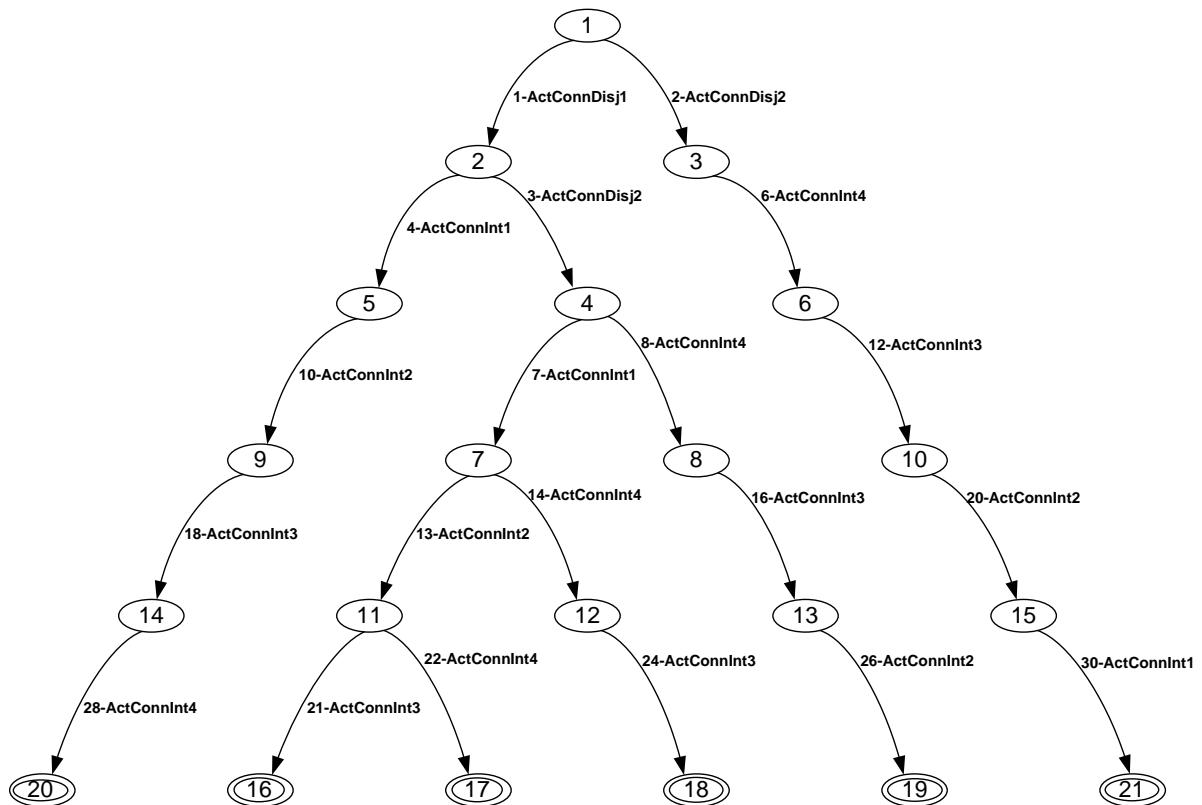


Figure 4.15 : graphe résultant en appliquant l'algorithme final

4.4.2 Recherche des configurations possibles

Les configurations possibles pour exploiter le réseau électrique E_{CP} (cf. section 4.4.2) sont les chemins possibles du graphe construit dans la partie précédente.

Nous rappelons qu'une configuration possible est :

$$cp_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

a_i : un des arcs de la cp_i

Au sein de cette section, nous nous proposons de chercher tous les chemins possibles (chercher les chemins qui partent du sommet initial à un des sommets objectifs).

Deux catégories d'algorithmes sont proposées dans la littérature : la recherche du plus court chemin entre une origine unique et tous les autres sommets du graphe (algorithme de Bellman-Ford [PAU-2005], ou de Dijkstra [DIJ-1959]), et la recherche du plus court chemin pour tout couple de sommets du graphe (algorithme général ou algorithme de Floyd-Wharshall [SAN-2004]). La recherche du plus court chemin qui nous intéresse est celle entre un sommet unique correspondant à l'état initial et un sommet de l'ensemble des sommets représentant les états finaux (les états objectifs). Le fait que le poids des arcs du graphe

représentant les évolutions du réseau électrique est positif ne permet pas de choisir entre l'algorithme de Dijkstra ou celui de Bellman-Ford. Cependant, la complexité de chacun (Dijkstra, Bellman-Ford) est en revanche un élément de choix important, notamment dans le cadre d'une reconfiguration suite à l'occurrence d'un défaut. Notre choix s'oriente donc naturellement vers l'algorithme de Dijkstra [HEN-2005].

Dans notre cas d'étude, la durée des opérations d'activation (le poids des arcs) est identique pour toutes les opérations (pour les opérations induites, la durée d'exécution est fixée à 0.001s). Ainsi la recherche du chemin le plus court revient à chercher le chemin ayant le plus petit nombre d'opérations.

Du fait de la structure du réseau électrique (alimentation par plusieurs chemins) et du principe de création du graphe des opérations, il peut exister plusieurs chemins ayant le même nombre d'opérations et menant de l'état initial à un des états objectifs. C'est pourquoi, en utilisant cet algorithme, nous pouvons construire le E_{CP} . La Figure 4.16 introduit ce travail.

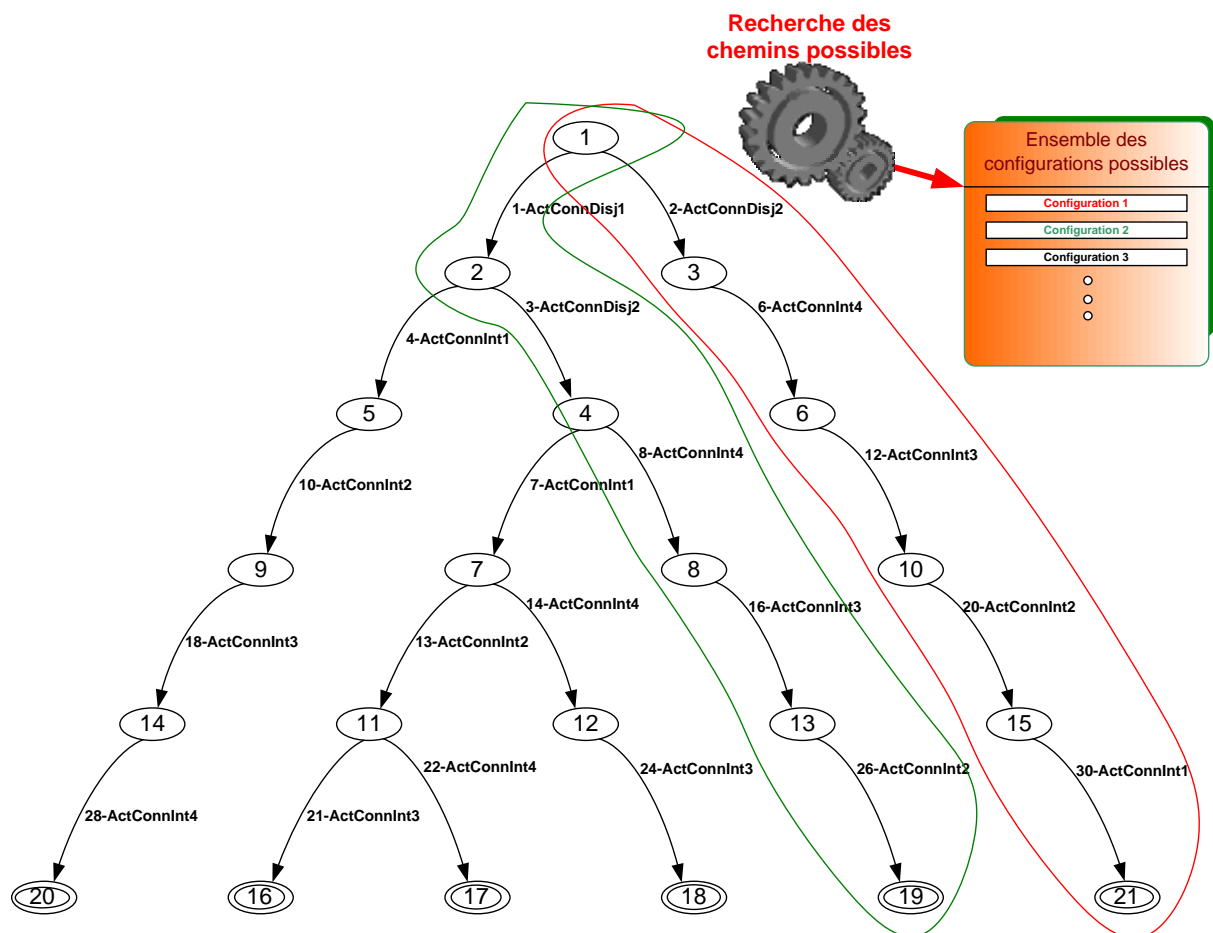


Figure 4.16 : recherche du chemin le plus court parmi les chemins possibles

4.5 Etape de recherche des configurations exploitables (étape 2)

Après l'étape 1, nous avons déterminé l'ensemble des configurations possibles E_{CP} du réseau réduit (appelé « configurations réduites possibles ») et à partir de ces configurations, nous pouvons déterminer les configurations possibles du réseau complet E_{2CP} (appelé « configurations complètes possibles »).

$$E_{2CP} = \{ccp_1, ccp_2, \dots, ccp_n\}$$

ccp_i : configuration complète possible i

Cependant, comme nous l'avons mentionné, les contraintes électriques qui garantissent que le réseau complet puisse fonctionner en toute sécurité n'ont pas encore été considérées. Et nous ne pouvons pas également utiliser les configurations réduites possibles afin d'examiner le fonctionnement en sécurité d'un réseau complet. Aussi, dans cette étape, toutes les configurations complètes possibles (les ccp_i) vont être évaluées par un calcul de la **RDC** pour trouver et conserver les configurations qui ne présente pas de surcharges sur les lignes et qui garantissent le respect du plan de tension.

Le choix du calcul de la **RDC** à la fin de l'étape 1 est un élément qui nous aide à réduire le temps de calcul par rapport à effectuer systématiquement le calcul à chaque fois qu'une connexion est ajoutée au graphe.

Le temps de calcul de la **RDC** pour toutes les configurations complètes dans le E_{2CP} , comme nous l'avons mentionné, est évalué par la formule :

$$T_{Séc} = M \times t_{rc}$$

M : nombre des configurations

t_{RDC} : temps de calcul de la RDC d'une configuration

Pour réduire $T_{Séc}$, il faut réduire M et t_{RDC} . M a été réduit dans l'étape 1 en appliquant le nouvel algorithme de construction du graphe. Dans cette étape, nous cherchons une voie pour réduire le t_{RDC} en choisissant une méthode de calcul plus rapide.

Le calcul de la **RDC** est un algorithme de calcul qui détermine la puissance active (MW) et la puissance réactive ($MVAR$) en tout nœud du réseau et dans les lignes après un processus itératif. Il détermine aussi la tension (amplitude et phase) en chaque nœud du réseau. Il existe plusieurs méthodes, par exemple :

- la méthode « backward – forward » [BOU-2000],
- la méthode « Gauss Seidel » (cf. chapitre V du [POW-2004]),

- la méthode « Newton - Raphson » (cf. chapitre IV du [JOE-1999]).

Chacune présente des avantages et des inconvénients qui varient suivant la taille et la complexité du problème. Pour notre recherche, le choix de la méthode doit garantir d'une part que le temps de calcul soit court (la vitesse de convergence de la méthode doit être rapide), et d'autre part permettre le traitement de réseaux de taille réaliste (plusieurs postes sources et plusieurs nœuds). La méthode de Newton – Raphson (*NR*) peut répondre aux problèmes proposés [ENR-2001]. Elle est donc choisie.

Dans ce calcul, nous pouvons remarquer que l'état électrique d'un nœud est caractérisé par quatre variables, à savoir la tension en amplitude et phase (U_i, θ_i) les puissances active et réactive (P_i, Q_i). Pour chaque nœud du réseau, deux des variables seront donc inconnues et seront données, le calcul s'effectuant sur les deux autres. En fonction du choix qui sera fait, nous pouvons classer les nœuds de la façon suivante (cf. *Tableau 4.1*).

Tableau 4.1 : types de nœuds utilisés dans le calcul de répartition des charges

Type	Variable connue	Variable inconnue
1. Nœud slack SL	E, θ	P_g, Q_g
2. Nœud PV	P_g, E	Q_g, θ
3. Nœud PQ	P_g, Q_g, P_d, Q_d	E, θ

Noeuds charges (nœud PQ) : les puissances active et réactive seront données, nous calculerons donc la tension en amplitude et en phase.

Noeuds générateurs (nœud PV) : la puissance active et le module de la tension seront donnés, simulant ainsi le fonctionnement d'un générateur sous réglage de tension [RIC-2006]. Il faudra donc déterminer la phase de la tension et la puissance réactive injectée au nœud. Il faudra cependant un nœud supplémentaire : en effet les pertes du réseau vont dépendre de la circulation des puissances, inconnues a priori ; il sera donc nécessaire qu'un nœud générateur puisse fournir ces pertes actives et réactives. En général, ce nœud servira de référence des phases pour l'ensemble du réseau et le module de sa tension sera également donné. Il portera le nom de **nœud bilan** (*slack node, swing bus* ou *floating bus*).

Nœud à tension contrôlée (nœud PV) : d'autres combinaisons sont possibles. Il existe parfois des **nœuds à tension contrôlée** par des transformateurs à rapport variable ; dans ce cas,

les grandeurs à déterminer seront la phase de la tension et la puissance réactive, pour un module donné de la tension et des conditions de puissance connues (et généralement nulles).

Rappelons encore que l'usage des grandeurs nodales impose un signe positif pour les puissances actives des générateurs, et négatif pour les charges ; une charge à caractère inductif sera également négative, en revanche celle d'un système de compensation capacitif sera positive.

Le problème se ramène donc à la résolution d'un système de $2N$ équations algébriques non-linéaires dans le cas d'un réseau à N nœuds.

4.5.1 Modèle mathématique et résolution de NR pour calculer la RDC

Afin de connaître l'état électrique du réseau, il faut connaître :

- la tension sur des nœuds (bus) : $\bar{E}_i = E_i \angle \theta_i ; i = 1 \div n$,
- la puissance injectée/consommée sur des nœuds (bus) : $\bar{S}_i = P_i + jQ_i ; i = 1 \div n$.

Le système des équations électriques d'un réseau peut être écrit de la manière suivante (cf. chapitre II de [PAN-1999]). Nous exprimons ici la puissance pour chaque nœud i :

$$\begin{aligned} P_i &= E_i \times \sum E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i &= E_i \times \sum E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ P_i &= P_g - P_d; \quad Q_i = Q_g - Q_d \end{aligned} \quad \text{Equation.1}$$

Ici, des variables P_i, Q_i, E_i, E_j ont déjà été définies. Les variables $g_{ij}, b_{ij}, \theta_{ij}$ vont être déterminées par les expressions :

$$g_{ij} = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b_{ij} = \frac{x}{r^2 + x^2}; \quad \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

r et x sont la résistance et la réactance de la ligne qui lie le **nœud-i** au **nœud-j**.

L'équation 1, équation de puissance injectée des bus, est non linéaire. Elle peut être établie sur la base d'une configuration possible (avec des paramètres des lignes et des nœuds de la configuration examinée) et des variables électriques.

Newton – Raphson est une méthode itérative, appliquée à un système d'équations non linéaires. Elle traite une tension corrigée pour tous les nœuds d'un réseau (cf. Figure 4.16) et la met à jour. La méthode est arrêtée si les corrections de tension sont plus petites qu'une valeur définie (nous pouvons choisir cette valeur : dans ce mémoire, cette valeur sera 0.01 soit une erreur de 1%, considérée comme acceptable). Un système d'équations linéaires sous la forme « $Ax = b$ » est évalué à chaque itération.

- **Dans le cas d'un nœud charge**

Si nous utilisons le développement en série Taylor pour traiter les équations non linéaires dans l'équation 1. Les écarts sont le vecteur $\Delta\theta$ et ΔE . Nous prenons seulement des parties linéaires de la dérivée. A partir des grandeurs de l'itération précédente, nous calculerons les écarts $\Delta\theta_i$ et ΔE_i qui annuleront ceux entre les valeurs de P_i et Q_i obtenues et celles données soit l'équation 2 :

$$\begin{bmatrix} P_i - P_i^{calcul} \\ Q_i - Q_i^{calcul} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta P_i}{\delta \theta_i} & \frac{\delta P_i}{\delta E_i} \\ \frac{\delta Q_i}{\delta \theta_i} & \frac{\delta Q_i}{\delta E_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta E_i \end{bmatrix} \quad \text{Equation.2}$$

P_i^{calcul} et Q_i^{calcul} : puissances actives et réactives sur le nœud i après chaque étape de calcul.

L'équation 2 peut être écrite sous la forme de la matrice Jacobien proposée dans l'équation 3 (cf. chapitre IV du [POW-2004]) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad \text{Equation.3}$$

Ici, les éléments de chaque sous – matrice H , J , N et L peuvent être déterminés via les expressions (du numéro 1 au numéro 10 de l'équation 4) suivantes :

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \frac{\delta}{\delta\theta_j} \cos(\theta_i - \theta_j) = -\sin(\theta_i - \theta_j)(-1) = \sin(\theta_{ij}), \\
 (2) \quad & \frac{\delta}{\delta\theta_j} \sin(\theta_i - \theta_j) = \cos(\theta_i - \theta_j)(-1) = -\cos(\theta_{ij}); \\
 (3) \quad & H_{ij} = \frac{\delta P_i}{\delta\theta_j} = E_i E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}), \\
 (4) \quad & H_{ii} = \frac{\delta P_i}{\delta\theta_i} = E_i \sum_{i \neq j}^n E_j (-g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) = \sum H_{ij}, i \neq j; \\
 (5) \quad & N_{ij} = \frac{\delta P_i}{\delta E_j} = E_i (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}), \\
 (6) \quad & N_{ii} = \frac{\delta P_i}{\delta E_i} = 2E_i g_{ii} + \sum_{i \neq j}^n E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}); \\
 (7) \quad & J_{ij} = \frac{\delta Q_i}{\delta\theta_j} = E_i E_j (-g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij}), \\
 (8) \quad & J_{ii} = \frac{\delta Q_i}{\delta\theta_i} = E_i \sum_{i \neq j}^n E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}); \\
 (9) \quad & L_{ij} = \frac{\delta Q_i}{\delta E_j} = E_i (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad \text{Equation.4} \\
 (10) \quad & L_{ii} = \frac{\delta Q_i}{\delta E_i} = -2E_i b_{ii} + \sum_{j \neq i}^n E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij});
 \end{aligned}$$

Il est possible de réduire le temps de calcul et de simplifier le code du programme : nous multiplions N et L avec E , et divisons ΔE avec E .

$$\begin{bmatrix} P_i - P_i^{calcul} \\ Q_i - Q_i^{calcul} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta P_i}{\delta\theta_i} & E \frac{\delta P_i}{\delta E_i} \\ \frac{\delta Q_i}{\delta\theta_i} & E \frac{\delta Q_i}{\delta E_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \frac{\Delta E_i}{E} \end{bmatrix} \quad \text{Equation.5}$$

Les expressions numérotées de 11 à 19 sont utilisées pour expliquer comment nous pouvons développer les sous – matrices $N'_{ij}, N'_{ii}, L'_{ij}, L'_{ii}$ des $N_{ij}, N_{ii}, L_{ij}, L_{ii}$ après une multiplication avec E (l'équation 5). Ces sous – matrices $N'_{ij}, N'_{ii}, L'_{ij}, L'_{ii}$ sont utilisées pour coder le programme de calcul **RDC** (équation 6).

$$(11) \quad N'_{ij} = E_j \frac{\delta P_i}{\delta E_j} = E_i E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}),$$

$$(12) \quad N'_{ii} = E_i \frac{\delta P_i}{\delta E_i} = E_i E_i g_{ii} + E_i E_i g_{ii} + E_i \sum_{j \neq i}^n E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij});$$

$$(13) \quad N'_{ii} = E_i E_i g_{ii} + E_i \sum_{j \neq i}^n E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad \text{comprendre } i = j;$$

$$(14) \quad N'_{ii} = E_i E_i g_{ii} + P_i^c \quad \text{ou}$$

$$(15) \quad N'_{ii} = 2E_i E_i g_{ij} + \sum_{j \neq i}^n N'_{ij}$$

$$(16) \quad L'_{ij} = E_j \frac{\delta Q_i}{\delta E_j} = E_i E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}),$$

$$(17) \quad L'_{ii} = E_i \frac{\delta Q_i}{\delta E_i} = -2E_i E_i b_{ii} + E_i \sum_{j \neq i}^n E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij});$$

$$(18) \quad L'_{ii} = Q_i^c - E_i E_i b_{ii} \quad \text{ou}$$

$$(19) \quad L'_{ii} = \sum_{j \neq i}^n L'_{ij} - 2E_i E_i b_{ij}$$

Equation.6

- **Dans le cas d'un nœud générateur**

On arrivera ainsi au système matriciel suivant:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \\ U \end{bmatrix} \quad \text{Equation.7}$$

Ici, ΔP et ΔQ représentent respectivement les écarts entre les puissances actives imposées et calculées à l'itération courante aux nœuds générateurs et consommateurs, et les écarts entre puissances réactives aux nœuds consommateurs. Les composantes du Jacobien sont :

$$\begin{aligned} [J_1] &= \left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \right]; & [J_2] &= \left[\frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j \right] \\ [J_3] &= \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \right]; & [J_4] &= \left[\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j \right] \end{aligned} \quad \text{Equation.8}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n.$$

On voit que la structure de ce Jacobien est liée à celle de la matrice d'admittances nodales, elle sera donc également très creuse [GEN-2007]. Sa dimension sera de 2 fois le nombre de nœuds charges plus le nombre de nœuds générateurs.

La méthode de résolution implique la résolution répétée d'un système linéaire d'équations. Il est évident qu'il faudra tenir compte de la structure particulière de la matrice signalée ci-dessus. En fait cette méthode n'a été efficacement utilisée qu'après le développement de ces techniques de traitement de matrices creuses.

Très souvent ces sous-matrices ne seront recalculées que pour les premières itérations et seront ensuite gardées constantes ; nous obtenons ainsi une résolution répétée d'un système linéaire avec seul le changement du second membre ; la factorisation du Jacobien sous la forme d'un produit de deux matrices triangulaires (L, U) permet cette approche.

Le traitement des nœuds initialement définis comme nœuds type PV (générateur) tenant compte de l'histoire du nœud se décompose en différentes étapes :

le pas 1 : si au cours de l'itération ($p - 1$) le nœud i de type PV a été considéré comme nœud type PQ (consommateur), nous déterminons le module de la tension $U_i^{(p)}$ comme suit :

- si ($U_i^{(p)} \geq U_i^{imp}$ et $Q_i^{imp} = Q_i^{max}$) ou si ($U_i^{(p)} \leq U_i^{imp}$ et $Q_i^{imp} = Q_i^{min}$), le nœud i redevient le nœud de type PU au cours de l'itération p , avec U_i^{imp} , et nous continuons avec le pas 6;
- si ($U_i^{(p)} > U_i^{imp}$ et $Q_i^{imp} = Q_i^{min}$) ou si ($U_i^{(p)} < U_i^{imp}$ et $Q_i^{imp} = Q_i^{max}$), le nœud i reste également le nœud type PQ au cours de l'itération p . Nous continuons avec le pas 6.

pas 2 : si la puissance $Q_i^{(p)}$ calculée pour le nœud i (PU) est dans les limites imposées, $Q_i^{min} \leq Q_i^{(p)} \leq Q_i^{max}$ le nœud i continue à être considéré comme le nœud type PU et nous passons au pas 6.

pas 3 : si la puissance $Q_i^{(p)} < Q_i^{min}$, nous imposons $Q_i^{imp} = Q_i^{min}$ et nous continuons avec le pas 5.

pas 4 : si la puissance $Q_i^{(p)} > Q_i^{max}$, alors nous imposons $Q_i^{imp} = Q_i^{max}$ et nous passons au pas 5.

pas 5 : au cours de l'itération p le nœud i est considéré comme le nœud type PQ .

pas 6 : nous passons alors au pas 1 pour le nœud générateur suivant.

Le flux de la puissance sur les lignes est déterminé par l'équation 9 :

$$\begin{aligned} P_{ij} &= g_{ij} E_i^2 - E_i E_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} &= - \left(\frac{y_{ij}^c}{2} + b_{ij} \right) E_i^2 - E_i E_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad \text{Equation.9}$$

Quand nous appliquons cette méthode pour calculer la **RDC** d'un réseau, il est possible que le processus de calcul ne soit pas convergent (C'est-à-dire qu'après plusieurs itérations de

calcul, les écarts entre les valeurs de P_i^{calcul} et Q_i^{calcul} obtenues et celles données P_i et Q_i sont supérieurs à l'erreur attendue). Dans notre cas, si la valeur d'itérations dépasse la limite (fixée ici à 20 itérations), le processus de calcul est appelé « non convergent ».

Les sorties de cet algorithme sont les valeurs de E_i et θ_i sur les nœuds et les valeurs de P_{ij} et Q_{ij} sur les lignes du réseau examiné.

4.5.2 Test d'une configuration complète possible correspondant à un chemin possible

Cette section présente un algorithme pour tester une configuration complète possible - ccp_i sur la base de la méthode de calcul de *NR* afin de savoir si la configuration examinée présente ou non des surcharges (*PSC* – pas de surcharge), si les chutes de tension sur les lignes ne dépassent pas la limite admissible ($\pm 5\%$) et si le calcul de la *RDC* pour cette configuration est convergent (*CONV*). Cet algorithme de calcul est décrit dans la *Figure 4.17*.

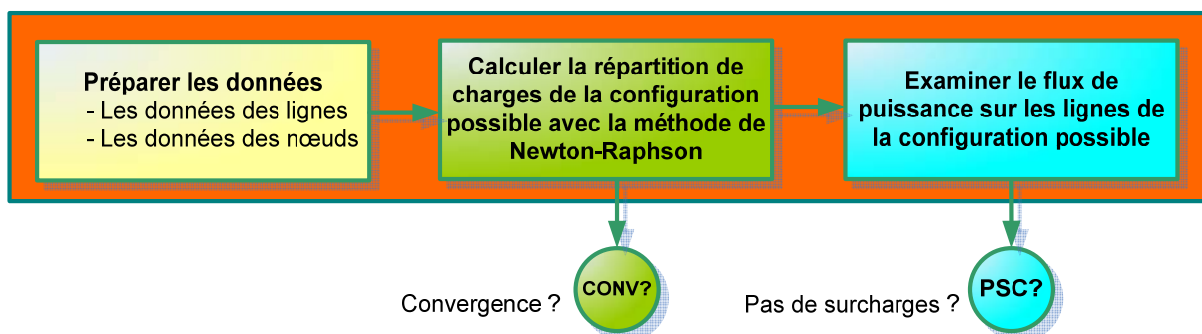


Figure 4.17 : module de test d'une configuration possible

4.5.2.1 Préparation des données pour calculer la RDC d'une ccp_i

Pour calculer la *RDC* d'une configuration complète, nous devons préparer et fournir des données d'entrée. Ces données comprennent les paramètres des nœuds P_i, Q_i , les paramètres des lignes de la ccp_i examinée ainsi que quelques procédures supplémentaires.

Le premier travail préparatoire de ces données réside dans l'obtention de tous les paramètres des nœuds et des lignes d'une configuration complète possible ccp_i en se focalisant sur le chemin possible cp_i correspondant (cf. Chapitre 3, section 3.3.1.2).

Nous savons que les lignes d'une ccp_i sont décomposées en deux groupes : les lignes dont les connexions contiennent des ressources (liste L_1) et les lignes dont les connexions ne

contiennent pas de ressources (liste L_2). Nous allons présenter la manière d'obtenir les paramètres des lignes de ces deux listes.

Dans un chemin cp_i , nous pouvons obtenir tous les paramètres des lignes dans la L_1 et tous les noms des nœuds groupés du réseau réduit.

Examinons la *Figure 4.18*, nous y trouvons un cp_i avec quatre opérations d'activation. Pour chaque opération d'activation (par exemple, l'opération ActConnDisj1), nous pouvons obtenir les paramètres de la ligne de la connexion correspondant à l'opération examinée (par exemple, la ConnDisj1) et le nom de deux nœuds groupés aux deux bornes de cette connexion. Si nous parcourons toutes les opérations d'activation dans ce chemin possible examiné, nous pouvons obtenir tous les paramètres des lignes contenant des ressources et tous les noms des nœuds groupés présents dans ce chemin.

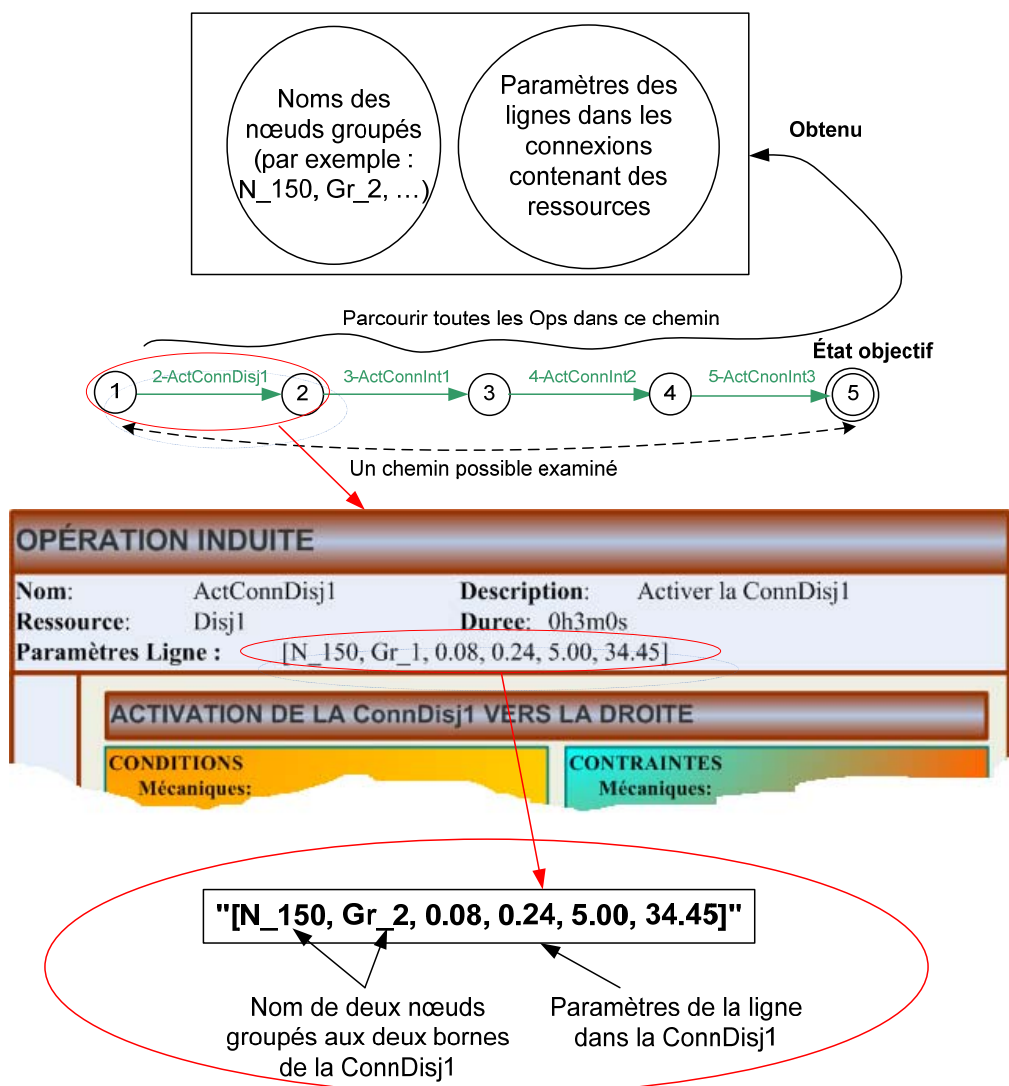


Figure 4.18 : obtention des données d'une ligne et des nœuds extrémités de la ligne

En se basant sur les noms des nœuds groupés obtenus et leurs modèles (modèles des nœuds groupés, cf. Chapitre 3, section 3.4.2), nous pouvons retirer les paramètres des lignes qui ne contiennent pas de ressources et les noms des nœuds détaillés de la ccp_i .

Les paramètres des nœuds dans la ccp_i peuvent être trouvés en se basant sur la liste des noms des nœuds détaillés obtenus et leurs modèles associés.

Le travail de préparation des données d'entrée pour le calcul de la **RDC** consiste ensuite à ajouter le nœud virtuel « **Slack** » (nœud bilan) et des lignes idéales qui lient le nœud virtuel avec chaque nœud poste source de la configuration examinée. Ceci permet de traiter des réseaux où existent plusieurs nœuds « **poste source** ».

Tous les nœuds « **poste source** » dans le réseau sont alors transformés de nœud « **Slack** » en nœud « **PQ** » (cf. Figure 4.19).

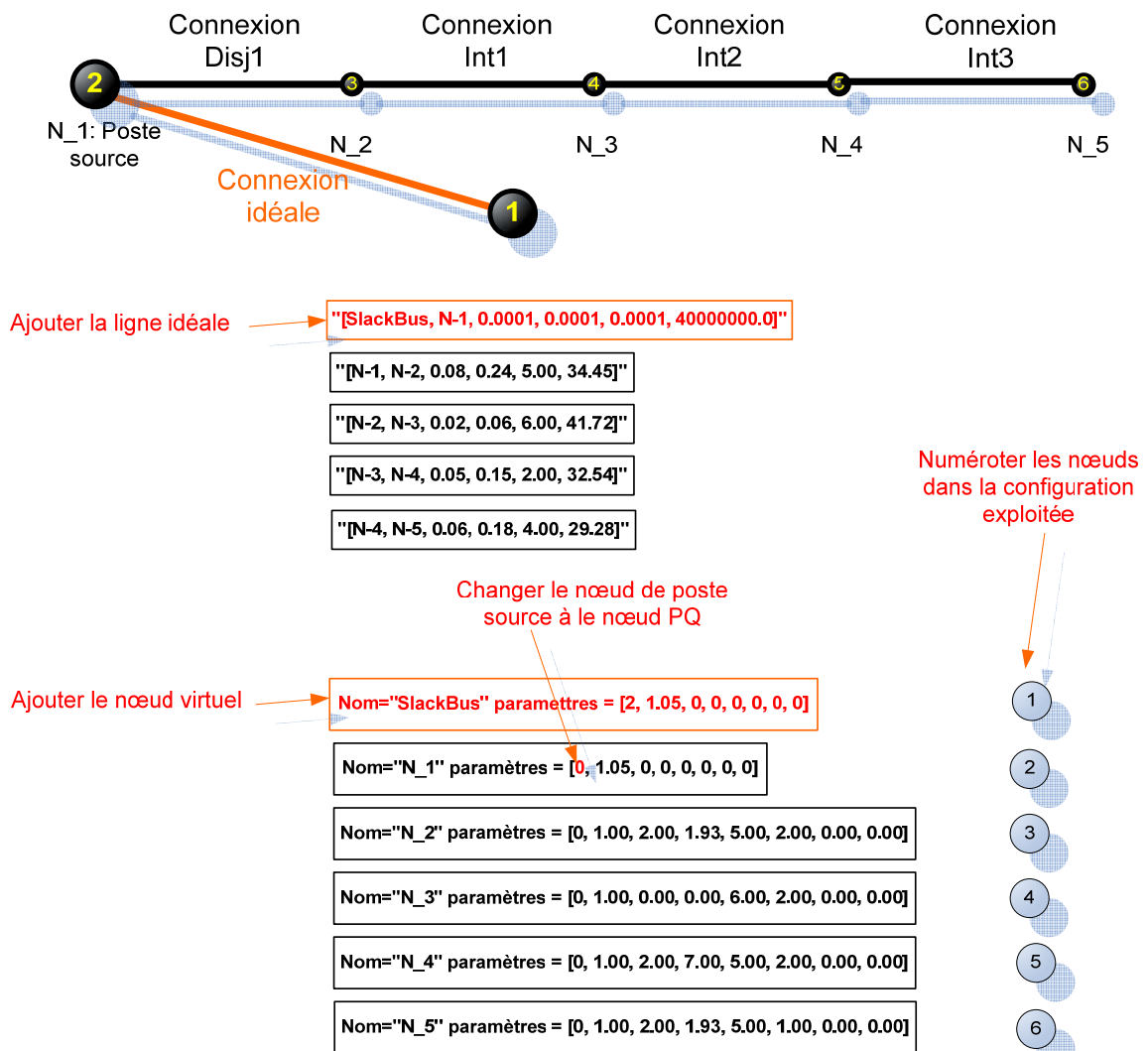


Figure 4.19 : ajout du nœud virtuel et des lignes idéales, numérotation des nœuds

Enfin, le processus de la préparation des données d'entrée se termine par la numérotation des nœuds y compris le nœud virtuel.

Le Tableau 4.2 introduit un exemple des données d'entrée pour la configuration d'un réseau. Il y a 5 connexions et 6 nœuds dans le réseau.

Tableau 4.2 : données d'entrée de la configuration exploitée

```

Data lines input
count nom_p p      nom_q q      r      x      MVAR      Pmax
1      Slack 1      N_1  2      0.0  0.0      0.0      214748.36
2      N_1  2      N_2  3      0.08  0.24      5.0      34.45
3      N_2  3      N_3  4      0.02  0.06      6.0      41.72
4      N_3  4      N_4  5      0.05  0.15      2.0      32.54
5      N_4  5      N_5  6      0.06  0.18      4.0      29.28
Number of lines:      number of nodes:
6                      7

Datas bus inputs
Bus  Type  E      Pg      Qg      Pd      Qd      Qgmin  Qgmax
1    2    1.05  0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
2    0    1.05  0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
3    0    1.0   2.0    1.93   5.0    2.0    0.0    0.0
4    0    1.0   0.0    0.0    6.0    2.0    0.0    0.0
5    0    1.0   2.0    7.0    5.0    2.0    0.0    0.0
6    0    1.0   2.0    1.93   5.0    1.0    0.0    0.0
-----End of Datas in-----
    
```

4.5.2.2 Calcul de la RDC en utilisant la méthode de Newton – Raphson

Après que les données aient été préparées et sur la base des analyses de la méthode de Newton – Raphson, le processus du calcul de la **RDC** est exécuté afin de déterminer les tensions et les phases de la tension sur les nœuds de la configuration complète possible considérée.

Le *Tableau 4.3* introduit les résultats trouvés après le calcul en utilisant des données présentées dans le *Tableau 4.2*.

Dans le *Tableau 4.3*, nous pouvons constater que le processus de calcul a convergé après 3 itérations (iter = 1, 2, 3). A la troisième itération, la valeur maximale des corrections $\Delta P, \Delta Q$ est plus petite que la valeur fixée (0.01). Donc, le processus de calcul de RC s'arrête et nous trouvons des grandeurs ($E[i]$) et leurs phases (d) de la tension sur des nœuds du réseau.

Tableau 4.3 : sorties de calcul de répartition de charges (convergence)

iter: 1	max delPQ:	0.2418
E[2]=1.050011	d=-4.6E-5	
E[3]=1.100645	d=-0.067856	
E[4]=1.108723	d=-0.082549	
E[5]=1.127614	d=-0.108846	
E[6]=1.136305	d=-0.129743	
iter: 2	max delPQ:	0.034469
E[2]=1.050003	d=-4.2E-5	
E[3]=1.086531	d=-0.062237	
E[4]=1.093224	d=-0.074614	
E[5]=1.109319	d=-0.09634	
E[6]=1.116562	d=-0.113265	
iter: 3	max delPQ:	0.00107
E[2]=1.050003	d=-4.2E-5	
E[3]=1.086199	d=-0.062175	
E[4]=1.092844	d=-0.074492	
E[5]=1.108854	d=-0.096084	
E[6]=1.116049	d=-0.112879	

4.5.2.3 Calcul des flux de puissance sur des lignes de la configuration du réseau complet

Après le calcul de RDC d'une configuration du réseau, nous trouvons la tension et la phase de la tension sur les nœuds du réseau complet. Ces valeurs sont utilisées pour déterminer des valeurs de flux de puissance sur des connexions (lignes) en nous appuyant sur l'équation 9 de la section 4.5.1. Les flux de puissance sur les lignes du réseau complet vont être comparés aux seuils correspondants, ce qui nous permet de déterminer s'il existe des surcharges. S'il y a au moins une ligne dont le flux de puissance dépasse le seuil, nous dirons que la ccp_i examinée contient des surcharges. Quand une ccp_i ne contient aucune surcharge et qu'il n'y a pas de chutes de tension supérieures à la limite admissible ($\pm 5\%$) dans les connexions du réseau complet, cette ccp_i examinée est appelée « configuration complète exploitable ». La cp_i correspondant à la ccp_i est appelée « configuration réduite exploitable ».

Le Tableau 4.4 ci-après introduit les valeurs du flux de puissance sur des lignes d'une configuration examinée. Dans ce tableau, l'indice i nous montre le nœud de départ de la ligne examinée, l'indice j nous montre le nœud d'arrivée de la ligne examinée, P_{ij} correspond au flux de puissance active sur la ligne qui lie le nœud i et le nœud j (ligne ij), $P_{ij\max}$ correspond à la puissance maximale circulant sur la ligne ij , Q_{ij} correspond à la puissance réactive sur la ligne ij et **PSC** indique s'il existe ou non une surcharge sur la ligne ij correspondant (**PSC** = Non signifie qu'il n'existe pas de surcharge sur la ligne ij . **PSC** = Oui

signifie qu'il existe au moins une surcharge sur la ligne ij). Dans cette configuration, il n'existe aucune surcharge.

Tableau 4.4 : valeurs de flux sur des lignes après le calcul de RDC

i:1	j:2	P _{ij} : 22.12	P _{ij} max: 2.1474E7	Q _{ij} : -24.94	PSC: Non
i:2	j:3	P _{ij} : 22.08	P _{ij} max: 34.45	Q _{ij} : -25.03	PSC: Non
i:3	j:4	P _{ij} : 18.37	P _{ij} max: 41.72	Q _{ij} : -21.53	PSC: Non
i:4	j:5	P _{ij} : 12.26	P _{ij} max: 32.54	Q _{ij} : -16.75	PSC: Non
i:5	j:6	P _{ij} : 9.09	P _{ij} max: 29.28	Q _{ij} : -9.81	PSC: Non
Slack		P _g [1]=22.1	Q _g =-24.91		

4.5.3 Recherche des configurations exploitables

Dans cette section, à partir du E_{CP} trouvé dans l'étape 1, nous allons examiner chaque configuration et garder seulement les configurations exploitables (appelées l'ensemble des configurations exploitables E_{CE}). La méthode est présentée dans la Figure 4.20.

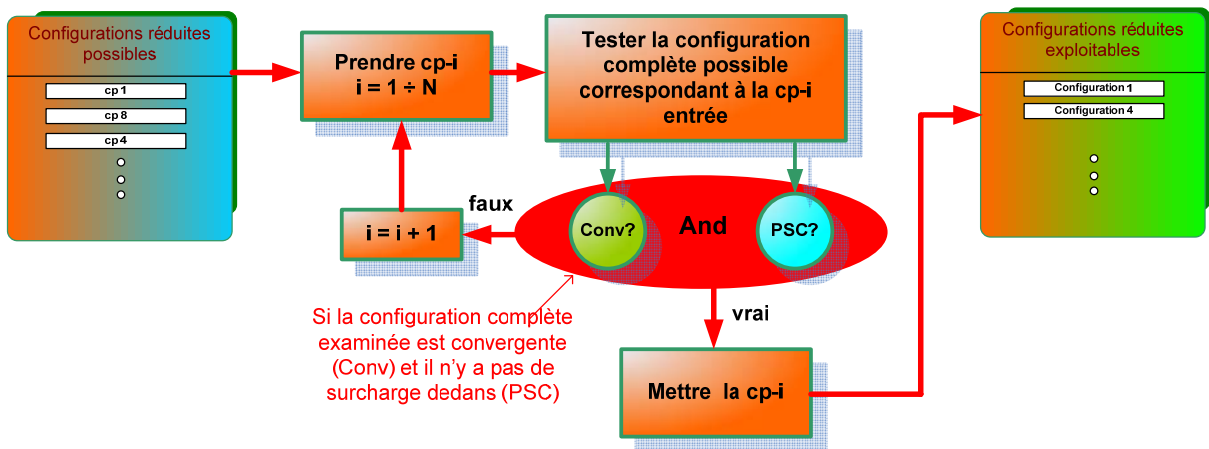


Figure 4.20 : recherche des configurations exploitables

L'algorithme de recherche des configurations exploitables est exécuté comme suit : nous prenons progressivement chaque configuration réduite possible cp_i dans le E_{CP} . En nous basant sur cette cp_i , nous testons la configuration complète possible ccp_i correspondante. S'il n'y a pas de surcharge dans la ccp_i et si cette ccp_i examinée est convergente pour le processus de calcul de **RDC**, nous plaçons la cp_i correspondante dans le E_{CE} . Sinon, nous

passons à la configuration suivante. Après cette étape, le résultat trouvé est l'ensemble des configurations réduites exploitables E_{CE} .

$$E_{CE} = \{ce_1, ce_2, \dots, ce_n\}$$

ce_i : configuration exploitable i du réseau suite un défaut

4.6 Recherche de la meilleure séquence de manœuvres à exécuter afin de passer le réseau de l'état initial à une ce_i (étape 3)

Après l'étape 2 présentée à la section 4.3.2 de ce chapitre, nous obtenons, éventuellement, plusieurs configurations exécutables (contenues dans le E_{CE}). Si nous choisissons une ce_i qui est utilisée pour exploiter le réseau après un défaut, nous devons manœuvrer des ressources du réseau (des interrupteurs et des disjoncteurs) de façon à ce que l'état des ressources corresponde à celui de la ce_i choisie. La liste des manœuvres est appelée sq_i (la séquence des opérations de préparation correspondant à la configuration ce_i dans E_{CE}).

$$sq_i = \{opp_1, opp_2, \dots, opp_n\}$$

opp_i : les opérations de préparation constituant la sq_i

Pour l'ensemble comportant N configurations exploitables dans E_{CE} , nous trouvons ainsi N séquences des opérations de préparation associées. Ainsi, nous pouvons former un ensemble des solutions utilisables pour reconfigurer le réseau :

$$E_{SUs} = \{sol_1, sol_2, \dots, sol_n\}$$

$sol_i = (ce_i, sq_i)$: la solution utilisable i

Un couple d'une configuration exploitable ce_i et sa séquence de manœuvres sq_i forme une solution sol_i .

De plus, quand nous construisons le graphe des opérations d'activation dans l'étape 1, nous n'avons pas encore examiné les conditions et les contraintes mécaniques des ressources des connexions qui satisfont l'exécution correcte des opérations d'activation des connexions dans le graphe considéré. Ainsi, outre la recherche des listes sq_i , nous allons compléter l'analyse du respect de ces conditions/contraintes pour ces opérations.

Enfin, en nous appuyant sur le E_{SUs} , nous allons choisir la $sol_i = (ce_i, sq_i)$ qui a la durée d'exécution des opérations de préparation opp_i de la sq_i minimale.

4.6.1 Algorithme de recherche de la séquence de manœuvres correspondant à une configuration exploitable

La recherche de la séquence sq_i correspondant à une ce_i consiste à chercher des opérations de préparation à exécuter (c'est-à-dire les manœuvres à exécuter) et ainsi à satisfaire des conditions et des contraintes mécaniques des ressources dans les opérations d'activation qui n'ont pas été garanties dans l'étape 1 (construction d'un graphe présentée dans la section 4.4.1).

Pour chaque sq_i , nous devons considérer aussi l'ordre des opérations de fermeture ou d'ouverture des ressources dans chaque liste. C'est un problème très important parce que cet ordre va garantir le respect des contraintes électriques pour les opérations des ressources du réseau (les interrupteurs ne peuvent pas être manœuvrés sous tension, par exemple).

L'algorithme de recherche de la séquence sq_i est décrit dans la *Figure 4.21*. Cet algorithme va être expliqué en utilisant l'exemple de la *Figure 4.22*. L'état initial du réseau (la configuration initiale du réseau après le défaut cf. *Tableau 4.5*, à gauche) et l'état final (une configuration à exploiter une fois la zone de défaut isolée cf. *Tableau 4.5*, à droite) sont des données de base pour cet algorithme. Le principe général consiste à comparer l'état des disjoncteurs et interrupteurs dans les deux configurations afin de déterminer ceux à ouvrir, ceux à ouvrir temporairement puis refermer et ceux à fermer. L'algorithme proposé a été décomposé en 12 étapes afin de respecter les séquences d'ouverture et de fermeture des différentes ressources. Nous allons détailler chacune d'entre elles.

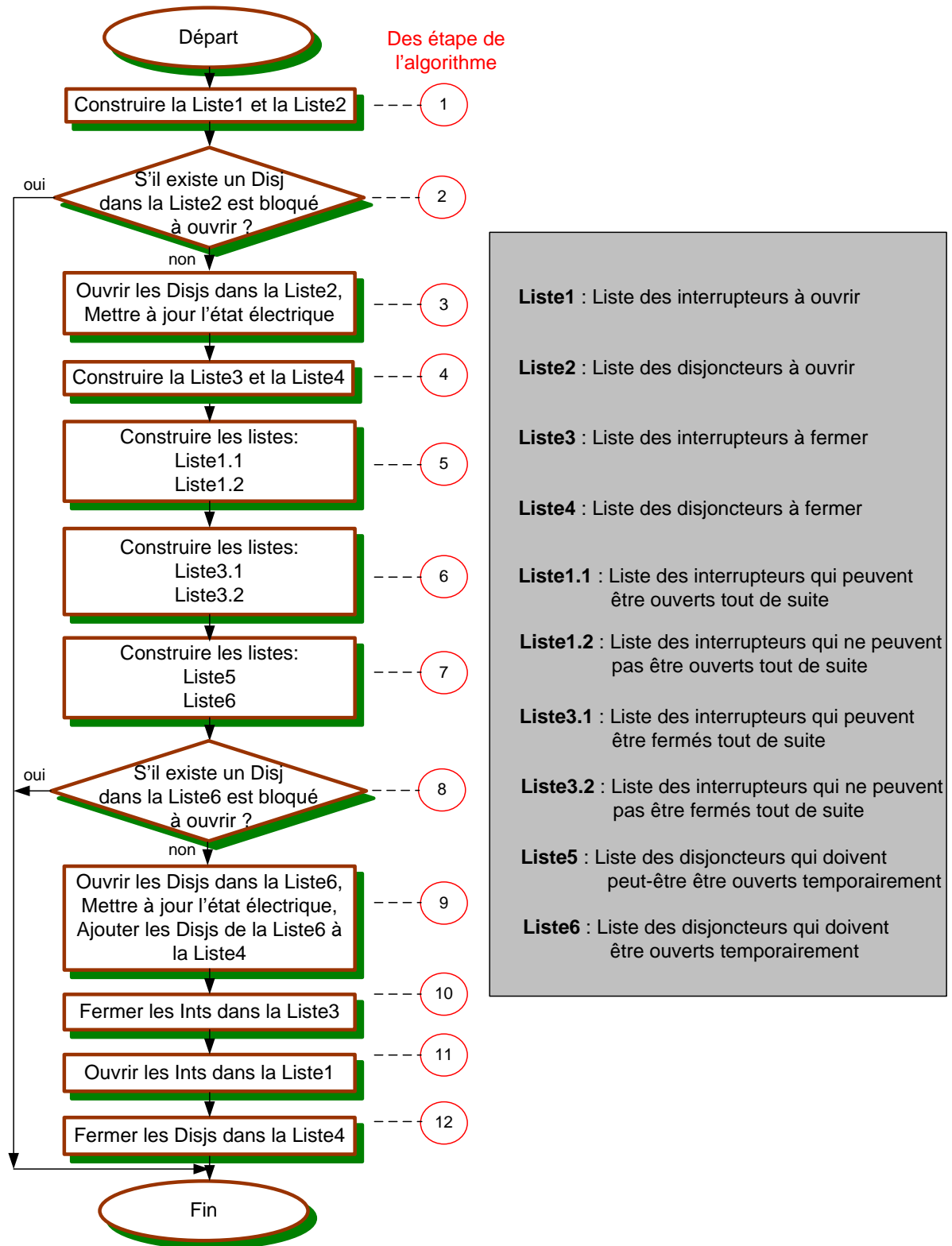


Figure 4.21 : algorithme de recherche de la séquence des manœuvres

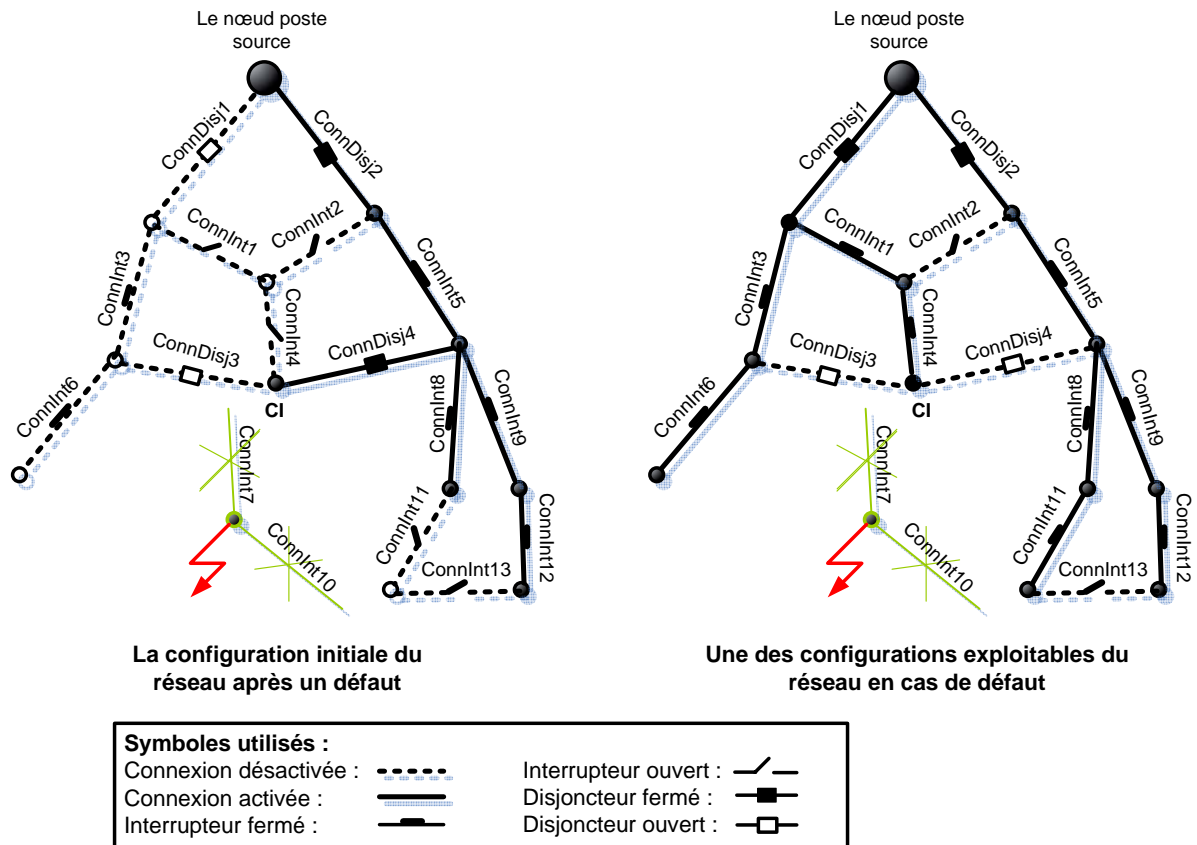


Figure 4.22 : configuration initiale et configuration exploitable du réseau après un défaut

Tableau 4.5 : état initial et état final du réseau présenté dans la figure 4.21

L'état initial du réseau suite un défaut			L'état final du réseau à atteindre		
Connexion	L'état de la connexion	L'état de la ressource	Connexion	L'état de la connexion	L'état de la ressource
ConnDisj1	inactive	ouvert	ConnDisj1	active	fermé
ConnDisj2	active	fermé	ConnDisj2	active	fermé
ConnDisj3	inactive	ouvert	ConnDisj3	inactive	ouvert
ConnDisj4	active	fermé	ConnDisj4	inactive	ouvert
ConnInt1	inactive	ouvert	ConnInt1	active	fermé
ConnInt2	inactive	ouvert	ConnInt2	inactive	ouvert
ConnInt3	inactive	fermé	ConnInt3	active	fermé
ConnInt4	inactive	ouvert	ConnInt4	active	fermé
ConnInt5	active	fermé	ConnInt5	active	fermé
ConnInt6	inactive	fermé	ConnInt6	active	fermé
ConnInt7	interdit	ouvert	ConnInt7	interdit	ouvert
ConnInt8	active	fermé	ConnInt8	active	fermé
ConnInt9	active	fermé	ConnInt9	active	fermé
ConnInt10	interdit	ouvert	ConnInt10	interdit	ouvert
ConnInt11	inactive	ouvert	ConnInt11	active	fermé
ConnInt12	active	fermé	ConnInt12	active	fermé
ConnInt13	inactive	ouvert	ConnInt13	inactive	ouvert

La **première étape** de cet algorithme repose sur l'état des ressources correspondant à la ce_i examinée et l'état des ressources correspondant à l'état e_{mit} . Il s'agit ici de construire deux listes des ressources qui doivent être ouvertes afin qu'il n'existe pas de boucles dans la configuration à exploiter en cas de défaut :

- la liste des interrupteurs à ouvrir : **Liste1**,
- la liste des disjoncteurs à ouvrir : **Liste2**.

L'algorithme de cette étape est décrit dans la *Figure 4.23*.

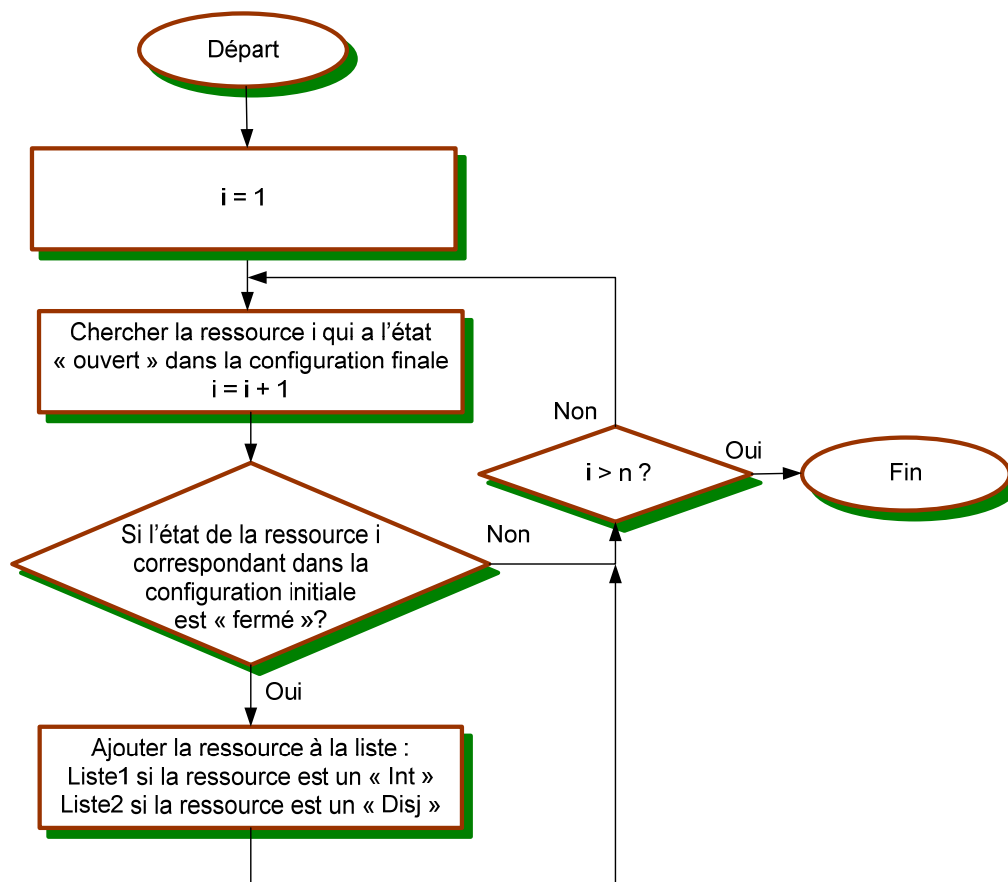


Figure 4.23 : construction des listes des interrupteurs et disjoncteurs à manœuvrer

Par exemple, en considérant le *Tableau 4.5*, nous pouvons nous apercevoir que dans l'état final à atteindre, l'Int2, l'Int13, le Disj3 et le Disj4 sont des ressources manœuvrables qui doivent être ouvertes dans la configuration à exploiter. En comparant avec la configuration initiale, seul le Disj4 est la ressource qui doit être ouverte (la ligne 6 dans le *Tableau 4.5*) (parce que l'état du Disj4 dans la configuration initiale est « fermé »). Ainsi, il est ajouté dans la **Liste2**. Dans le cas où la partie opérative à ouvrir est un interrupteur, celui-ci est ajouté dans la **Liste1**. Remarquons que le fait de manœuvrer sous tension les disjoncteurs peut

introduire des coupures d'alimentation de parties saines du réseau. C'est pourquoi dans le chapitre V, nous considérerons des cas : autorisation de manœuvrer les disjoncteurs en charge ou non.

La **deuxième étape** de l'algorithme (*cf. Figure 4.21*) consiste à examiner si un disjoncteur a l'autorisation d'opérer en charge ou non afin d'éviter la coupure temporaire d'alimentation des clients sains sous tension (clients importants). Dans ce cas, l'exploitant du réseau doit interdire de manœuvrer quelques disjoncteurs en charge. Par exemple, le Disj4 ne peut pas être ouvert en fonctionnement pour éviter de couper l'alimentation de la charge en nœud « **ci** ». Alors, l'opération d'ouverture du Disj4 est interdite à opérer (*cf. Figure 4.22*).

Ainsi, dans le processus de construction de la **Liste2**, si nous trouvons qu'au moins une ressource qui doit être manœuvrée (via des opérations de préparation de cette ressource) mais que cette ressource est bloquée, nous arrêtons le processus de construction de cette séquence et la configuration correspondante est éliminée.

La **troisième étape** de l'algorithme (*cf. Figure 4.24*) consiste à ouvrir les disjoncteurs trouvés dans la **Liste2**. L'ouverture des disjoncteurs de cette liste est exécutée au début de la liste s_i parce que toutes les conditions et les contraintes de ces opérations ont été satisfaites. Mais, comme nous l'avons déjà mentionné, la fermeture ou l'ouverture d'un interrupteur n'est pas réalisée sous tension comme pour un disjoncteur. Pour fermer ou ouvrir un interrupteur, il faut tester tout d'abord les conditions et les contraintes électriques des interrupteurs. S'il n'y a pas de tension sur leurs bornes, ces interrupteurs peuvent être fermés tout de suite. Sinon, ces interrupteurs ne peuvent pas être manœuvrés tout de suite (que ce soit à l'ouverture ou à la fermeture). Ainsi, l'ouverture des disjoncteurs dans la **Liste2** est réalisée au début de la séquence des opérations de préparation afin de permettre de respecter les conditions et contraintes électriques des opérations sur les interrupteurs.

Chaque ouverture d'un disjoncteur dans la **Liste2** peut amener des coupures électriques sur des nœuds du réseau. La détermination des nœuds dans le réseau non alimentés après une ouverture d'un disjoncteur est exécutée via la mise à jour de l'état électrique en se basant sur la détermination des connexions qui sont séparées (l'opération de séparation d'une connexion) ou/et désactivées (l'opération de désactivation d'une connexion).

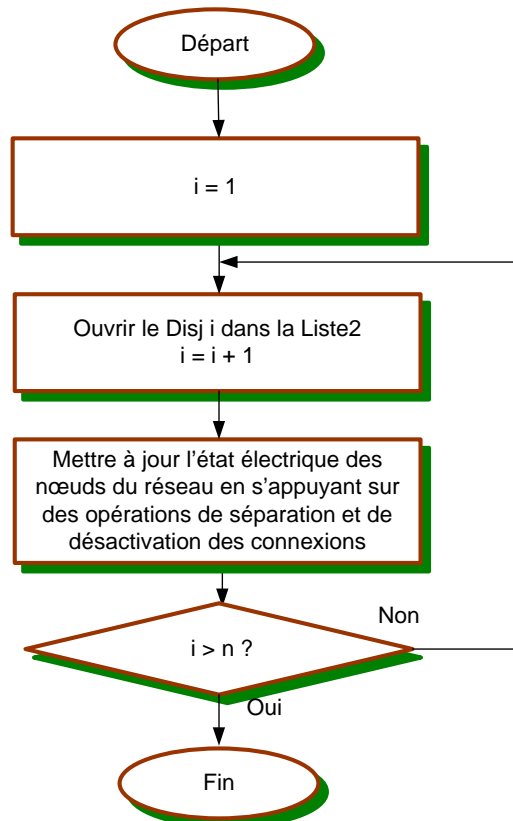


Figure 4.24 : ouverture des disjoncteurs dans la Liste2
et mise à jour l'état électrique du réseau

La **quatrième étape** de l'algorithme consiste à chercher toutes les ressources qui doivent être fermées pour atteindre la ce_i (cf. Figure 4.25). Nous proposons de construire deux listes :

- la liste des interrupteurs à fermer : **Liste3**,
- la liste des disjoncteurs à fermer : **Liste4**.

Cette étape est réalisée en prenant progressivement des ressources « ressource i » de la ce_i qui ont l'état « fermé ». Ensuite, nous examinons la « ressource i » correspondant dans l'état e_{int} . Si cette ressource est un « **Int** » et que son état est « **ouvert** », nous l'ajoutons à la **Liste3**. Si cette ressource est un « **Disj** » et que son état est « **ouvert** », nous l'ajoutons à la **Liste4**.

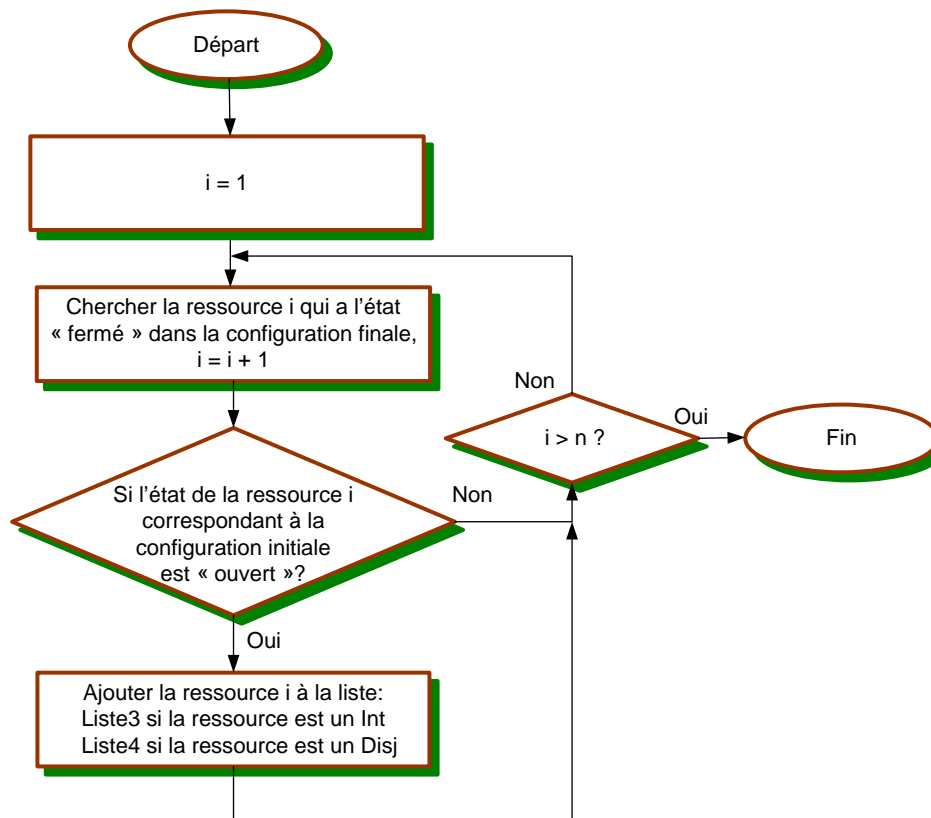


Figure 4.25 : construction des listes des interrupteurs et disjoncteurs à fermer

Avec l'exemple de la Figure 4.22, les interrupteurs Int1, Int4 et Int11 sont ceux à fermer, le disjoncteur Disj1 est celui à fermer (les ressources dans des lignes grisées du Tableau 4.5).

La **cinquième étape** consiste à créer deux sous – listes à partir de la **Liste1** afin de partager les interrupteurs à ouvrir suivant le respect ou non des contraintes électriques associées à l'ouverture :

- la sous - liste des interrupteurs qui peuvent être ouverts tout de suite : **Liste1.1**,
- la sous - liste des interrupteurs qui ne peuvent pas être ouverts tout de suite : **Liste1.2**.

La **sixième étape** consiste à créer deux sous – listes à partir de la **Liste3** suivant le même critère :

- la sous - liste des interrupteurs qui peuvent être fermés tout de suite : **Liste3.1**,
- la sous - liste des interrupteurs qui ne peuvent pas être fermés tout de suite : **Liste3.2**.

Ces deux étapes ont pour but de préparer des données pour les étapes suivantes de l'algorithme. Le principe des deux étapes est détaillé à la Figure 4.26.

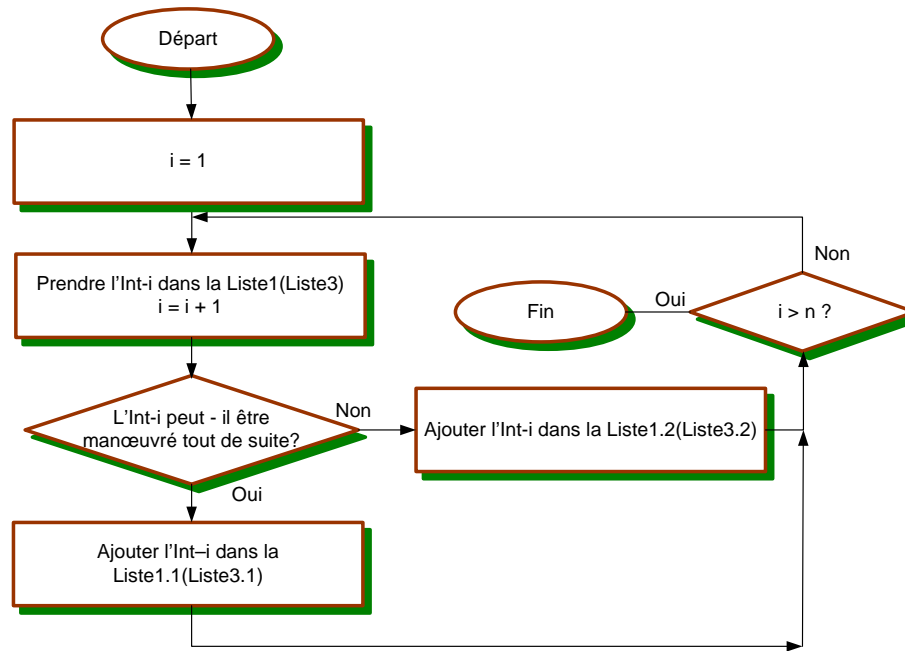


Figure 4.26 : construction des sous listes des ressources à manœuvrer

La **septième étape** de l’algorithme consiste à chercher les disjoncteurs qui doivent être ouverts temporairement et ainsi construire la **Liste6**. Le but de cette étape est de préparer les conditions et les contraintes électriques afin que les interrupteurs dans les **Liste1.2** et **Liste3.2** puissent être manœuvrés.

Tout d’abord, nous construisons la **Liste5** contenant les disjoncteurs dont l’état initial et l’état final sont fermés. En utilisant la **Liste1.2**, la **Liste3.2** et cette dernière liste, nous construisons la **Liste6** contenant la liste des disjoncteurs devant être ouverts temporairement. En ouvrant les disjoncteurs de la liste 6, les contraintes électriques permettant la manœuvre des interrupteurs des listes 1.2 et 3.2 sont alors satisfaites. Il faut ensuite bien avoir en mémoire qu’il faudra refermer ces disjoncteurs.

La **Figure 4.27** présente la construction des deux listes : **Liste5** et **Liste6**. Pour construire la **Liste 6**, le principe repose sur des tests successifs d’ouverture des disjoncteurs et de vérification conjointe du respect des contraintes électriques des interrupteurs des listes 1.2 et 3.2.

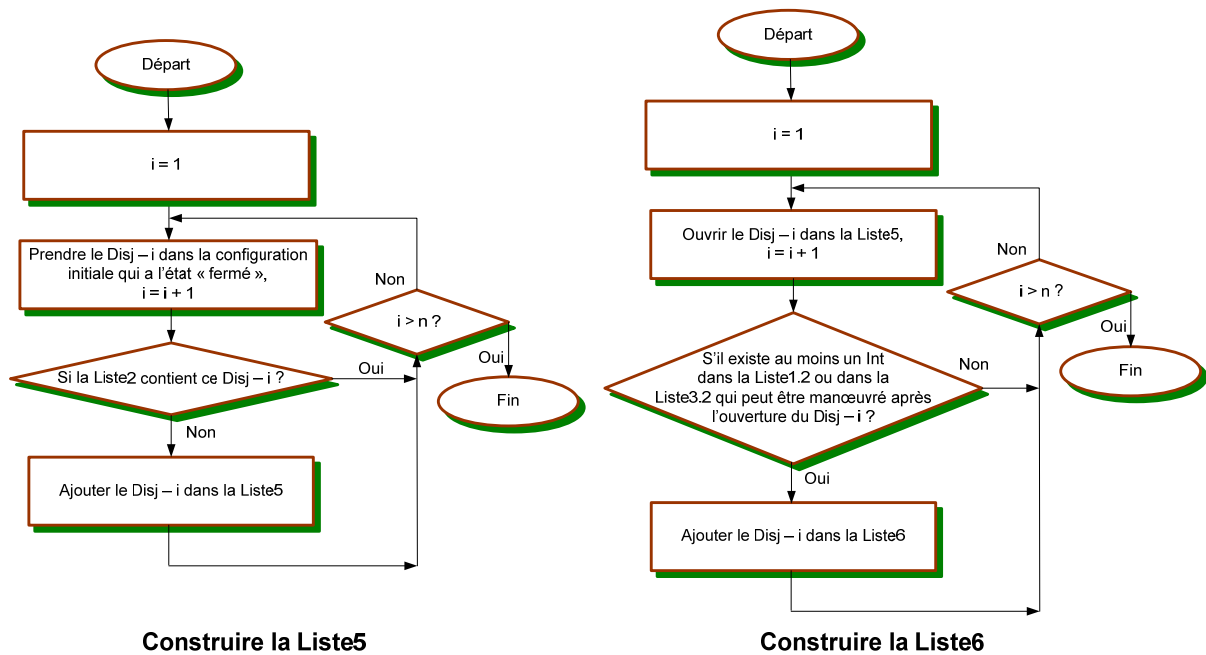


Figure 4.27 : construction des listes des disjoncteurs à manœuvrer

Par exemple, dans la *Figure 4.22*, l’Int11 est un interrupteur à fermer mais il ne peut pas être fermé tout de suite à cause des conditions et/ou contraintes électriques. Afin de pouvoir manœuvrer l’Int11, il faut tout d’abord couper l’électricité en amont de l’Int11 en ouvrant temporairement le Disj2 (le Disj2 n’est pas un disjoncteur à ouvrir, il n’appartient pas la *Liste2* mais il doit être ouvert pour permettre de respecter les conditions et contraintes électriques pour que l’opération de la fermeture de l’Int11 puisse être réalisée). Ce disjoncteur (le Disj2) est ensuite ajouté à la *Liste6*.

La **huitième étape** de l’algorithme (cf. *Figure 4.21*) joue le rôle comme la deuxième étape de cet algorithme. Elle examine si un disjoncteur a l’autorisation d’opérer en charge ou non. Dans le processus de construction de la *Liste6*, si nous trouvons qu’au moins une ressource qui doit être manœuvrée (via des opérations de préparation de cette ressource) mais que cette ressource est bloquée, nous arrêtons le processus de construction de cette séquence et la configuration correspondante est éliminée.

La **neuvième étape** de l’algorithme consiste à ouvrir tous les disjoncteurs qui doivent être ouverts temporairement (cf. *Figure 4.28*). Après l’ouverture de chaque disjoncteur de la *Liste6*, il faut mettre à jour l’état électrique des nœuds du réseau en se basant sur des opérations de séparation et des opérations de désactivation des connexions. Le disjoncteur qui vient d’être ouvert est ajouté à la *Liste4* pour qu’il soit refermé après la manœuvre des interrupteurs des *Liste1.2* et *Liste3.2*.

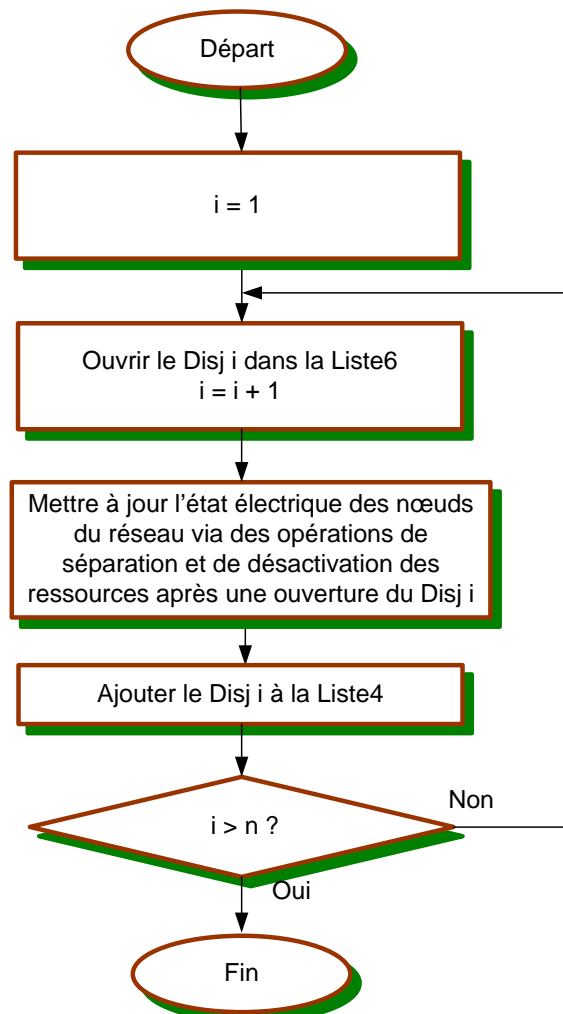


Figure 4.28 : ouverture des disjoncteurs de la Liste6

Les **trois dernières étapes (dixième, onzième et douzième étape)** dans l’algorithme sont exécutées très simplement. Ce sont les étapes de fermeture ou d’ouverture des interrupteurs ou des disjoncteurs des listes **Liste1**, **Liste3** et **Liste4** :

- la dixième étape de l’algorithme consiste à ouvrir les interrupteurs de la **Liste1** afin d’éviter de créer des boucles dans la configuration à exploiter,
- la onzième étape de l’algorithme consiste à fermer les interrupteurs de la **Liste3**,
- la douzième étape de l’algorithme consiste à fermer les disjoncteurs de la **Liste4**.

La réalisation de ces trois étapes est présentée dans la *Figure 4.29*.

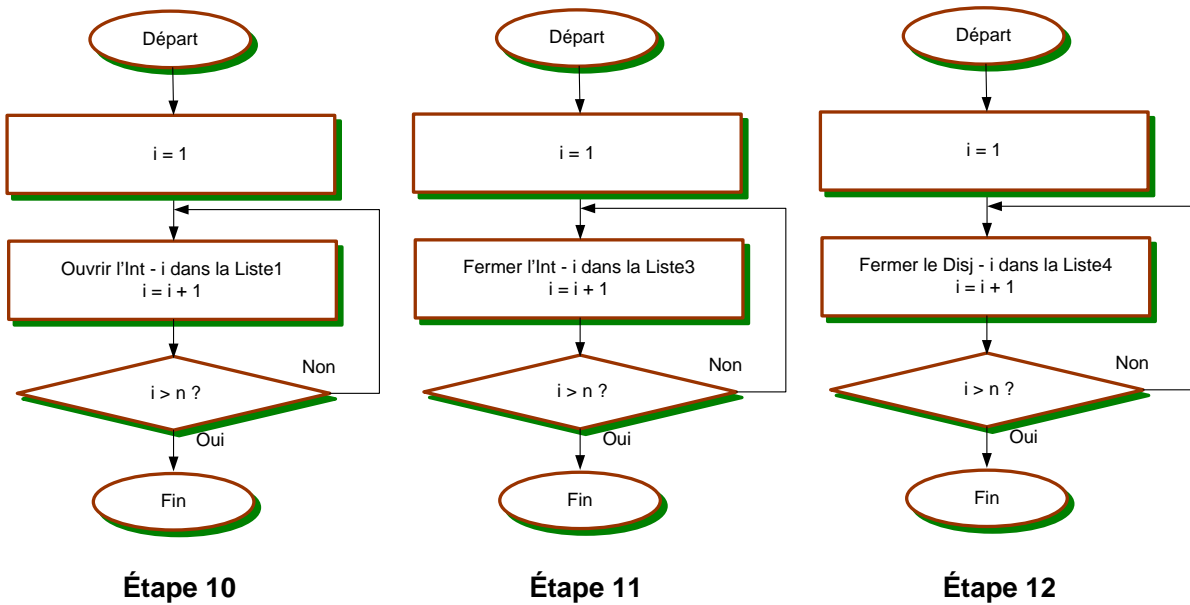


Figure 4.29 : algorithmes de la 10^{ème}, 11^{ème} et 12^{ème} étape

4.6.2 Recherche du E_{SUS} en appliquant l’algorithme de recherche sq_i

Pour chaque ce_i dans le E_{CE} , en appliquant l’algorithme présenté dans la section 4.6.1, nous déterminerons ici une séquence des opérations de préparation sq_i et ensuite nous formons la solution utilisable sol_i . La réalisation de la construction du E_{SUS} (cf. section 4.6) est présentée dans la Figure 4.30.

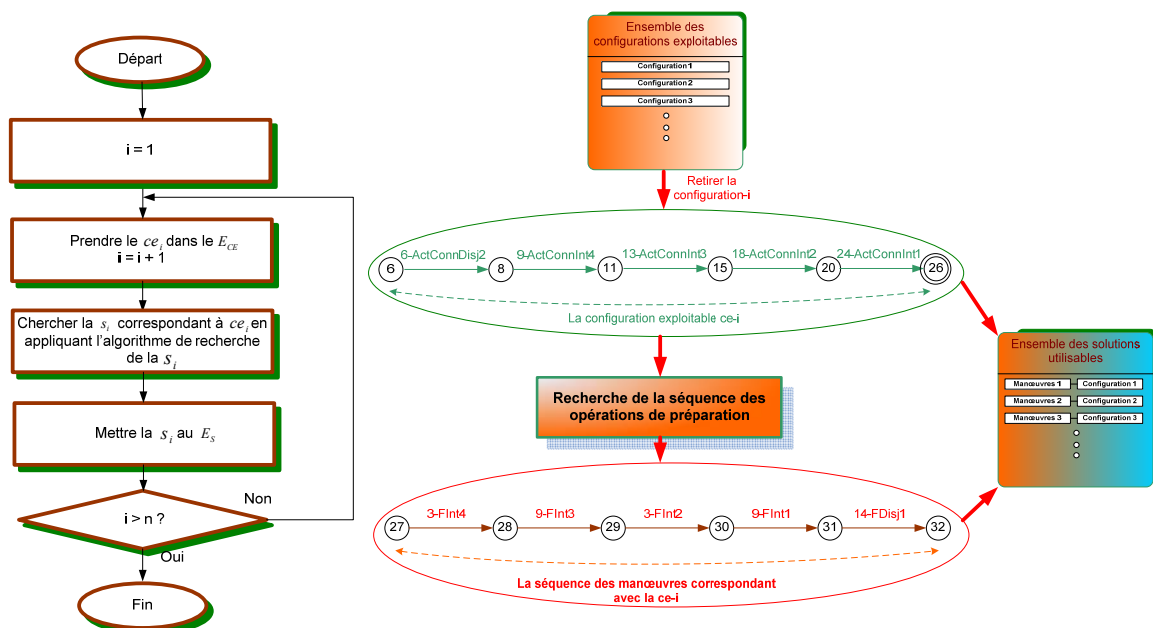


Figure 4.30 : construction de l’ensemble des séquences de manœuvres

A l'issue de cette partie, il est alors possible de chercher la meilleure solution (la séquence des manœuvres et la configuration correspondant) pour reconfigurer le réseau après le défaut.

4.6.3 Recherche et proposition de la solution optimale (sol_k choisie)

Le travail suivant consiste à rechercher dans l'ensemble des solutions utilisables E_{SUS} la séquence sq_k minimise de temps total d'exécution. L'algorithme de recherche de la meilleure solution réside en deux phases :

- calculer le temps d'exécution de chaque sq_i de la sol_i dans le E_{SUS} ,
- rechercher et proposer la solution sol_k qui possède le temps d'exécution de la sq_i minimal.

Nous savons qu'une sq_i est composée des opérations de préparation :

$$sq_i = (opp_1, opp_2, \dots)$$

Dans le modèle de chaque opp_i , il existe un paramètre « Durée » qui représente le temps d'exécution de cette opération.

Le temps total pour exécuter toutes les opérations dans la sq_i est le somme des durées des opp_i .

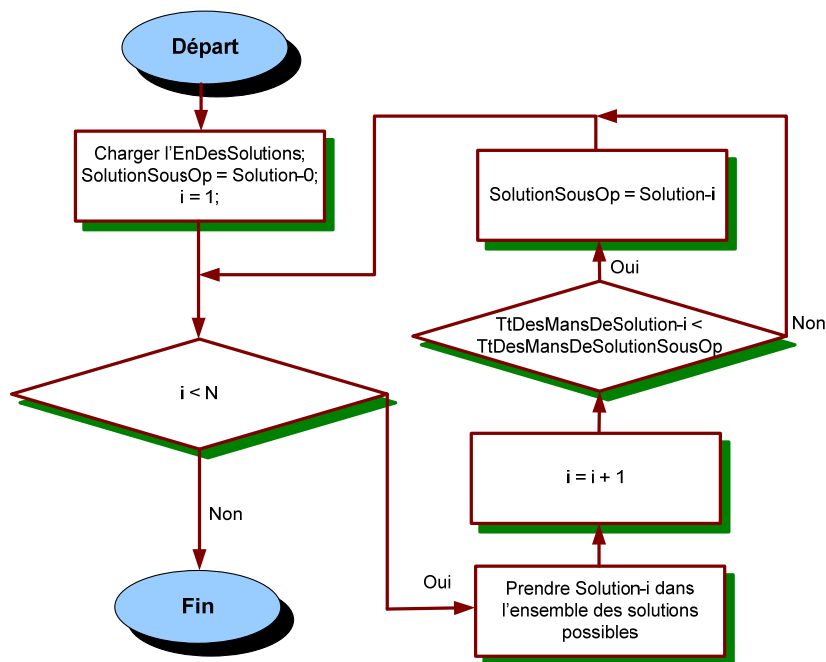


Figure 4.31 : recherche de la meilleure solution dans l'ensemble des solutions possibles

Le principe de cet algorithme (*cf. Figure 4.31*) est que l'on affecte tout d'abord la première solution de la L_{SP_s} à une variable avec le nom « SolutionSousOp » - la solution sous optimale. Ensuite, nous prenons progressivement des solutions dans la L_{SP_s} ($i = 1 \div N$) et comparons la durée totale des manœuvres de la s_i (TtDesMansDeSolution-i) avec le temps total des manœuvres dans la séquence des opérations dans SolutionSousOp (TtDesMansDeSolutionSousOp). Si la variable TtDesMansDeSolution-i est plus petite que TtDesMansDeSolutionSousOp, nous attribuons la solution i à SolutionSousOp. Si non, nous passons à la solution i ensuite de la liste L_{SP_s} . A la fin, la solution choisie est mise au sein de la variable SolutionSousOp.

4.7 Etape de recherche et d'insertion des parallélismes (étape 4)

Après l'étape 3, nous avons choisi un couple constitué d'une configuration exploitable ce_k et d'une séquence des opérations de préparation s_k . Dans la séquence s_k , outre la considération de l'ordre de manœuvre d'une opération dans la séquence, il faut aussi considérer la possibilité de leur exécution en parallèle.

Par exemple, dans la *Figure 4.32*, nous présentons une configuration exploitable ce_k choisie et la séquence des manœuvres s_k correspondante pour le réseau exemple de la *Figure 4.22*. Dans la s_k , le Disj1 et le Disj2 peuvent être fermés ou ouverts en parallèle parce qu'il n'y a pas d'incompatibilité des conditions électriques ainsi que des contraintes électriques. De la même façon, l'Int1, l'Int4 et l'Int11 peuvent être fermés en parallèle. Si ces ressources correspondent à des opérations manœuvrées manuellement, l'envoi des équipes pour manœuvrer en même temps ces ressources va épargner du temps par rapport à une solution séquentielle de manœuvres.

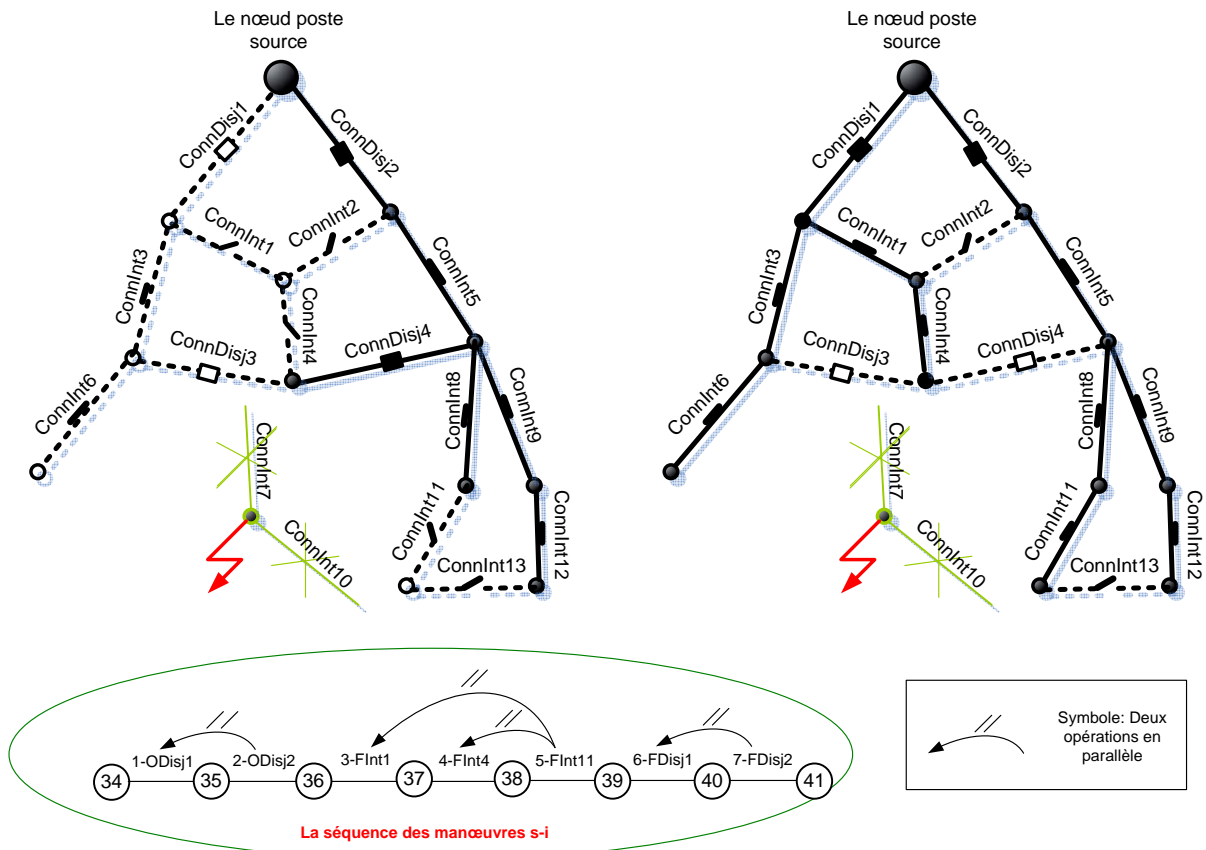


Figure 4.32 : exemple des opérations parallèles

Sébastien HENRY, dans sa thèse, a développé une méthode pour introduire les parallélismes [HEN-2005]. Cette méthode est réalisée en deux étapes. Sur la base de la s_i , elle cherche tout d’abord des parallélismes d’exécution entre une opération et celles qui la précèdent. Ensuite, elle cherche des parallélismes induites (cf. section 6.2, chapitre 8, thèse de S. Henry [HEN-2005]). Nous reprenons à notre compte cette technique nous permettant désormais d’optimiser la date de fin au plus tard de la séquence de reconfiguration. Tous les détails de cet algorithme sont présentés dans l’annexe 1.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée le mécanisme de construction dynamique de la séquence de manœuvres sous-optimale. Basé sur une stratégie consistant à rechercher un compromis entre la minimisation du temps de calcul et l’optimalité de la solution générée, nous avons décrit pas à pas les différentes étapes algorithmiques fondées chacune sur la recherche d’un optimum local. Le compromis temps/optimalité proposé est basé sur deux

principes : la décomposition en quatre sous-problèmes (Configurations - Sécurité - Manœuvres - Parallélismes).

L'originalité de la méthode proposée, au-delà de la décomposition algorithmique mise en œuvre et du modèle très structurant, réside également dans l'intégration d'une composante continue visant à calculer, pour chaque séquence des opérations prises (ouvertures/fermetures d'interrupteurs/disjoncteurs), un calcul de répartition de charges. En ce sens, l'approche s'apparente fortement d'une approche hybride, à la fois discrète et continue.

Il est à remarquer que la simplicité apparente de la démarche globale de reconfiguration proposée ici est le fruit de la structuration du modèle développé.

Au final, retenons que l'algorithme développé au sein de ce chapitre s'appuie sur quatre étapes que nous résumons comme suit :

- une étape de construction d'un graphe G des opérations d'activation et la recherche de l'ensemble des configurations possibles E_{CP} ,
- une étape visant à calculer la répartition des charges d'une configuration cp_i à partir de la méthode de Newton - Raphson et la recherche de l'ensemble des configurations exécutables E_{CE} ,
- la recherche de la séquence des manœuvres à exécuter s_i (séquence des opérations de préparation) correspondant à une ce_i et le choix de la meilleure solution à exploiter.
- la recherche des parallélismes potentiels et leur intégration dans la solution finale.

Nous nous proposons maintenant, dans le cinquième chapitre, de mettre en application la modélisation proposée au Chapitre 3 et l'algorithme qui vient d'être décrit dans ce chapitre afin de montrer la pertinence de notre approche de reconfiguration sur un cas d'étude réel.

Chapitre 5

Application à des cas concrets

5.1 Introduction

La finalité de ce chapitre est de tester, via un réseau réaliste, la justesse de la modélisation ainsi que le bon fonctionnement de la méthode de reconfiguration qui ont été proposés dans les Chapitre 3 et Chapitre 4.

Outre ce test, une autre finalité de ce chapitre consiste à montrer des scénarii qui peuvent être rencontrés dans le processus de reconfiguration du réseau comme la reconfiguration avec ou sans coupure temporaire d'électricité pour les clients sains voire le traitement des cas de surcharge mis en évidence lors de la reconfiguration. A partir de ces cas, nous montrons la capacité de traitement de la méthode de reconfiguration ainsi que les différentes façons de reconfigurer. Cette illustration permettra aussi d'évoquer les pistes possibles d'évolution de la méthode proposée ainsi que ses limites.

5.2 Présentation du réseau d'étude

Cette section présente tout d'abord le réseau d'étude (réseau exemple) en fonctionnement normal (structure, caractéristiques et état du réseau). Par la suite, nous simulerons l'occurrence d'une défaillance entraînant la consignation de la partie contenant le défaut. A partir de cette configuration sous défaut, nous appliquerons notre méthode afin de réalimenter tous les clients sains du réseau.

5.2.1 Réseau en fonctionnement normal

5.2.1.1 Structure du réseau complet

Nous considérons ici un réseau 123 nœuds IEEE [KER-2004]. Afin de mieux en appréhender sa nature, nous présentons ci-après sa structure, ses nœuds, ses connexions ainsi que ses ressources (*cf. Figure 5.1*).

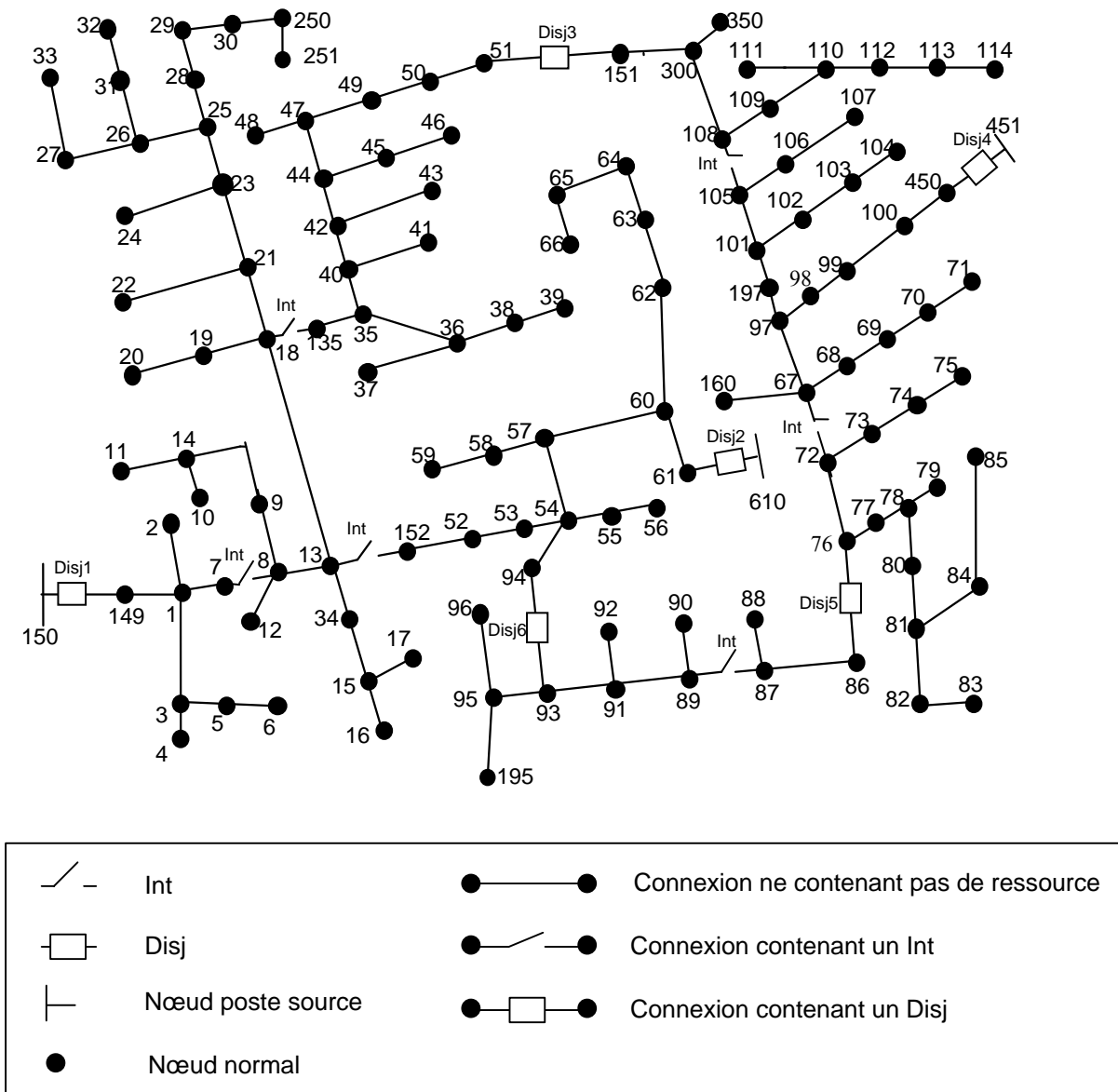
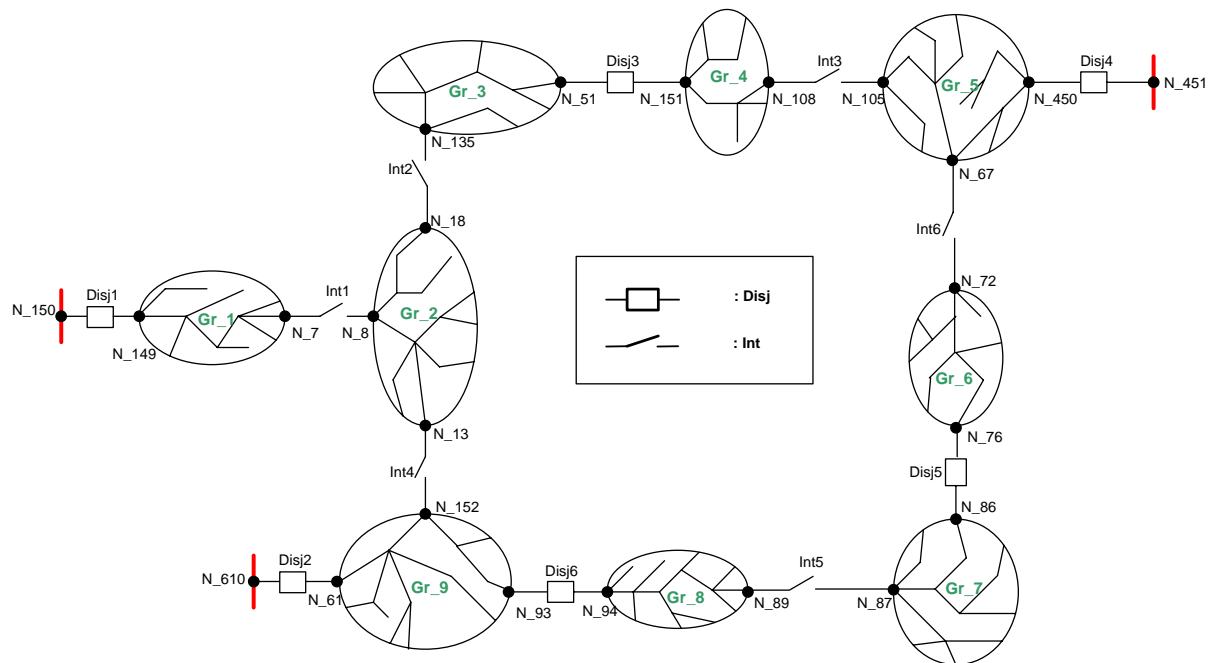


Figure 5.1 : structure du réseau réel

Dans ce réseau, 129 connexions sont considérées. Parmi elles, seulement 12 contiennent une ressource de type interrupteur ou disjoncteur. Le reste des 117 autres connexions représentent des lignes.

En regroupant les connexions qui ne contiennent pas de ressources manœuvrables, nous pouvons simplifier ce réseau comme dévoilé dans la *Figure 5.2*.



5.2.1.2 Caractéristiques

a. Nœuds postes sources et charges

Les nœuds postes sources représentent la sortie du secondaire des transformateurs **HTB/HTA** pour le réseau considéré. Ils fournissent la puissance active et réactive au départ qu'ils alimentent. Trois nœuds postes sources sont identifiés : N_150, N_451 et N_610.

Les nœuds charges correspondent aux points de consommation. Sur ces nœuds, nous trouvons des clients qui sont raccordés. Dans le réseau considéré, ce sont les nœuds autres que les trois nœuds postes sources.

Nous dénombrons aussi, par rapport au réseau réduit, neuf nœuds groupés : Gr_1, Gr_2, Gr_3, Gr_4, Gr_5, Gr_6, Gr_7, Gr_8 et Gr_9 (cf. *Tableau 5.1*).

b. Ressources

Les ressources manœuvrables dans le réseau sont :

- les interrupteurs qui ne peuvent être manœuvrés que hors tension : Int1, Int2, Int3, Int4, Int5 et Int6.
- les disjoncteurs qui peuvent être manœuvrés sous tension : Disj1, Disj2, Disj3, Disj4, Disj5 et Disj6.

c. Connexions qui contiennent ou ne contiennent pas de ressources manœuvrables

Dans notre cas d'étude, nous dénombrons 12 connexions qui contiennent une ressource manœuvrable et 117 connexions qui ne contiennent pas de ressource manœuvrable.

Les connexions qui contiennent une telle ressource sont soit :

- de type « ConnIntX » : ConnInt1, ConnInt2, ConnInt3, ConnInt4, ConnInt5 et ConnInt6.
- de type « ConnDisjX » : ConnDisj1, ConnDisj2, ConnDisj3, ConnDisj4, ConnDisj5 et ConnDisj6.

Les connexions ne contenant pas de ressource manœuvrable sont mentionnées dans le *Tableau 5.1*. Ce tableau nous montre aussi des connexions dans certain groupe du réseau simple de la *Figure 5.2*.

Tableau 5.1 : connexions ne contenant pas de ressource manœuvrable

Groupe	Connexions (nœud de départ - nœud arrivé)
Gr_1	149-1, 1-2, 1-3, 3-4, 3-5, 5-6, 1-7
Gr_2	8-12, 8-13, 8-9, 9-14, 14-10, 14-11, 13-34, 34-15, 15-16, 15-17, 13-18, 18-19, 19-20, 18-21, 21-22, 21-23, 23-24, 23-25, 25-26, 25-28, 28-29, 29-30, 30-250, 250-251, 26-31, 31-32, 26-27, 27-33
Gr_3	135-35, 35-36, 36-37, 36-38, 38-39, 35-40, 40-41, 40-42, 42-43, 42-44, 44-45, 45-46, 44-47, 47-48, 47-49, 49-50, 50-51
Gr_4	151-300, 300-350, 300-108, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112, 112-113, 113-114
Gr_5	105-106, 106-107, 105-101, 101-102, 102-103, 103-104, 101-197, 197-97, 97-98, 98-99, 99-100, 100-450, 97-67, 67-160, 67-68, 68-69, 69-70, 70-71
Gr_6	72-73, 73-74, 74-75, 72-76, 76-77, 77-78, 78-79, 78-80, 80-81, 81-82, 82-83, 81-84, 84-85
Gr_7	86-87, 87-88
Gr_8	89-90, 89-91, 91-92, 91-93, 93-95, 95-96, 99-195
Gr_9	94-54, 54-55, 55-56, 54-53, 53-52, 52-152, 54-57, 57-58, 58-59, 57-60, 60-61, 60-62, 62-63, 63-64, 64-65, 65-66

d. Pertinence du réseau de test

Le choix d'un réseau de test de la méthode développée dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire est particulièrement important puisqu'il doit confronter notre approche à des situations complexes, difficilement appréhendables par d'autres méthodes. Il doit ainsi permettre :

- **d'exprimer différents de types de connexions et de classes de modèles**

Dans le Chapitre 3, nous avons mentionné qu'il existe deux types de connexions (ConnIntX et ConnDisjX) dont les opérations appartiennent aux deux classes des opérations (opération de préparation et opération induite). Le réseau exemple contient des éléments de chacun de ces types.

- **d'être propice à la reconfiguration**

Le réseau sélectionné, disposant de plusieurs départs et de plusieurs chemins de réalimentation (par exemple, les connexions ConnDisj2, ConnDisj3 ou ConnDisj6), permet d'envisager la réalimentation de toute ou partie du réseau par un des autres postes sources. Par exemple, la partie Gr_6 peut être alimentée par la source N_150, N_451 ou encore N_610.

- **d'intégrer un parallélisme potentiel opératoire**

Une des caractéristiques de notre méthode réside dans l'étape 4 de recherche des opérations parallélisables (cf. Chapitre 4, section 4.7). Dans le réseau proposé, la multiplicité des parties de réseau indépendantes est propice à la parallélisation des manœuvres. Selon la position du défaut, il sera possible ou non d'obtenir une séquence de manœuvres comportant des opérations exécutables en parallèle.

- **d'être proche de la réalité**

Le réseau sélectionné s'appuie sur un nombre assez important de ressources et de nœuds. Il permet donc de couvrir des cas de reconfiguration allant du plus simple comme le cas d'une reconfiguration sans coupure temporaire des clients sains sous tension, au plus complexe comme le cas de coupures temporaires des clients sains sous tension ou avec surcharges. Ainsi, nous pouvons conclure que ce réseau (et les cas considérés) possède assez de réalisme et de complexité par rapport à la réalité. Ce cas d'étude se prête donc bien aux tests que nous souhaitons réaliser.

5.2.1.3 Structure simplifiée du réseau en fonctionnement normal

La structure réduite est formée des seules connexions qui contiennent une ressource. Les autres connexions, celles qui ne contiennent pas de ressources sont regroupées et considérées comme des nœuds groupés. Dans notre cas, la structure réduite se compose de 12 connexions (cf. *Figure 5.3*).

En utilisant cette structure réduite, nous pouvons déterminer la loi de commande pour former une configuration du réseau. Cependant, pour évaluer l'état électrique, il faut naturellement utiliser le réseau complet de la *Figure 5.1*.

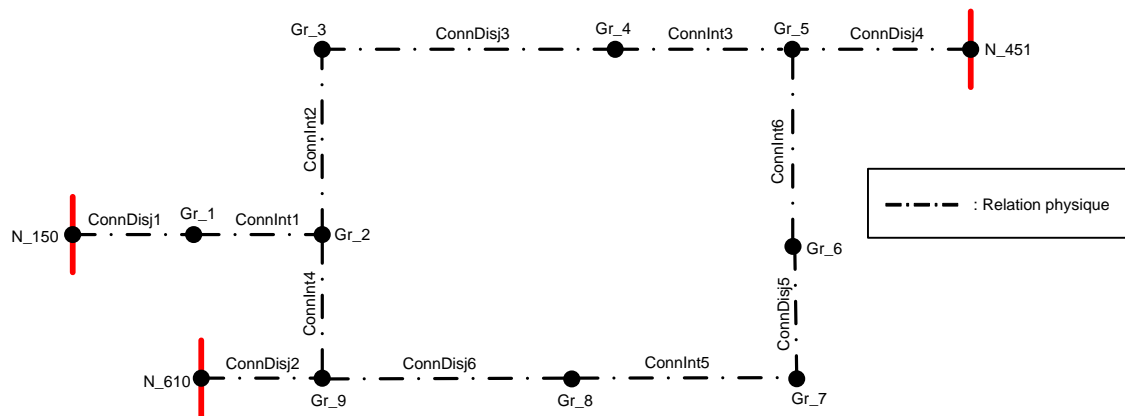


Figure 5.3 : structure réduite après la simplification du réseau complet

5.2.1.4 Etat du réseau en fonctionnement normal

En fonctionnement normal, le réseau est supposé être sous la configuration suivante (cf.

Figure 5.4) :

- les Disj2, Disj3 et Disj6 sont fermés,
- les Disj1, Disj4 et Disj5 sont ouverts,
- les Int1, Int2, Int3, Int4, Int5 et Int6 sont fermés,
- tous les nœuds dans le réseau sont alimentés.

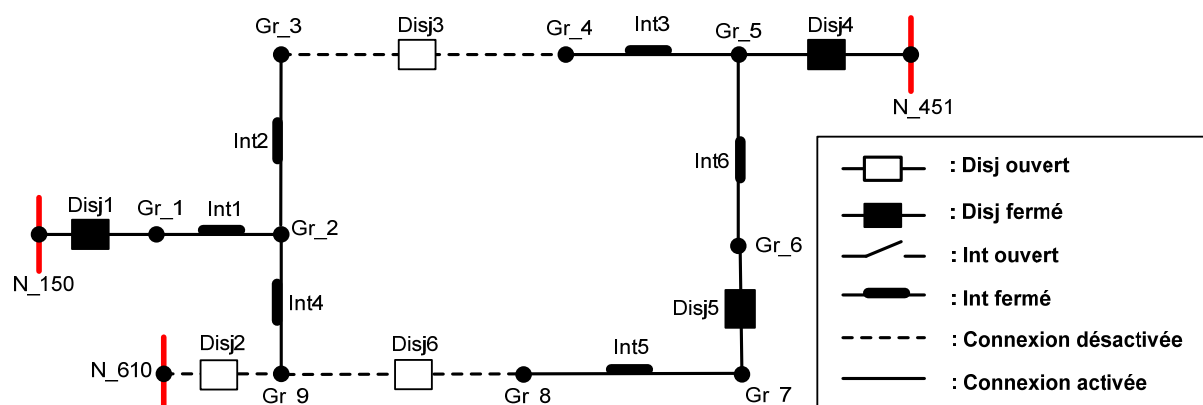


Figure 5.4 : état du réseau en fonctionnement normal

5.2.2 Réseau après le défaut

Dans le cadre de cette étude, nous allons considérer un défaut sur le nœud Gr_7 ce qui a conduit l'interrupteur Int5 et Disj5 à s'ouvrir. Il est désormais interdit de les manœuvrer (cf.

Figure 5.5).

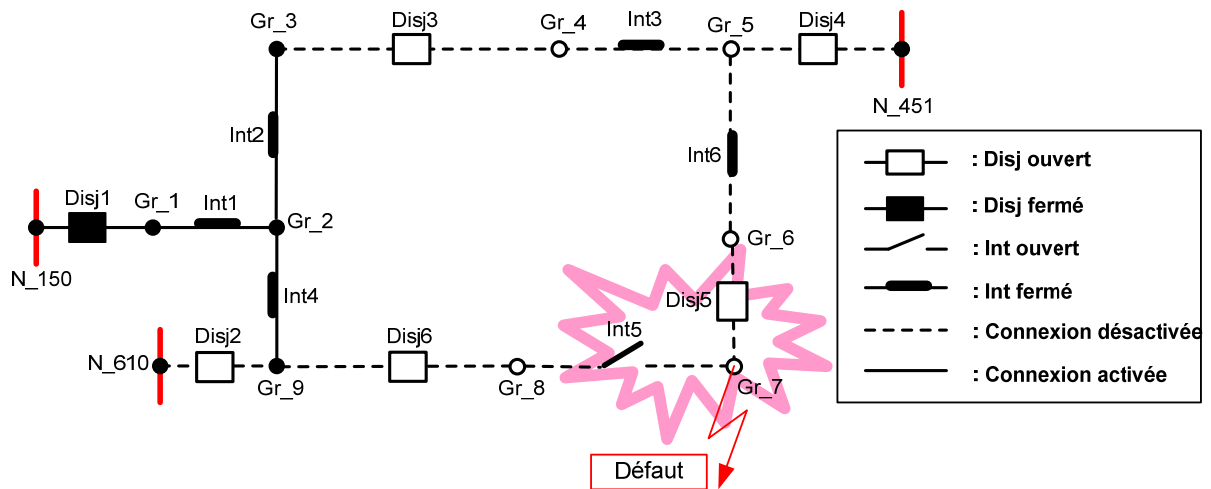


Figure 5.5 : état du réseau considéré après isolation de défaut au nœud N_13

Comme nous l’avons exposé au chapitre précédent, pour rechercher les configurations possibles (dans la phase de construction du graphe des opérations d’activation du réseau), nous partons de l’état hypothèse initial du réseau (cf. Tableau 5.2).

Tableau 5.2 : état hypothèse initial du réseau exemple

Connexions et leurs états		Ressources et leurs états		Nœuds et leurs états	
ConnDisj1	Inactive	Disj1	Fermé	N_150	Source
ConnDisj2	Inactive	Disj2	Fermé	N_451	Source
ConnDisj3	Inactive	Disj3	Fermé	N_610	Source
ConnDisj4	Inactive	Disj4	Fermé	Gr_1	Séparé
ConnDisj5	Inactive	Disj5	Ouvert	Gr_2	Séparé
ConnDisj6	Inactive	Disj6	Fermé	Gr_3	Séparé
ConnInt1	Inactive	Int1	Fermé	Gr_4	Séparé
ConnInt2	Inactive	Int2	Fermé	Gr_5	Séparé
ConnInt3	Inactive	Int3	Fermé	Gr_6	Séparé
ConnInt4	Inactive	Int4	Fermé	Gr_7	Séparé
ConnInt5	Inactive	Int5	Ouvert	Gr_8	Séparé
ConnInt6	Inactive	Int6	Fermé	Gr_9	Séparé

Dans le Tableau 5.2, les deux lignes surlignées (jaunes) indiquent les deux ressources ouvertes pour isoler la partie de défaut (Gr_7).

Sur la base de cet état hypothèse initial, nous pouvons créer le sommet hypothèse initial comme il suit (cf. Chapitre 4, section 4.4.1.1) :

$$\text{SommetHypothèseInitial} = \{\text{étatHypothèseInitial}, \text{objectif} = 0\}$$

5.3 Scénarii de reconfiguration

Dans l’objectif de réalimenter tous les clients sains du réseau après défaut, trois scénarii de reconfiguration peuvent être envisagés. Pour chacun de ces scénarii, un jeu de données est proposé en *annexe 5*.

Cas 1 (cf. *Figure 5.6*) : la méthode doit pouvoir trouver une séquence de manœuvres pour réalimenter tous les clients sains sous la contrainte de ne pas couper, même temporairement, l’alimentation des autres clients des parties saines sous tension. Ce scénario utilise le premier jeu de données. Nous proposons aussi sur le dessin la séquence de manœuvres que nous imaginons pour réaliser la reconfiguration du réseau.

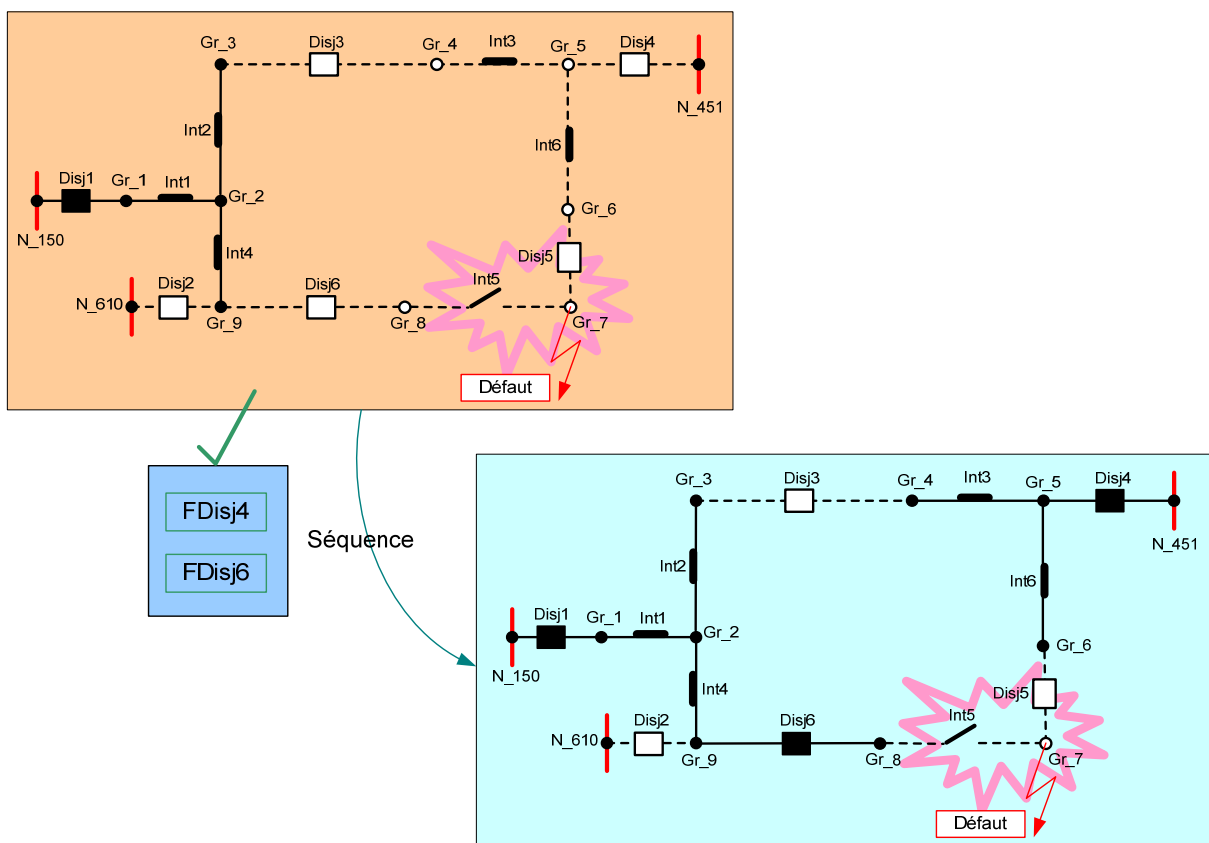


Figure 5.6 : solution sans coupure temporaire des clients sains sous tension

Cas 2 (cf. *Figure 5.7*) : la méthode doit déterminer une séquence de manœuvres pour réalimenter tous les clients avec l’autorisation de couper temporairement l’alimentation de

certaines clients dans les parties saines sous tension après le défaut afin de transférer des charges d'un départ à un autre dans le réseau (pour éviter les surcharges). Ce scénario utilise le deuxième jeu de données (cf. annexe 5).

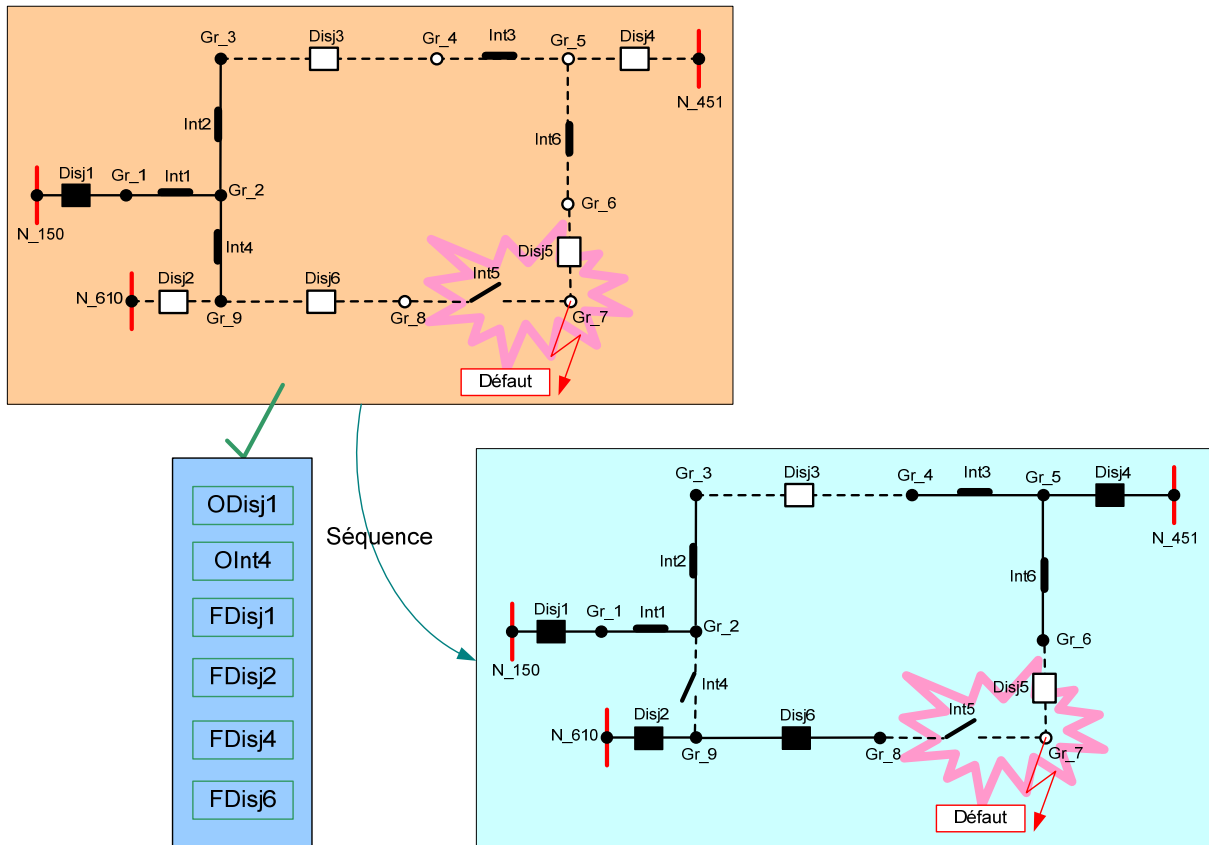


Figure 5.7 : solution avec coupure temporaire des clients sains sous tension

Cas 3 (cf. Figure 5.8) : la méthode ne peut pas trouver de solution pour réalimenter tous les clients sains. Toutes les configurations possibles du réseau contiennent des surcharges. La solution de notre algorithme dans ce cas-là est la proposition d'une configuration qui contient le minimum de connexions en surcharge. A partir d'une telle situation, l'opérateur devra alors prendre de nouvelles décisions afin de supprimer certaines charges à alimenter pour que l'algorithme puisse proposer une séquence avec ce nouveau jeu de charges à alimenter. Ce scénario s'appuiera sur le troisième jeu de données.

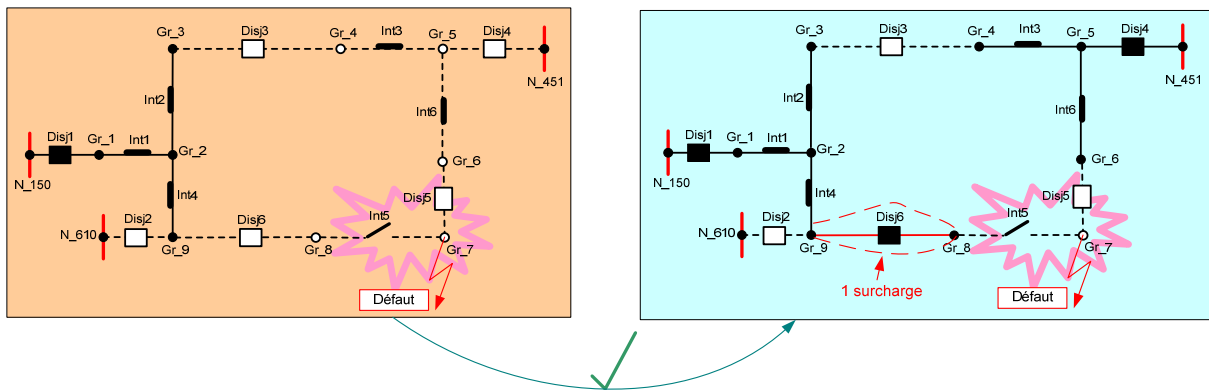


Figure 5.8 : proposition dans le cas de surcharges

5.4 Modélisation du réseau

D’après ce que nous avons présenté dans le Chapitre 3, nous pouvons modéliser le réseau exemple par des opérations de connexions et les modèles des nœuds (nœuds détaillés et nœuds groupés) du réseau. Le modèle résultant est utilisé pour le test de la méthode que nous présentons dans les sections suivantes.

5.4.1 Modélisation des connexions du réseau

Le réseau considéré est réduit à 12 connexions : 6 connexions de type « ConnIntX » et 6 connexions de type « ConnDisjX ». Une connexion de type ConnIntX est modélisée par 4 opérations. Une connexion de type ConnDisjX est modélisée par 5 opérations (cf. Chapitre 3, section 3.3.1). Ainsi, nous dénombrons au total 54 modèles d’opérations pour ces 12 connexions du réseau réduit. Ces modèles sont organisés en deux classes :

5.4.1.1 Modèles des opérations de préparation

Cette classe contient 24 opérations pour les 12 ressources du réseau. Nous montrons ici un exemple du modèle de l’opération « Fermer l’interrupteur 1 » (FInt1 - cf. Figure 5.9). Les autres modèles de ces opérations de cette classe sont présentés en détails dans l’annexe 2.

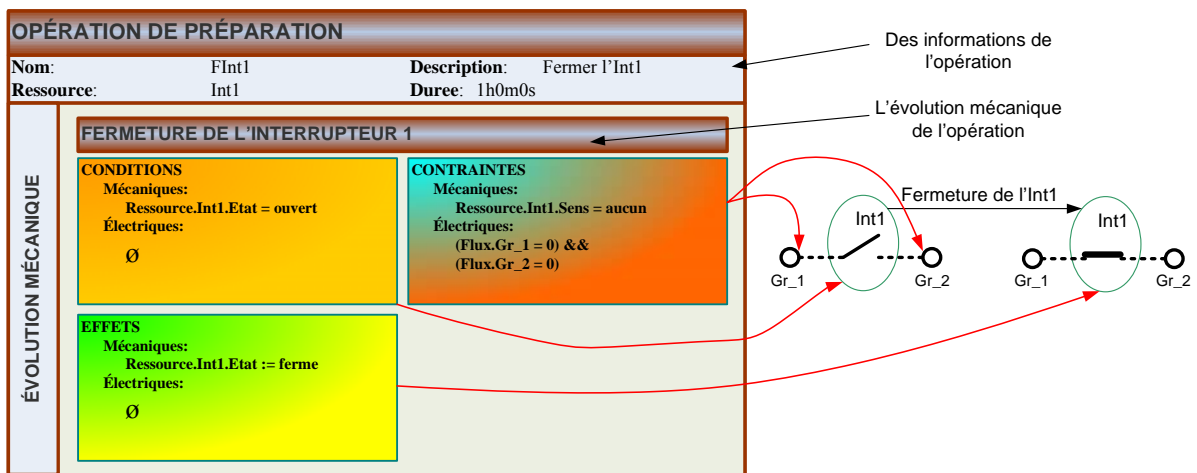


Figure 5.9 : modèle de l'opération de préparation « FInt1 »

Dans ce modèle présenté dans la *Figure 5.9*, des informations telles que le nom de l'opération « FInt1 », le nom de la ressource « Int1 », la description de l'opération « fermer l'Int1 » ou encore la durée d'exécution « 1h0m0s » sont décrits. Nous noterons ici que cette durée d'exécution de l'opération « FInt1 » de 1h00 (dispositif manuel) intègre le temps de déplacement de l'opérateur humain vers ce dispositif.

Une seule évolution de la ressource « Fermeture de l'interrupteur 1 » est à noter dans cette opération. Pour que cette opération soit fermée, les conditions et les contraintes suivantes doivent être garanties :

- état mécanique de l'Int1 égal ouvert (Int1.Etat = ouvert).
- connexion désactivée (Sens = aucun)
- il n'existe pas de tension aux bornes de cette connexion (Gr_1 = 0, Gr_2 = 0,).

L'effet de cette opération après son exécution est le passage de l'état de l'Int1 d'ouvert à fermé (Int1.Etat := fermé).

5.4.1.2 Modèles des opérations induites

Cette classe contient les 30 opérations induites. Nous montrons ici un exemple du modèle de l'opération « Séparer le nœud de source secondaire de la ConnDisj1 » (SepConnDisj1, cf. *Figure 5.10*). Les autres modèles de cette classe sont présentés dans l'annexe 2.

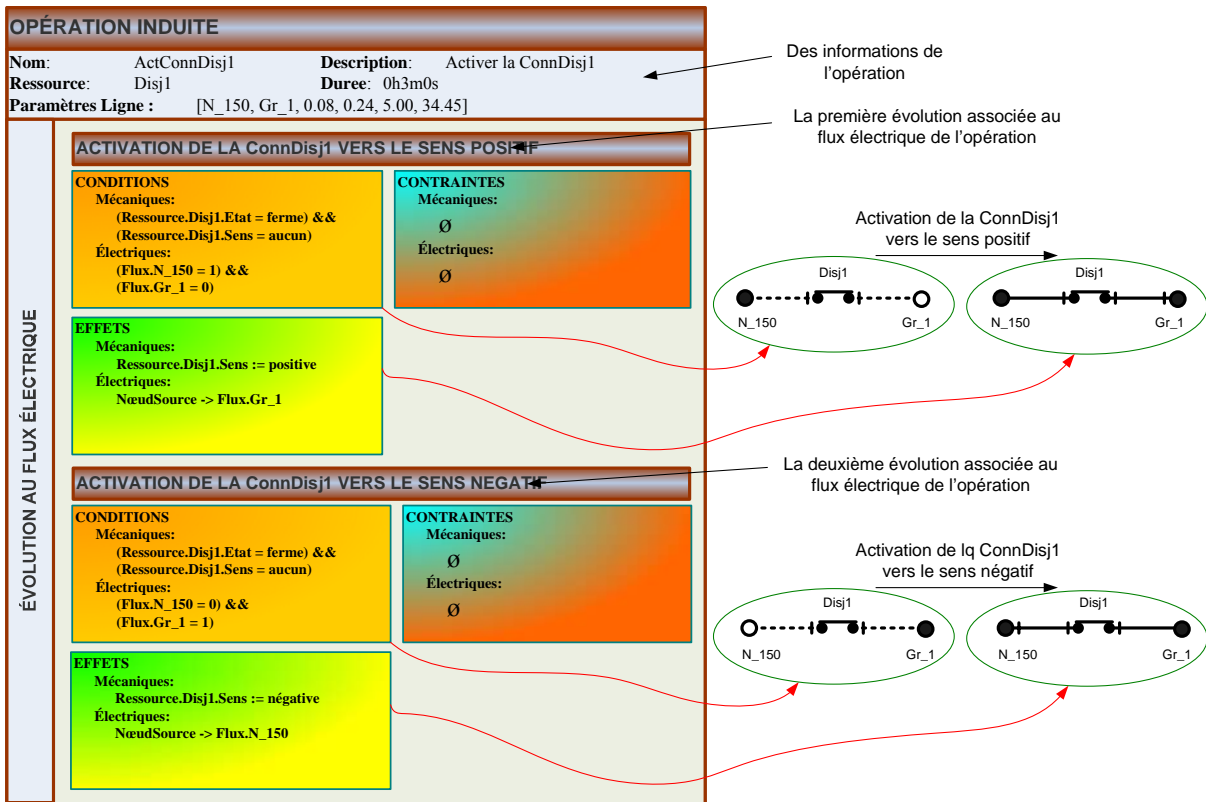


Figure 5.10 : modèle de l'opération induite « ActConnDisj1 »

Dans l'opération de la Figure 5.10, la première partie présente des informations telles que : le nom de l'opération « ActConnDisj1 », le nom de la ressource « Disj1 », la description de l'opération « Activer la ConnDisj1 », la durée d'exécution de l'opération « 0h3m0s » et les paramètres de la ligne de la connexion « ConnDisj1 ».

Deux évolutions associées au flux électrique dans cette opération sont présentées. Les deux évolutions ne peuvent pas se produire simultanément.

La première évolution est « Activation de la ConnDisj1 vers la direction positive ». Cette évolution se produit si ses conditions et ses contraintes sont garanties. Elles sont :

- l'état du Disj1 est fermé ; la ConnDisj1 est désactivée (Sens = aucun).
- le nœud de départ est le nœud source ($N_{150} = 1$) ; le nœud d'arrivée est le nœud séparé ($Gr_1 = 0$).

Le résultat obtenu après son exécution est tel que :

- le nœud d'arrivée de cette connexion devient le nœud source ($Gr_1 := 1$) et la connexion est activée dans la direction positive (Sens := positive).

Le deuxième comportement « Activation de la ConnDisj1 vers la direction négative » est renseigné en utilisant le même principe.

Nous noterons la présence de paramètres de la ligne correspondant à la connexion ConnDisj1. Ces informations seront utilisées pour le calcul de la **RDC**.

5.4.2 Modélisation des nœuds du réseau

Dans notre réseau réel exemple, nous disposons de 129 nœuds détaillés (3 nœuds sources, 126 nœuds charges) et de 9 nœuds groupés. Pour chacun de ces nœuds, un modèle doit être développé tel que celui présenté dans la *Figure 5.11*. Le modèle des autres nœuds du réseau peut être trouvé dans l'annexe 3.

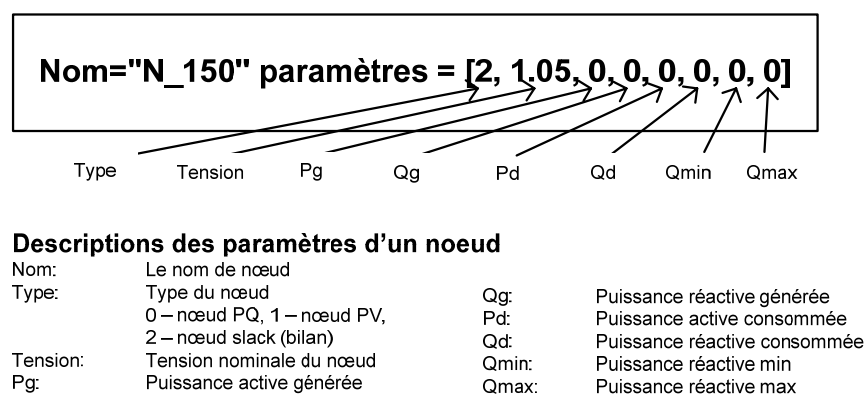


Figure 5.11 : modèle du nœud source « N_150 »

5.5 Environnement de développement et de test

Dans le cadre de ces travaux de thèse, afin de tester la méthode, nous avons utilisé l'environnement de développement Eclipse et le langage JAVA pour développer le code informatique correspondant. Ce choix provient de deux raisons : Java est un langage performant, orienté objectif, convenant bien au traitement de problèmes complexes (cf. chapitre I de [SUN-2008]) ; les logiciels écrits sous Java sont très facilement portables sur plusieurs systèmes d'exploitation tels que UNIX, Microsoft Windows, Mac OS ou GNU/Linux avec peu ou pas de modifications [SUN-2008] ; l'environnement de développement est gratuit avec des modules disponibles et nombreux sur Internet.

Le logiciel développé fonctionne sur un ordinateur du laboratoire G2Elab dont la configuration est la suivante : CPU Intel 2 Cores, 2.13 GHz ; 3Go de RAM ; 2Go mémoire pour la machine virtuelle JVM sous le système d'exploitation WindowXP.

5.6 Tests

Les sections précédentes ont présenté l'état du réseau après le défaut : les parties saines (sous ou/et hors tension) et les parties en défaut isolées, le modèle du réseau et les autres données d'entrée pour la méthode de reconfiguration. Dans la suite de ce chapitre, nous allons appliquer la méthode de reconfiguration d'un réseau de distribution au réseau considéré en illustrant différents cas de figure impliquant des modifications plus ou moins profondes de la structure du réseau (pouvant même conduire à des reconfigurations dans les départs sains adjacents).

5.6.1 Recherche des configurations possibles du réseau après un défaut (étape 1)

5.6.1.1 Graphe des opérations d'activation du réseau

Sur la base des opérations d'activation du modèle et de l'état initial hypothèse du réseau exemple, en appliquant la méthode de construction du graphe, nous pouvons construire le graphe des opérations d'activation qui va être utilisé pour chercher les configurations possibles du réseau après le défaut.

Notre logiciel permet une sortie soit sous la forme d'une image soit sous la forme textuelle. Compte tenu de la taille du graphe généré, nous n'en montrons ici qu'un extrait (*cf. Figure 5.12*).

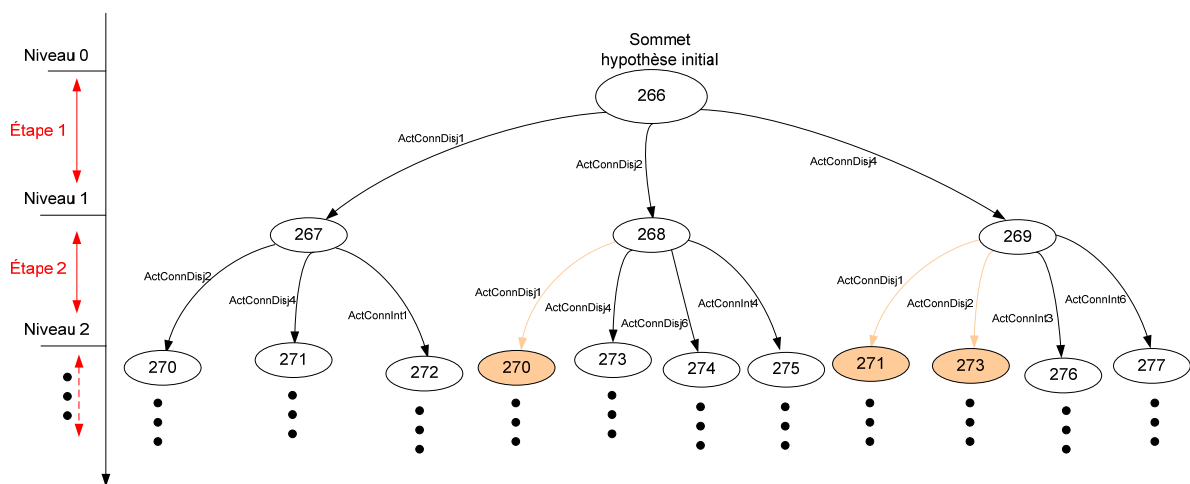


Figure 5.12 : extrait du graphe des opérations d'activation du réseau exemple

Le graphe global présente les caractéristiques suivantes (*cf. Tableau 5.3*) :

Tableau 5.3 : paramètres principaux du graphe trouvé

Nombre de niveaux	Nombre de sommets	Nombre d'arcs	Temps de construction
9	258	275	80 secs

5.6.1.2 Configurations possibles du réseau après le défaut

Sur la base de ce graphe, l'algorithme de recherche des configurations possibles du réseau est lancé. Tous les chemins qui partent du sommet hypothèse initial aux sommets objectifs sont recherchés. Une sortie logicielle du processus de recherche est donnée dans la *Figure 5.13*.

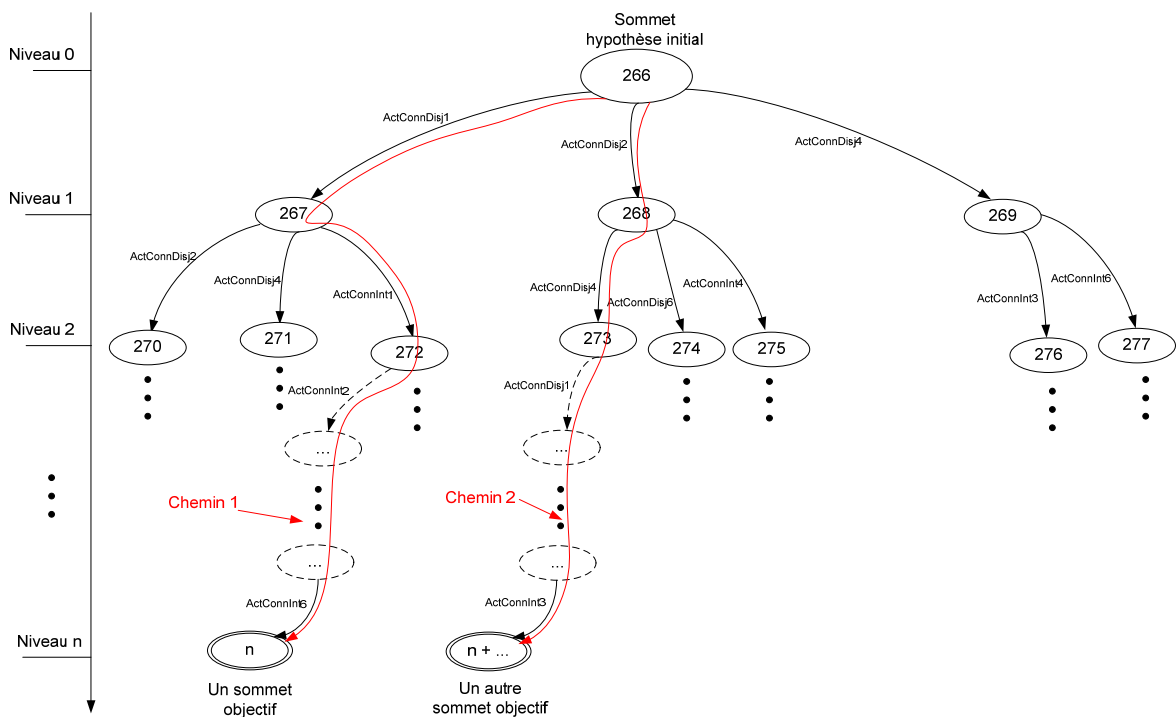


Figure 5.13 : configurations possibles du graphe

Le *Tableau 5.4* représente le résultat du processus de recherche des configurations possibles ainsi que le temps total du processus de recherche et le nombre des configurations possibles. Pour des raisons de concision, nous n'avons pas listé ici tous les résultats. Cependant, le lecteur pourra les trouver dans leur intégralité en annexe 4. Dans ce tableau, nous utilisons également quelques acronymes :

- ACD-X : opération « ActConnDisjX » (par exemple ACD1 – ActConnDisj1)
- ACI-X : opération « ActConnIntX » (par exemple ACI1 – ActConnInt1)

Tableau 5.4 : configurations possibles

N° de la Config	Connexions actives dans la configuration avec le numéro à la gauche
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6
⋮	⋮
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6
Temps total de recherche des configs possibles	Nombre total de configs possibles
5 secs	46

5.6.2 Configurations exploitables du réseau après le défaut (étape 2)

Les configurations réduites possibles (*cf. Tableau 5.4*) représentent des possibilités de former une configuration du réseau complet après le défaut. Ces configurations complètes n'ont pas encore été examinées au crible des contraintes de fonctionnement des matériels ainsi que de la qualité de fourniture de l'électricité. Ces configurations sont alors testées (en utilisant la méthode de calcul de répartition de charges pour le réseau complet correspondant aux configurations réduites possibles) afin d'éliminer celles qui ne satisfont pas les contraintes de fonctionnement et de qualité de fourniture d'électricité.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour que nous puissions montrer trois scénarii de reconfiguration du réseau, nous utilisons ici trois différents jeux de données du réseau (*cf. Annexe 5*). Chaque jeu de données nous donne un résultat différent après le calcul de répartition de charges. Les résultats correspondant aux trois jeux de données trouvés après cette étape sont présentés partiellement dans les *Tableau 5.5*, *Tableau 5.6* et *Tableau 5.7*. Les configurations possibles qui ne satisfont pas les contraintes de fonctionnement et la qualité électrique sont surlignées (en gris foncé). Les autres sont marquées en gris clair (elles sont appelées « les configurations exploitables »).

Tableau 5.5 : résultats des configurations exploitables en utilisant le premier jeu de données

N° de la config	Configs exploitables (lignes vert clair)		
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6		
⋮	⋮		
i	Existence de surcharges dans cette config - éliminée		
⋮	⋮		
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6		
Temps pour calculer la RDC des configs	Nombre de configs exploitables	Nombre de configs surchargées	
15 secs	22	24	

Tableau 5.6 : résultats des configurations exploitables en utilisant le deuxième jeu de données

N° de la config	Configs exploitables (lignes vert clair)		
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6		
4	ACD1-ACI1-ACI4-ACD6-ACD4-ACI6-ACI3-ACD3		
⋮	⋮		
i	Existence de surcharges dans cette config - éliminée		
⋮	⋮		
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6		
Temps pour calculer la RDC des configs	Nombre de configs exploitables	Nombre de configs surchargées	
15 secs	14	32	

Tableau 5.7 : résultats des configurations exploitables en utilisant le troisième jeu de données

N° de la config	Configs exploitables (lignes vert clair)		
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6		
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6		
4	ACD1-ACI1-ACI4-ACD6-ACD4-ACI6-ACI3-ACD3		
⋮	⋮		
i	Existence de surcharges dans cette config - éliminée		
⋮	⋮		
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6		
Temps pour calculer la RDC des configs	Nombre de configs exploitables	Nombre de configs surchargées	
15 secs	0	46	

5.6.3 Recherche de la séquence des manœuvres sans parallélisme

Ici, nous utilisons trois résultats de trois jeux de données correspondant aux trois scénarii de reconfiguration : le premier scénario utilise le résultat du premier jeu de données (cf. *Tableau 5.5*), le deuxième scénario utilise le résultat du deuxième jeu de données (cf. *Tableau 5.6*), le troisième scénario utilise le résultat du troisième jeu de données (cf. *Tableau 5.7*).

5.6.3.1 Scénario 1 : proposition d’une solution sans coupure temporaire des clients sains sous tension

Pour éviter de couper temporairement l’alimentation des clients sains sous tension, l’exploitant du réseau doit interdire de manœuvrer les disjoncteurs en charge. Dans cet exemple, le Disj1 ne peut pas être ouvert en fonctionnement : nous supprimons l’opération d’ouverture du Disj1 dans la liste des opérations de préparation.

Dans le processus de construction de la séquence des manœuvres à opérer pour reconfigurer le réseau, si nous trouvons qu’une ressource doit être manœuvrée (via des opérations de préparation de cette ressource) mais que cette ressource est bloquée, nous arrêtons le processus de construction de cette séquence et la configuration correspondante est éliminée (marquée en gris le plus clair dans le *Tableau 5.8*).

Après la construction des séquences de manœuvres pour les configurations exploitables, le résultat obtenu est présenté dans le *Tableau 5.8*. Dans ce tableau, nous pouvons trouver les informations importantes comme le nombre total des séquences sans coupure temporaire, le nombre des séquences avec des coupures temporaires ou le temps total pour construire toutes les solutions.

Dans ce tableau, nous utilisons des légendes suivantes :

- FD-X : opération de préparation « Fermer le disjoncteur X » - (par exemple FD1)
- FI-X : opération de préparation « Fermer l'interrupteur X » - (par exemple FI4)
- OD-X : opération de préparation « Ouvrir le disjoncteur X » - (par exemple OD1)
- OI-X : opération de préparation « Ouvrir l'interrupteur X » - (par exemple OI4)

Tableau 5.8 : solutions sans coupure temporaire des clients sains sous tension

N° de la solution	Configs exploitables (lignes vertes claires)	Séquences des manœuvres	Durée de la séquence
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	FD6-FD4	0h6m0s
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	OD1 - bloquée	-
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6	OI3-FD3-FD6-FD4	1h9m0s
⋮	⋮	⋮	
i	Config surchargée - éliminée	Ne pas construire la séquence	
⋮	⋮	⋮	
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6	Ne pas construire la séquence	
	Temps total pour trouver la solution	Nombre de séquences sans coupure temporaire	Nombre de séquences avec coupure temporaire
	45 secs	5	17

Pour choisir la séquence des manœuvres pour reconfigurer le réseau, nous choisissons la séquence avec le minimum de temps d'exécution des opérations (Durée des manœuvres). Ainsi, d'après cet objectif, la solution choisie et proposée est la solution numéro 1 dans le *Tableau 5.8* (parce que les autres solutions ont un temps de manœuvres plus long que la solution numéro 1). La séquence des manœuvres est présentée dans la *Figure 5.14*.

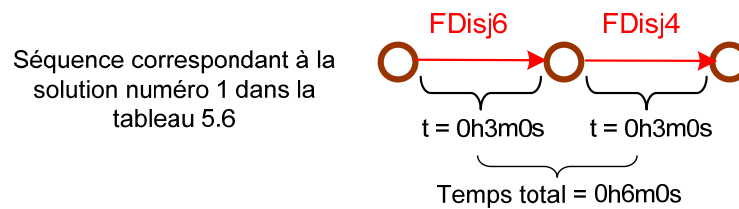


Figure 5.14 : meilleure séquence des manœuvres par rapport au temps total d'exécution des opérations

5.6.3.2 Scénario 2 : proposition d'une solution de réalimentation avec coupure temporaire des clients sains sous tension

Le deuxième cas considéré est celui où il n'est pas possible de trouver de solution sans coupure temporaire des clients sains sous tension. A ce moment-là, l'exploitant du réseau doit peser le pour et le contre associé à l'ouverture de quelques disjoncteurs en charge. Par exemple, nous permettons de manœuvrer le Disj1 et nous relançons alors l'algorithme.

Avec ces permissions, nous pouvons transférer des charges d'un départ à un autre départ du réseau pour éviter les surcharges (comme illustré à la Figure 5.7).

Tableau 5.9 : solutions avec coupure temporaire des clients sains sous tension

N° de la solution	Configs exploitables (lignes vertes claires)	La séquence des manœuvres	Temps des manœuvres
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	Ne pas construire la séquence	
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	OD1-OI4-FD2-FD4-FD6-FD1	1h0m1s
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6	Ne pas construire la séquence	
4	ACD1-ACI1-ACI4-ACD6-ACD4-ACI6-ACI3-ACD3	OD1-OI2-FD6-FD3-FD4-FD1	0h18m0s
⋮	⋮	⋮	
i	Config surchargée - éliminée	Ne pas construire la séquence	
⋮	⋮	⋮	
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6	Ne pas construire la séquence	
Temps total pour trouver la solution		Nombre des séquences sans coupure temporaire	Nombre des séquences avec coupure temporaire
45 secs		0	14

Focalisons-nous sur cet exemple (cf. Tableau 5.9). Dans ce scénario (en utilisant le deuxième jeu des données), nous ne pouvons pas trouver de solution sans coupure temporaire

(parce que toutes les configurations correspondant aux séquences qui ne contiennent pas la manœuvre de la ressource Disj1 sont surchargées). Aussi, l'exploitant doit permettre de manœuvrer le Disj1. Avec cette permission, nous pouvons construire plusieurs séquences de reconfiguration (par exemple solution 2, 4, etc. dans le *Tableau 5.9*).

La solution 4 est la solution qui est la plus courte du point de vue du temps de manœuvre dans des séquences. Elle est donc choisie pour reconfigurer le réseau. La séquence des manœuvres de cette solution est présentée dans la *Figure 5.15*.

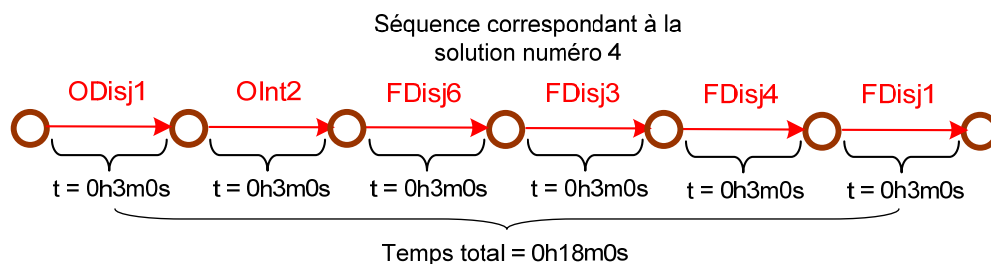


Figure 5.15 : meilleure séquence des manœuvres par rapport au temps total d'exécution des opérations

5.6.3.3 Scénario 3 : proposition de la configuration avec le minimum de surcharges

Dans ce cas, avec le troisième jeu des données, il n'existe aucune configuration sans surcharge. Aussi, nous ne pouvons pas construire une séquence pour réalimenter tous les clients sains. Dans ce cas, notre algorithme propose à l'exploitant la configuration qui offre le minimum de surcharges ainsi que les connexions qui sont surchargées sans fournir la séquence de manœuvres associée.

Dans le *Tableau 5.10*, nous pouvons constater que la configuration 1 offre le nombre minimal de connexions surchargées (il n'y a en effet qu'une seule). Elle est donc proposée par notre logiciel.

A partir de ce résultat, l'exploitant doit vérifier :

- s'il peut supprimer certaines charges dans le réseau, et ainsi, relancer l'algorithme pour trouver une solution sans surcharges correspondant à la nouvelle fonction objectif ou,
- s'il peut accepter la configuration telle quelle. Dans ce cas, notre logiciel ne propose pas la séquence des manœuvres à reconfigurer le réseau.

Tableau 5.10 : résultats après l'examen des configurations possibles

N° de la config	Configs possibles	Connexions surchargées	Nombre des surcharges
1	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	ConnInt4,	1
2	ACD1-ACI1-ACI2-ACD2-ACD6-ACD4-ACI3-ACI6	o o o	12
3	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD6-ACD3-ACD4-ACI6	o o o	7
4	ACD1-ACI1-ACI4-ACD6-ACD4-ACI6-ACI3-ACD3	o o o	24
⋮	⋮	⋮	
i	Existence des surcharges dans cette config	o o o	
⋮	⋮		
46	ACD1-ACI1-ACI2-ACI4-ACD3-ACD6-ACI3-ACI6	o o o	40
Temps pour calculer la RDC des configurations		Nombre des configs exploitables	Nombre des configs surchargées
15 secs		0	46

5.6.4 Insertion des parallélismes (étape 4)

Cette étape n'est réalisée que pour les deux premiers scénarii. Avec le troisième cas, comme nous ne proposons pas de séquence d'opérations de préparation, cette étape ne peut pas être appliquée.

Après avoir trouvé la séquence des opérations de préparation, nous allons rechercher et insérer des opérations qui peuvent être exécutées en parallèle. Le résultat est présenté sous la forme d'un réseau Petri (cf. chapitre 8, section 6 de la thèse de S. Henry [HEN-2005]). Dans les figures représentant le résultat, nous utilisons les légendes suivantes :

- un rectangle représente une transition d'opération (par exemple la transition Fermer le Disj6),
- un ovale simple représente une place du réseau (par exemple la place P2),
- un ovale avec un rectangle à l'intérieur représente une place divergente (P1 par exemple).

5.6.4.1 Recherche et insertion des opérations parallèles dans la séquence du scénario 1

Avec le premier scénario, la solution sans la coupure temporaire des clients sains sous tension, la séquence des manœuvres proposée comporte deux opérations (cf. Figure 5.14). En utilisant la méthode de recherche des opérations parallélisables (cf. Chapitre 4, section 4.7),

nous trouvons que ces deux opérations peuvent être manœuvrées parallèlement, aussi, le résultat trouvé après cette étape correspond à la séquence présentée dans la *Figure 5.16*.

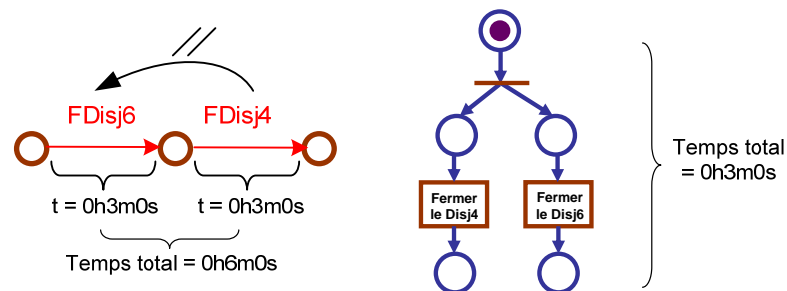


Figure 5.16 : séquence des manœuvres correspondant au scénario 1 après l'insertion des parallélismes

Nous pouvons nous apercevoir que le temps total pour exécuter la séquence des manœuvres après l'insertion des parallélismes dans la *Figure 5.16* a été réduit de moitié par rapport au temps d'exécution de la séquence avant l'insertion des parallélismes.

5.6.4.2 Recherche et insertion des opérations parallèles dans la séquence du scénario 2

Avec le deuxième scénario, la séquence des opérations pour reconfigurer le réseau contient 6 opérations (*cf. Figure 5.15*). En utilisant la méthode de recherche des opérations parallèles, nous trouvons que :

- l'opération ODisj1 ne peut pas être manœuvrée parallèlement avec l'opération OInt2,
- les FDisj4, FDisj1 doivent être exécutée après l'exécution de l'opération OInt2,
- les FDisj6 et FDisj3 peuvent être manœuvrées parallèlement avec l'opération ODisj1 et OInt2,
- les FDisj4 et FDisj1 peuvent être manœuvrées parallèlement.

Le résultat sous forme d'un graphe est montré dans la *Figure 5.17*.

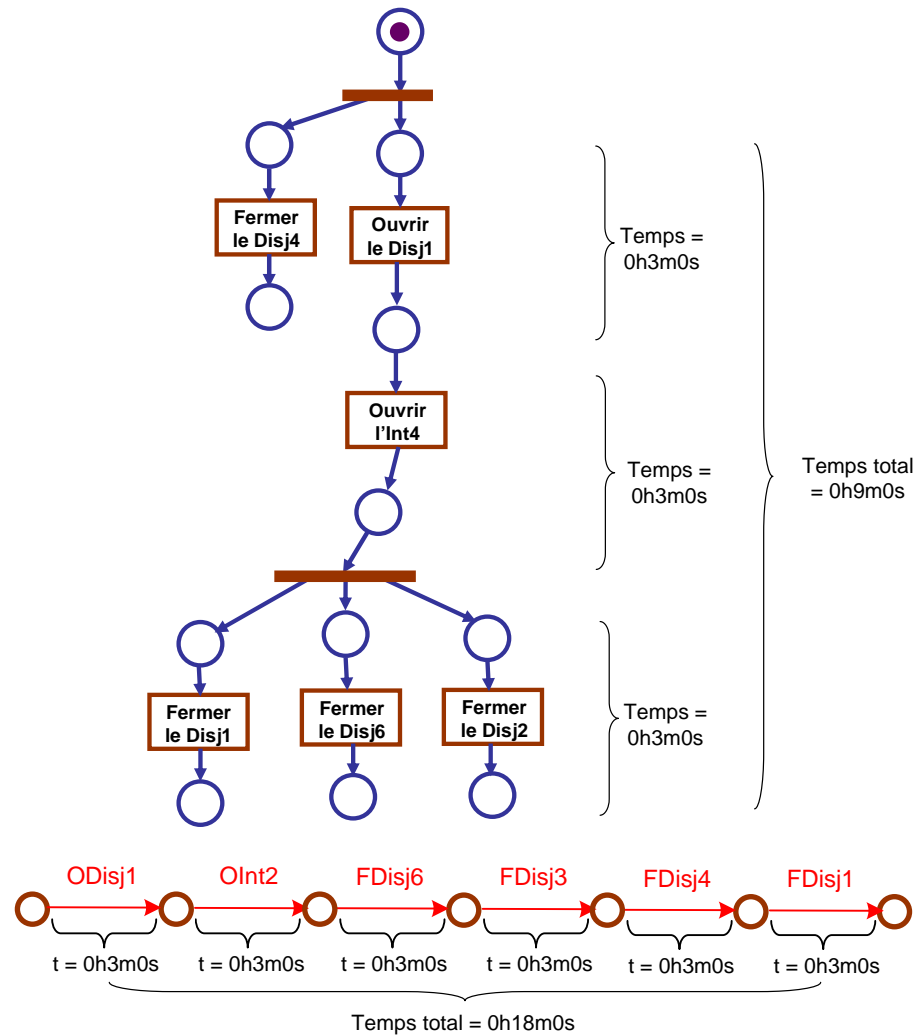


Figure 5.17 : séquence des manœuvres correspondant au scénario 2 après l'insertion des parallélismes

Le temps d'exécution de la séquence après une insertion des parallélismes a été réduit par rapport au temps d'exécution de la séquence sans l'insertion des parallélismes (cf. Figure 5.17).

5.7 Conclusion

L'exemple que nous venons de traiter dans cette partie est basé sur la génération automatique de séquences de manœuvres permettant de configurer la structure du réseau électrique 129 nœuds [KER-2004] en présence de défauts isolés. Il s'est notamment agi de démontrer à la fois la pertinence du formalisme proposé pour appréhender la modélisation de systèmes contrôlés, et les capacités de l'approche en terme de reconfiguration. Dans ce dernier objectif, trois scénarii propices à la reconfiguration ont été proposés. Le premier nous a permis de générer une solution sans coupure temporaire des clients sains sous tension, le

deuxième a proposé une solution avec coupure temporaire des clients sains sous tension, le troisième nous a amenés à proposer une solution en présence de surcharges.

Du point de vue modélisation, nous avons pu constater tout l'intérêt du cadre rédactionnel très structuré, intuitif et proche de la vision que peut avoir un ingénieur des ouvrages considérés. Bien que la technique de modélisation et la méthode proposées semblent satisfaire les attentes, il n'en demeure pas moins qu'une confrontation directe en situation réelle est nécessaire pour permettre non seulement de déterminer l'adéquation de la méthode de modélisation, mais également de critiquer la démarche globale proposée.

Du point de vue de l'algorithme de conception dynamique de séquences de manœuvres, l'exemple nous a conduit pas à pas à suivre la démarche jusqu'à l'obtention finale des séquences de manœuvres. L'exemple a montré les capacités de l'algorithme à faire face à des problèmes liés à la perte d'ouvrages et donc de services de la partie opérative. L'algorithme peut dans ce contexte apporter de véritables solutions, notamment sur le plan décisionnel. En effet, il permet d'évaluer si une continuité de service peut être encore envisagée.

Enfin, du point de vue de la mise en œuvre, l'exemple nous a permis, dans un premier temps, de valider en partie l'atelier logiciel que nous avons développé sur la base de celui proposé dans la thèse de M. Sébastien Henry. Disposer d'un tel outil de synthèse nous a permis d'étudier sur la base d'un réseau réel la capacité de l'algorithme à faire face à la complexité inhérente aux réseaux électriques. Les résultats de cette étude semblent prometteurs. Ils nous encouragent donc à les compléter d'une part par d'autres expérimentations, et d'autre part par une étude de complexité théorique poussée. Enfin, l'outil développé en Java, nous permet à ce jour d'envisager, sereinement et à moyen terme, son implantation sur différentes cibles (PC, PLC, autre...).

Conclusion générale et perspectives

Les travaux que nous avons présentés dans ce document traitent de la reconfiguration dynamique des réseaux de distribution électrique. Ils font suite à ceux déjà réalisés dans Henry (2005) dans le domaine des systèmes de production manufacturière au sein du Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble (G-SCOP) et de ceux de B. Enacheanu (2007) dans le domaine des réseaux HTA au sein du G2ELab.

La contribution principale de nos travaux a porté ainsi sur l'extension et le développement d'une méthode générique dédiée à la reconfiguration des réseaux de distribution HTA après isolation d'un défaut de manière à ce que tous les clients hors tension situés dans les parties saines du réseau soient réalimentés le plus rapidement possible. Cette méthode s'appuie sur deux piliers majeurs.

Premièrement, elle met à disposition de l'expert réseau un nouveau formalisme de modélisation simple à manipuler et robuste aux variations structurelles de l'infrastructure du réseau électrique que ce soit dans le cas d'une restructuration topologique du réseau ou la perte partielle de services suite à défaut. De prime abord déroutant lorsque l'on traite de la modélisation d'une partie opérative à consonance plutôt continue (les réseaux électriques), l'outil de modélisation proposé, issu à l'origine du domaine de la planification automatique en robotique, permet d'abstraire la réalité uniquement aux besoins de la reconfiguration, plutôt discrète (séquence de manœuvres ou d'ordres envoyés aux organes de coupure). Ces besoins s'expriment en fonction de l'utilisation qui en sera faite à terme, à savoir la commande des ouvrages (interrupteurs, disjoncteurs, ...) et leurs effets sur le flux électrique. Bien entendu, des paramètres intrinsèques à la nature continue du réseau électrique ont dû être intégrés dans la modélisation afin de prendre en compte le caractère multidirectionnel et à déplacement instantané du flux électrique. En effet, contrairement à un système de production

manufacturier dans lequel, pour chaque décision prise et appliquée, le flux de matière est dirigé de manière monodirectionnelle (amont/aval), avec un déplacement relativement lent et des conséquences sur les ouvrages environnant prévisibles et modélisables, dans un système électrique, à toute décision de fermeture ou d'ouverture d'un ouvrage, le flux électrique se propage dans tous les sens possibles et peut avoir des conséquences (reports de charges par exemple) non directement modélisables. Une phase de calcul est en effet nécessaire ; il s'agit d'un calcul de répartition de charges. Ce dernier permet ainsi de satisfaire au fonctionnement de la commande qui, rappelons-le, stipule qu'il s'agit « d'imposer au système commandé un comportement particulier pour obtenir le résultat correspondant au besoin de l'utilisateur. Il s'agit donc d'amener la partie opérative vers un état stable particulier, en respectant à tout instant un certain nombre de contraintes physiques » telles qu'ici éviter les surcharges par exemple.

Deuxièmement, elle propose un algorithme capable d'exploiter le modèle proposé afin d'en calculer dans un premier temps un graphe des configurations exploitables, vérifiant donc au moins les contraintes électriques, et, dans un deuxième temps, de générer les séquences des manœuvres correspondant aux configurations exploitables trouvées, sélectionner la plus courte séquence sur le plan temporel. Afin de satisfaire aux exigences de réactivité face à un défaut, la méthode que nous avons proposée a volontairement rejeté le critère d'optimalité globale de la solution générée au profit du critère de réactivité. Pour cette raison, l'algorithme de calcul de reconfiguration dynamique a été décomposé en quatre étapes. La première vise à rechercher à partir d'un état courant du réseau et d'un objectif de réalimentation de tous les clients sains du réseau l'ensemble des configurations possibles. La méthode de Dijkstra est utilisée à cette fin. La deuxième étape consiste à « faire le tri » parmi toutes les configurations générées entre celles respectant les contraintes électriques du réseau et les autres. Pour cela, un calcul classique de répartition des charges est appliqué pour chacune des configurations générées à l'étape 1. A la suite de cette étape, nous disposons de l'ensemble des reconfigurations exploitables suite au défaut. La troisième étape consiste alors à construire, pour chaque configuration exploitable, une séquence des opérations de préparation. Cette séquence consiste à proposer à l'exploitant du réseau les manœuvres à exécuter ainsi que leur ordre pour amener le réseau de l'état stable après défaut au nouvel état stable correspondant à l'une des nouvelles configurations exploitables. Parmi ces séquences exploitables, celle qui minimise le critère de temps de manœuvre est ensuite sélectionnée. La dernière étape proposée consiste à optimiser encore la séquence de manœuvres en mettant en parallèle le plus d'opérations de cette séquence. A l'issue de cette étape, la meilleure séquence de

manœuvres satisfaisant non seulement au critère de réactivité (temps de calcul après l'isolation du défaut pour trouver la séquence) mais également de réalisme (satisfaction des contraintes physiques et du besoin de réalimentation de tous les clients) est générée.

Afin de valider la justesse de l'approche proposée, nous avons eu à cœur de l'appliquer à un système électrique réaliste tel que le réseau « IEEE test feeder 123 nodes ». Les résultats obtenus sont très encourageants pour nous permettre d'envisager aujourd'hui d'étendre la validation à des cas plus concrets encore.

Au terme de ces travaux, plusieurs axes de recherche se dégagent pour envisager, du point de vue des perspectives, de prolonger l'étude menée.

A très court terme, la finalisation de l'atelier logiciel proposé à ce jour devra être menée afin de valider d'une part l'approche sur de nombreux autres cas d'études, mais également de développer un environnement graphique de saisie des modèles simple évitant par exemple d'interagir directement avec des modèles d'opération. Une phase de « dessin » du réseau électrique sous une forme réaliste, intégrant ensuite un traducteur automatique en modèles d'opérations pourrait être une voie intéressante à développer.

A court terme, deux axes doivent au moins être explorés. Dans un premier temps, une étude des propriétés structurelles du modèle proposé doit être réalisée afin de fournir à l'exploitant de la méthode un cadre de validation du modèle saisi. En effet, rien ne permet à ce jour de garantir que l'ensemble des contraintes et conditions saisies sont valides et n'induisent pas par exemple des blocages mortels dans le modèle. Dans un deuxième temps, une étude théorique stricte de la complexité de l'algorithme proposé devra être menée. Cela permettra par exemple de caractériser précisément ses aptitudes à calculer des solutions en fonction par exemple du nombre d'ouvrages du réseau. De tels résultats permettraient de fournir des données essentielles aux exploitants du réseau, ne serait-ce que pour décider quoi faire si par exemple le temps de génération de la solution était trop long.

A moyen terme, l'approche proposée devra être étendue dans un premier temps aux aspects multi-critères de manière à garantir davantage de performances et affiner ainsi les prises de décisions. En effet, actuellement, certaines solutions générées peuvent contenir des surcharges, mais il ne nous est pas encore possible de préciser les limites de surcharges acceptables ni les durées permises. D'autres critères devront être également pris en compte comme par exemple celui des pertes Joule.

Dans un deuxième temps, des travaux permettant de connecter les résultats des fonctions d'isolation de défauts avec les modèles proposés dans ce mémoire devront être menés afin de

réactualiser en temps réel ces modèles et envisager ainsi une intégration de l'approche en milieu industriel.

Dans un troisième temps, une paramétrisation de l'algorithme proposé devra être envisagée afin, entre autres, d'orienter la recherche de chemins en privilégiant, en fonction de la criticité de la situation, des connections évitant le passage du flux électrique dans des parties d'ouvrages faiblement observables à distance ou encore en privilégiant l'alimentation de clients prioritaires ou tenant compte des périodicités de maintenance.

Enfin, il serait pertinent de considérer la présence de générateurs électriques décentralisés (GED). Il s'agit là d'un problème crucial et d'actualité, influençant de manière importante les flux énergétiques dans les réseaux de distribution et ayant ainsi un impact fort sur la façon de les reconfigurer en présence de défauts (impact sur le plan de tension, les transits de puissances, la qualité de la tension etc. [ALV-2009]).

Par ailleurs, et à plus long terme, il serait particulièrement intéressant de connecter, sur le plan décisionnel, ce type d'approche à celles visant à intégrer de l'intelligence dans l'habitat [HAD-2007], considéré de nos jours comme une des principales sources de consommation énergétique (33% de la consommation nationale). En présence de défauts, il se peut en effet que l'algorithme proposé ne trouve pas de solutions. Dans un premier temps il peut tout à fait être envisagé de relâcher certaines contraintes comme par exemple accepter momentanément quelques surcharges. Cela revient à confiner le problème au niveau de notre algorithme. Cependant, si le défaut ne peut être corrigé rapidement, ce type de décision ne peut avoir qu'une durée limitée dans le temps. Une demande de participation de l'habitat « intelligent » consistant à baisser les niveaux de consommation (arrêt des charges à inertie comme les chauffe-eau par exemple, planchers chauffants, ...) peut permettre dans ce cas de résoudre le problème posé, donnant ainsi du temps au service de maintenance du réseau et en préservant les marges de manœuvre des opérateurs.

Bibliographie

- [**ABB-2008**] O. ABB, « *Sectos NXA Interrupteur – sectionneur sur poteau. Types NXA_A3, _A4, _AM3, _AM4, _B3, _BM3* », ABB Manuel d’installation et d’emploi, 2008.
- [**ACH-2001**] E. ACHA, M. MADRIGAL, « *Power systems harmonics – Computer modelling and analysis* », John Wiley & Sons Ltd England, 2001.
- [**AGG-1990**] A. AGGARWALA, R. J. ALDERSON, and Ming-Yang KAO, « *Parallel depth-first search in general directed graphs* », *SIAM Journal on Computing*, vol.19, no.2, pp.397-409, 1990.
- [**ALV-2009**] M. C. ALVAREZ-HERAULT, « *Architecture des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée* », Thèse de doctorat de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 2009.
- [**AND-2002**] C. ANDRIEU, B. RAISON et al, « *Fault detection, analysis and diagnostics in high DG – distribution systems* », EESD project, 2002.
- [**AOK-1989**] K. AOKI, K. NARA, M. ITOH, T. SATOH, H. KUWABARA, « *A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems* », *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4 No.3, pp.1832-1839, Jul 1989.
- [**ARR-1990**] J. ARRILLAGA, C. P. ARMOLD, « *Computer analysis of power systems* », John Wiley & Sons Ltd, England, pp.09, 1990.
- [**BEL-2007**] H. BELEHDDAOUI, H. MEDROMI, J. SAADI, O. MALASSE, « *Nouvelle Approche d’Analyse de Fiabilité pour la Sécurité de Fonctionnement à base des Systèmes Multi Agents : Application aux Systèmes de Commande Industriels* », 5^{ème} conférence internationale CPI’2007 – Conception et Production Intégrée, Rabat – Maroc, 2007.
- [**BER-1998**] P. BERRUET, « *Contribution au recouvrement des systèmes flexibles de production manufacturière : analyse de la tolérance et reconfiguration* », thèse de doctorat de l’Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 1998.

- [BOU-2000] E. BOUTILLON, W. J. GROSS, G. GULAK, « *Gestion de la mémoire pour l'algorithme du forward-backward = Memory management for the algorithm of the forward-backward* », Workshop AAA sur l'adéquation algorithme architecture, No.5, Rocquencourt France, pp.29-34, 2000.
- [CAR-2001] P. CARRIVE, « *Réseau de distribution. Structure et planification* », Techniques de l'ingénieur D4 210.
- [CHA-1994] F. CHARBONNIER, H. ALLA, R. DAVID, « *The supervised control of discret-event dynamic systems* », IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.7, No.2, pp.175-187,1994.
- [CHA-2006] J. CHAUVEAU, « *Algorithmique des Graphes – TD* », M1 Info 2005 / 2006, Université d'Angers, 2005/2006.
- [CHE-1988] J. S. P. CHEN, A. C. LIEW, S-F. HO, E-K. CHAN, « *Automation Power Supply Restoration in Distribution Network* », Second Symposium on Expert System Application to Power System, Seattle, Washington, pp.62-66, Jul 1989.
- [COM-2000] M. COMBACAU, P. BERRUET, E. ZAMAÏ, P.CHARBONNAUD, « *Supervision and Monitoring of Manufacturing Systems* », Session Invitée, Second IFAC, IFIP, IEEE Conference on Management and Control of Production and Logistics, Grenoble, France, July 2000,
- [COM-1991] M. COMBACAU, « *Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : application aux ateliers flexibles* », thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1991.
- [DES-2005] E. DESCHAMPS, S. HENRY, E. ZAMAÏ, « *Automatic design of control laws based Petri nets formalism for complex Discrete Events Systems* », Studies in informatics and Control, Vol.16, 2007.
- [DIE-2005] R. DIESTEL, « *Graph Theory* », Springer-Verlag Heidelberg, New York, May 2005.
- [DIJ-1959] E. W. DIJKSTRA, « *A note in two problems in connexion with graphs* », Numerisches Mathematik 1, pp.269-271, 1959.
- [DOU-2001] A. DOULET. « *Réseaux de distribution – Introduction* », Techniques de l'Ingénieur, vol.D8, n°D4200, Principes fondamentaux retenus pour la distribution, pp.3, 2001.
- [DOU-1997] A. DOULET, « *Réseaux de distribution – Exploitation* », Techniques de l'Ingénieur, vol.D8, n°D4230, pp.3-tableau 1, 1997.

- [**DOU-1995**] A. DOULET, « *Réseau de distribution. Exploitation* », Techniques de l'ingénieur D4 230.
- [**EDF-2004**] EDF, « *Manuel Théorique du logiciel eurostag* », Electricité De France, 2004, P1-8.
- [**ENA-2007**] B. ENACHEANU, « *Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, octobre 2007.
- [**ERD-2008**] ERDF-NOI-RES_07E, « *Description physique du réseau public* », ERDF, Électricité Réseau Distribution France, 2008.
- [**ERD-2002**] ERDF-FOR-RES_10E, « *Convention de raccordement au Réseau Public de Distribution HTA d'une installation de production d'énergie électrique. Conditions générales* », ERDF, Électricité Réseau Distribution France, pp.33-34, 2008.
- [**GEN-2007**] G. GENAULT, « *Matrices creuses et algorithmes spécifiques applications* », SPIRAL-LIP6/Université Paris 6, Avril 2007.
- [**GHA-2004**] M. GHALLAB, D. NAU, P. TRAVERSO, « *Automated Planning, Theory and Practice* », Elsevier, pp.37-38-102, 2004.
- [**GOT-1997**] B. GOTZIG, « *Recherche du schéma optimal d'exploitation d'un réseau de distribution électrique* », thèse de doctorat de l'INPG, Décembre 1997.
- [**HAD-2007**] L. HA DUY, « *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation* », thèse de doctorat de l'INPG, Septembre 2007.
- [**HEN-2005**] S. HENRY, « *Synthèse de lois de commande pour la configuration et la reconfiguration des systèmes industriels complexes* », thèse de doctorat de l'INPG, Octobre 2005.
- [**HEN'-2005**] S. HENRY, E. ZAMAÏ, M. JACOMINO, « *Controlled system model adapted for control law synthesis* ». In 16th IFAC World Congress (IFAC'05), Prague, République Tchèque, 2005.
- [**HOL-1990**] L. E. HOLLOWAY, B. KROGH, « *Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets* », IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.35, No.5, pp.514–523, 1990.
- [**KER-2004**] B. KERSTING, « *IEEE 123 Node Test Feeder* », IEEE power engineering society, Power System Analysis - Computing and Economics Committee, 2004.
- [**LAC-2003**] P. LACOMME, C. PRINS, M. SEVAUX, « *Algorithmes de Graphes. Eyrolles* », 2003.

- [LEE-1988] S. J. LEE, C. C. LIU, S. S. VENKATA, « *An Extended Expert System for Service Restoration of Distribution Feeders* », IFAC Symposium Power Systems, Modelling and Control Application, Brussels, Sep 1988.
- [LIN-1989] C. E. LIN, Y. W. HUANG, H. L. CHOW, C. L. HUANG, « *A Distribution System Outage Dispatch by Data Base Method with Real time Revision* », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.515-523, Jan 1989.
- [MAK-2003] J. MAKHIJA, « *Comparison of protocols used in remote monitoring: DNP 3.0, IEC 870-5-101 & Modbus* », M.Tech. Credit Seminar Report, Electronics Systems Group, EE Dept, IIT Bombay, November 2003.
- [MAT-1989] Y. MATSUMOTO, A. MIURA, T. HIRANO, Y. IMAMURA, « *An Expert System for Restoration of Distribution Lines* », Second Symposium on Expert System Application to Power System, Seattle, Washington, pp.57-61, Jul 1989.
- [MOR-1989] A. L. MORELATO, A. MONTICELLI, « *Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration* », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.4, pp.2235-2241, Oct 1989.
- [MUR-1989] T. MURATA, « *Petri net : Properties, Analysis and Applications* », Proceeding of the IEEE, Vol.77, No.04, pp. 541-580, Avril 1989.
- [NIE-2002] E. NIEL, E. CRAYE, « *Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production* », Hermès-Lavoisier, 2002.
- [OTT-2002] R. OTT, « *Qualité de la tension. Creux et coupures brèves* », Techniques de l'ingénieur D4 262.
- [PAN-1999] J. P. PANTE, « *Load flow Calculation* », Vancouver, BC, Canada, 1999.
- [PAU-2005] P. E. BLACK, « *Bellman-Ford algorithm* », in *Dictionary of Algorithms and Data Structures* [online], Paul E. Black, ed., [U.S. National Institute of Standards and Technology](http://www.nist.gov/special-publications/dads/), March 2005.
- [PHA-2005] Cong-Duc PHAM, « *Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [POL-1999] G. POLLOK, « *3AH Vacuum circuit-breakers* », Medium-voltage equipment Catalog HG 11.11, 1999.
- [POW-2004] L. POWELL, « *Power system load flow analysis* », Mc-Graw Hill Companies, America, 2004.
- [PUR-1991] C. PURET, « *les réseaux de distribution publique MT dans le monde* », Cahier Technique Schneider Electric, No.155, 1991.

- [RAI-2009] B. RAISON « Module load flow », cours module électrique – conduite des réseaux électriques, ENSE3, mai 2009.
- [RAP-2006] RAPHEME et W. TRADUCTIONS, « *Appareillage de réseau et d'alimentation des transformateurs MT/BT. RM6 24kV* », Catalogue de Schneider Electric Industries SAS, 2006.
- [R&D-2008] R&D – Electricité de France, « *Système de téléconduite SIT-R pour le réseau de Distribution* », Présentation d'EDF - R&D, pp.20, 2008.
- [RIC-2006] O. RICHARDOT, « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée », Mémoire de thèse de l'Grenoble-INP, Chapitre 2, Octobre 2006.
- [SAK-1983] T. SAKAGUCHI, K. MATSUMOTO, « *Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration* », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.Pas102, No.2, pp.320-329, Feb 1983.
- [SAM-2008] R. SAMPATH, H. DARABI, U. BUY, J. LIU, « *Control Reconfiguration of Discrete Event Systems with Dynamic Control Specifications* », IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol.5, No.1, pp.84-100, Jan 2008.
- [SAN-2004] S. K. SHUKLA, « *Floyd-Warshall algorithm* », in *Dictionary of Algorithms and Data Structures* [online], Paul E. Black, ed., U.S. National Institute of Standards and Technology, December 2004.
- [SCH-2001] Schneider Electric, « *Les architectures de réseaux* », Guide de conception des réseaux électriques industriels, Schneider Electric T&D 6883 427A, 2001.
- [SIG-2002] E. SIGWARD, « *Introduction à la théorie des graphes* », Mars 2002.
- [SUN-2008] SUN Microsystems, « *The Java EE 5 Tutorial for sun java system application server 9.1* », Sun Microsystems Inc, Santa Clara, U.S.A, chapter I, 20089.
- [TRE-2002] D. TRENTESAUX, O. SENECHAL, « *Conduite des systèmes de production manufacturière* », Techniques de l'ingénieur, traité Informatique Industrielle, numéro S7598, 2002.
- [WIL-1989] T. J. WILLIAMS, « *A reference model for computer integrated manufacturing from the viewpoint of industrial automation* », Instrument Society of America, North Carolina, 1989.
- [ZAM-2009] E. ZAMAÏ, « *Techniques de supervision* », Présentation de Eric ZAMAÏ, pp.91-92, 2009.
- [ZAM-2005] E. ZAMAÏ, P. BERRUET, J-F. PETIN, A. TOGUYENI, « *Principes des architectures de pilotage de procédés industriels* », Technique Ingénieur, 2005.

[ZAM-1997] E. ZAMAÏ, « *Architecture de surveillance – commande pour les systèmes à événements discrets complexes* », thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1997.

Annexes

Annexe 1 : La méthode de recherche et d'insertion des opérations parallèles de S. Henry

Le résultat des étapes 1,2 et 3 est un chemin (appelé Ch_{123}) qui spécifie les évolutions des chaînes fonctionnelles et du produit afin de le fabriquer [HEN-2005]. En l'absence d'aléas, ces évolutions sont conditionnées par l'exécution d'opérations spécifiées, sur les transitions du chemin, par leur comportement.




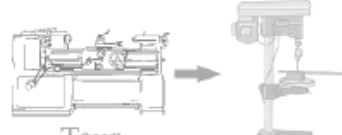




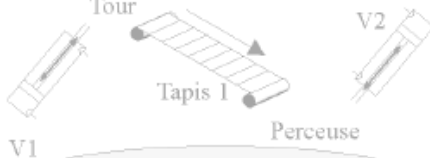











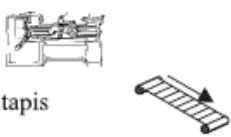
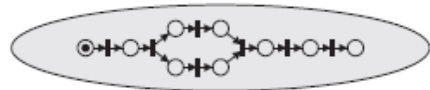


Il reste néanmoins une partie de la demande à laquelle la réponse apportée par le chemin complet Ch_{123} trouvé n'est pas toujours optimale. En effet, le temps de cycle de la loi de commande correspondant à la séquence d'opérations spécifiées par le chemin complet Ch_{123} peut être réduit en introduisant des parallélismes d'exécution entre ces opérations.

Nous avons jusqu'à maintenant utilisé un formalisme basé sur des états et des transitions entre états. Ce formalisme était particulièrement adapté puisque les parallélismes d'exécution étaient gelés. La ré-introduction de ces parallélismes dans cette quatrième étape amène à reconsidérer le formalisme utilisé jusqu'à maintenant. En effet, une représentation d'états est très limitée dans l'expression des parallélismes comparée, par exemple, à celle des réseaux de Pétri [MUR-1989].

Néanmoins, comme nous le verrons dans cette section et dans les deux chapitres suivants du mémoire de Sébastien HENRY [HEN-2005], il s'avère nécessaire pour l'algorithme de conserver la connaissance de l'état du système contrôlé depuis lequel les opérations avec leur comportement sont exécutées. Ainsi pour les besoins de l'algorithme de synthèse uniquement, nous devons conserver un formalisme basé sur une représentation d'états tout en représentant par ailleurs des parallélismes. Le formalisme recherché étant propre à l'algorithme de synthèse

et donc jamais visualisé par l'expert, il privilégiera l'accès à l'information pour l'algorithme. Ainsi, ce formalisme propre à l'algorithme sera basé sur une représentation d'états couplée à une représentation particulière de contraintes de précedence entre les comportements des opérations.

Afin de présenter ce formalisme, considérons une séquence de trois opérations représentées par leur comportement respectif (cf. *figure A1.1*). Deux contraintes de précedence sont imposées par le chemin qui spécifie cette séquence : le comportement 1 avant le comportement 2, et le comportement 2 avant le comportement 3. Considérons maintenant que les comportements 2 et 3 puissent être exécutés en parallèle. Les contraintes de précedence sont alors : le comportement 2 succède toujours le comportement 1, et le comportement 3 peut immédiatement suivre le comportement 1.

		1 produit A 	1 produit B 
Transformation étape 1	évolutions autorisées ? 	 Tour Perceuse 	 Fraiseuse 
Transitique étape 2	où les intégrer ? 	 Tour Tapis 1 V2 Perceuse V1 	 V3 Magasin Tapis 1 Fraiseuse 
Préparation étape 3	geler les // ? 	Démarrer  Rentrer V1 pour autoriser tournage  	Démarrer tapis  Rentrer V3 pour autoriser fraisage  
Parallélismes étape 4	retrouver tous les // ? 	Tournage et démarrage du tapis  	Démarrage du tapis et rentré de V3  

Conception de lois de commande acyclique
Phase A

Figure A1.1 : étape 4 de conception d'une loi de commande acyclique

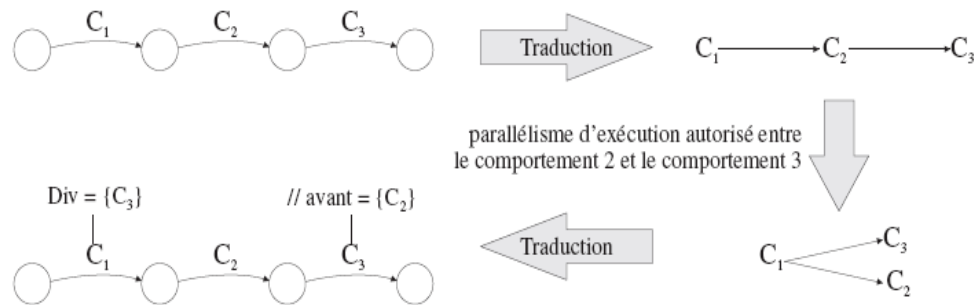


Figure A1.2 : représentation des parallélismes en conservant un formalisme basé sur les états du système contrôlé

Le parallélisme d'exécution entre les comportements 2 et 3 supprime donc la contrainte de précédence entre les comportements 2 et 3, et ajoute une contrainte de précédence entre les comportements 1 et 3. Cette dernière contrainte de précédence conduit à une divergence en **ET** après le comportement 1, puisque les comportements 2 et 3 seront exécutés. Afin de représenter cette divergence, une liste divergence associée au comportement 1 est créée, notée **Div**. Le chemin, qui spécifie la séquence, représentant déjà la contrainte entre le comportement 1 et le comportement 2, seul le comportement 3 est ajouté à cette liste divergence. Après avoir représenté la nouvelle contrainte de précédence, il est nécessaire de supprimer celle entre les comportements 2 et 3. Pour cela, nous associons au comportement 3 une liste des parallélismes d'exécution avec les comportements placés avant celui-ci dans la séquence initiale.

Cette liste est notée // **avant**. Dans notre exemple, cette liste contiendra alors le comportement 2. Basé sur le formalisme proposé, qui rappelons le, est propre à l'algorithme de synthèse, nous présentons tout d'abord la recherche des parallélismes d'exécution entre un comportement et ceux le précédent. Puis suite à la présentation de la notion de parallélismes induits, nous présentons la démarche globale d'introduction des parallélismes d'exécution.

A1.1 Parallélismes entre un comportement et ceux les précédents

L'exemple de parallélismes d'exécution de l'exemple de présentation du formalisme présenté précédemment se limite à considérer qu'il existe un parallélisme d'exécution entre un comportement et uniquement celui le précédent. Mais il faut aussi envisager que des parallélismes d'exécution avec d'autres comportements en amont sont autorisés. Ainsi, cette section propose de traiter cette proposition.

Considérons un chemin complet Ch_{123} composé de N transitions qui sont chacune étiquetée avec un comportement $(C_k, k \in [1, N])$ d'une opération. Ces comportements transforment le produit, modifient sa position, ou bien préparent les chaînes fonctionnelles. L'ajout au chemin Ch_{123} des informations relatives aux parallélismes d'exécution conduit à un chemin, dit optimal du point de vue du temps total d'exécution de la loi de commande correspondante. Il est noté Ch_{op} . Les deux listes (// **avant** et **Div**) d'un comportement C_k d'une opération sont complétées de la façon suivante :

Liste // avant. Si le comportement C_k et le comportement C_{k-1} peuvent être exécutés en parallèle suite à la vérification de la propriété 4 (voir la page 92 de la thèse de S.Henry [HEN-

2005]), alors le comportement C_{k-1} est ajouté à la liste des parallélismes autorisés avant C_k . Puis de même entre C_k et le comportement précédent C_{k-2} , jusqu'à trouver un comportement d'une opération dont le parallélisme d'exécution est interdit avec C_k . Le comportement C_k est alors ajouté à la liste **Div** de ce dernier comportement. Cette règle ne s'applique pas quand le parallélisme d'exécution est impossible entre C_k et C_{k-1} car la contrainte de précedence entre ces deux comportements est déjà spécifiée par le chemin complet Ch_{123} .

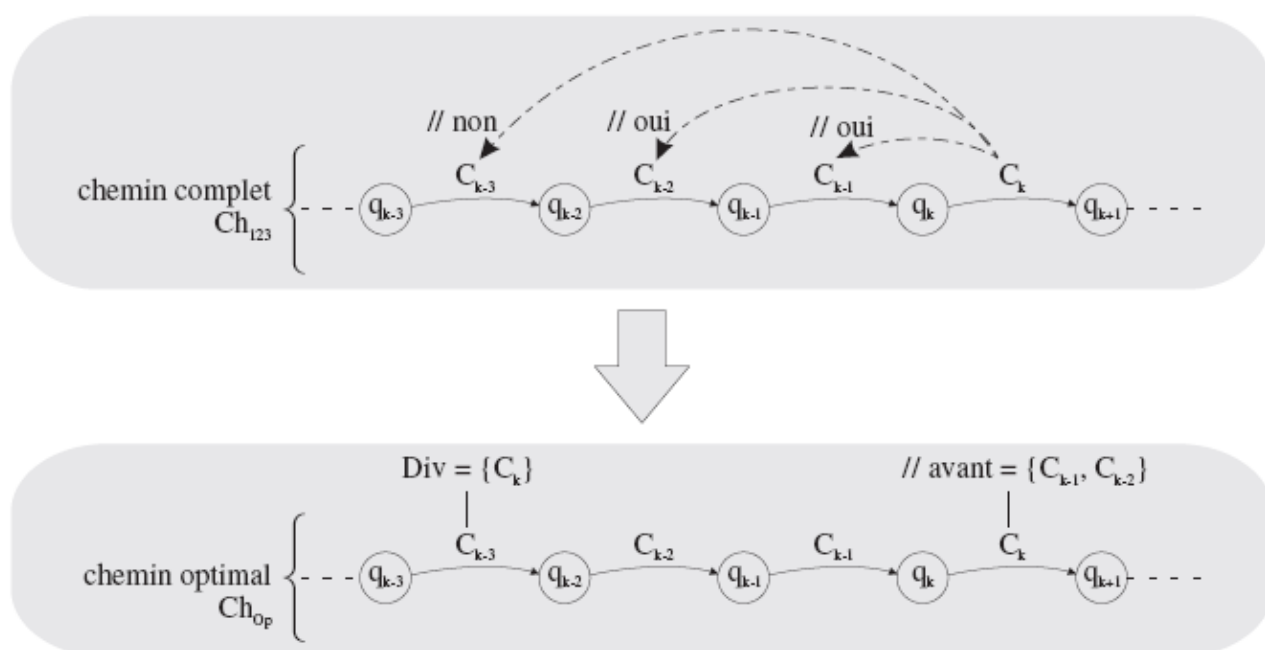


Figure A1.3 : principe de la recherche des parallélismes entre un comportement et les comportements en amont

Liste Div. Par exemple, sur la Figure A1.3, nous supposons que les comportements C_k et C_{k-3} ne vérifient pas la propriété générique 4 (voir la page 92 de la thèse de S.Henry [HEN-2005]) sur le parallélisme d'exécution. Le comportement C_k est alors ajouté à la liste d'opérations à exécuter après C_{k-3} . Le chemin Ch_{Op} contient alors l'information sur l'exécution en parallèle des comportements C_{k-2} et C_k après le comportement C_{k-3} ; C_{k-2} puisqu'il succède C_{k-3} , et C_k puisqu'il appartient à la liste d'opérations à exécuter après C_{k-3} .

La recherche des parallélismes autorisés entre un comportement C_k et ceux en amont s'arrête quand la propriété générique 4 n'est pas vérifiée. En effet, un chemin complet Ch_{123} a

été construit pour un produit, il n'est alors pas possible d'inverser l'ordre de deux comportements dont l'effet serait différent de celui spécifié par le chemin complet Ch_{123} .

Le cas où un comportement C_k est exécutable en parallèle de tous les comportements le précédant est un cas particulier. En effet, avec le principe énoncé ci-dessus, le comportement.

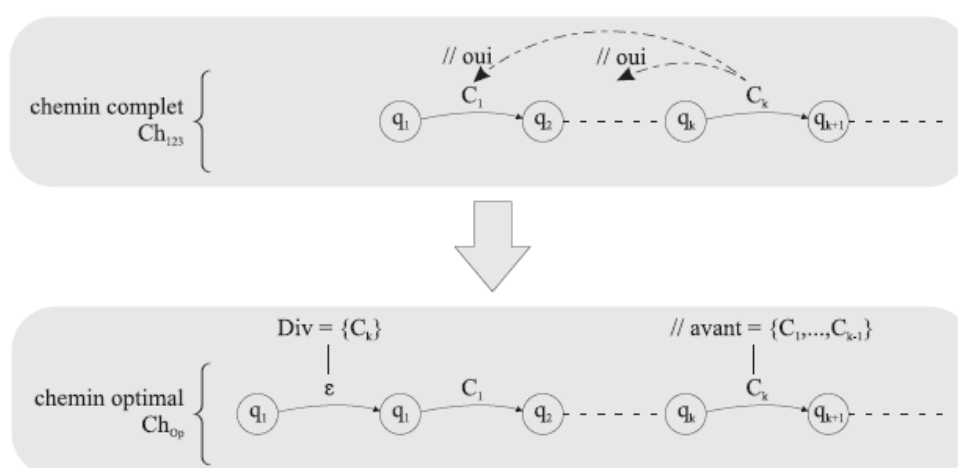


Figure A1.4 : cas particulier où l'exécution d'un comportement est autorisée en parallèle de tous les comportements le précédant

C_k ne sera ajouté à aucune liste **Div**. Alors l'opération avec le comportement C_k ne sera jamais lancée. Il est nécessaire de créer un état précédent l'état initial du chemin complet Ch_{123} . Cet état est identique à l'état initial et le comportement associé à la transition est le comportement neutre ϵ , voir la Figure A1.4. Le comportement C_k est finalement ajouté à la liste **Div** des comportements à exécuter après ϵ .

Le principe énoncé ci-dessus se focalise uniquement sur les parallélismes autorisés entre un comportement C_k et tous ceux en amont. Afin d'optimiser le temps d'exécution de la loi de commande, il est nécessaire d'appliquer ce principe à tous les comportements. Mais par un phénomène de parallélismes induits présentés dans la section suivante, les parallélismes d'exécution sont à rechercher en parcourant le chemin complet Ch_{123} vers l'avant.

A1.2 Parallélismes induits

Dans la section précédente, nous avons posé le principe de recherche des parallélismes d'exécution entre un comportement C_k et ceux en amont C_i (avec $i \in [1, k-1]$). Mais la liste des parallélismes autorisés avant chacun des comportements C_i (avec $i \in [1, k-1]$) était vide.

Au risque de violer des contraintes de sécurité et d'écologie, il est nécessaire de s'intéresser aux éléments de cette liste quand elle n'est pas vide.

La *Figure A1.5* représente un chemin Ch_{123} pour lequel les parallélismes autorisés ont été déterminés pour les comportements C_i (avec $i \in [1, k-1]$). Cette Figure décrit alors le processus de détermination des parallélismes d'exécution entre le comportement C_k et ceux le précédent.

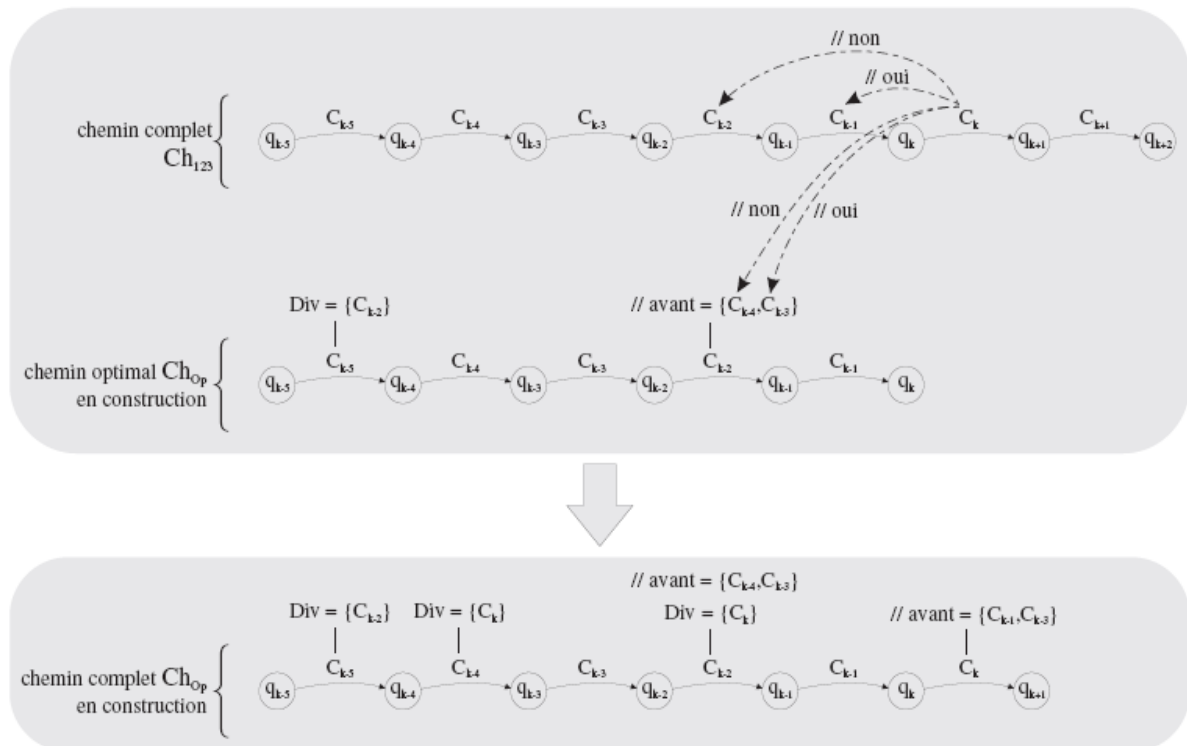


Figure A1.5 : parallélismes induits par ceux d'une autre opération

Les comportements C_k et C_{k-1} peuvent être exécutés en parallèle. En revanche, le parallélisme d'exécution est interdit entre les comportements C_k et C_{k-2} . De plus, la liste des parallélismes, autorisés entre C_{k-2} et ceux en amont, contient deux éléments : les comportements C_{k-4} et C_{k-3} . Dans cette situation, le comportement C_k exécuté après C_{k-2} peut l'être en parallèle des comportements C_{k-4} et C_{k-3} . Au risque de violer les contraintes de sécurité et d'écologie, il est alors obligatoire de vérifier le parallélisme d'exécution entre C_k et les deux comportements C_{k-4} et C_{k-3} .

Si l'exécution en parallèle des comportements C_k et C_{k-3} est autorisée, C_{k-3} est ajouté à la liste des parallélismes autorisés avant C_k . A l'inverse, si ce parallélisme est interdit, C_k est ajouté à la liste d'opérations à exécuter après C_{k-3} . A condition que le parallélisme soit autorisé entre C_k et C_{k-3} , le même principe est appliqué entre C_k et C_{k-4} .

La *Figure A1.6* représente d'une part le graphe de précédence entre les comportements du chemin Ch_{123} de la *Figure A1.5* sans tenir compte des parallélismes induits, et d'autre part le graphe de précédence avec la prise en compte des parallélismes induits. Nous remarquons que dans la *Figure A1.6 (a)*, il n'existe pas de contraintes de précédence entre C_{k-4} et C_k quand les parallélismes induits ne sont pas considérés. A l'inverse, la prise en compte des parallélismes induits impose une contrainte de précédence entre C_{k-4} et C_k (cf. *Figure A1.6 (b)*).

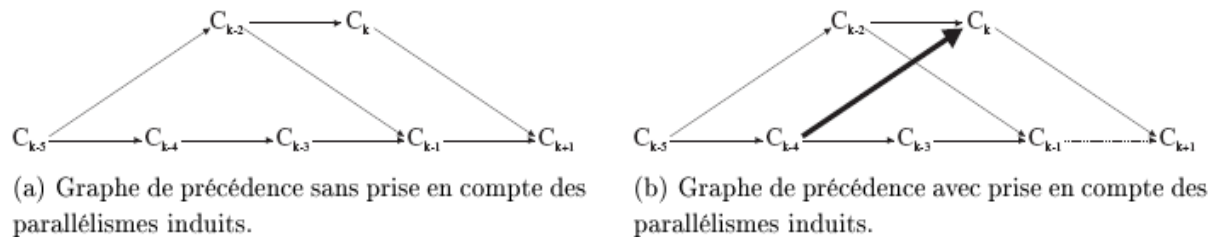


Figure A1.6 : comparaison des graphes de précédence avec et sans prise en compte des parallélismes induits

Annexe 2 : Modèle général des opérations d'un réseau

Dans cette annexe, nous présentons toutes les opérations possibles des connexions d'un réseau réduit. Dans chaque opération, il y a quelques champs comme : le numéro X des ConnIntX ou ConnDisjX, la durée d'exécution des opérations de préparation ; le nom du nœud de départ Nœud-D ou du nœud d'arrivée Nœud-A. Ces champs vont être remplis en lien avec le réseau exemple (voir un exemple d'une opération détaillée dans le chapitre V, section 5.4).

A2.1 Opération de fermeture d'un interrupteur X (cf. figure A2.1)

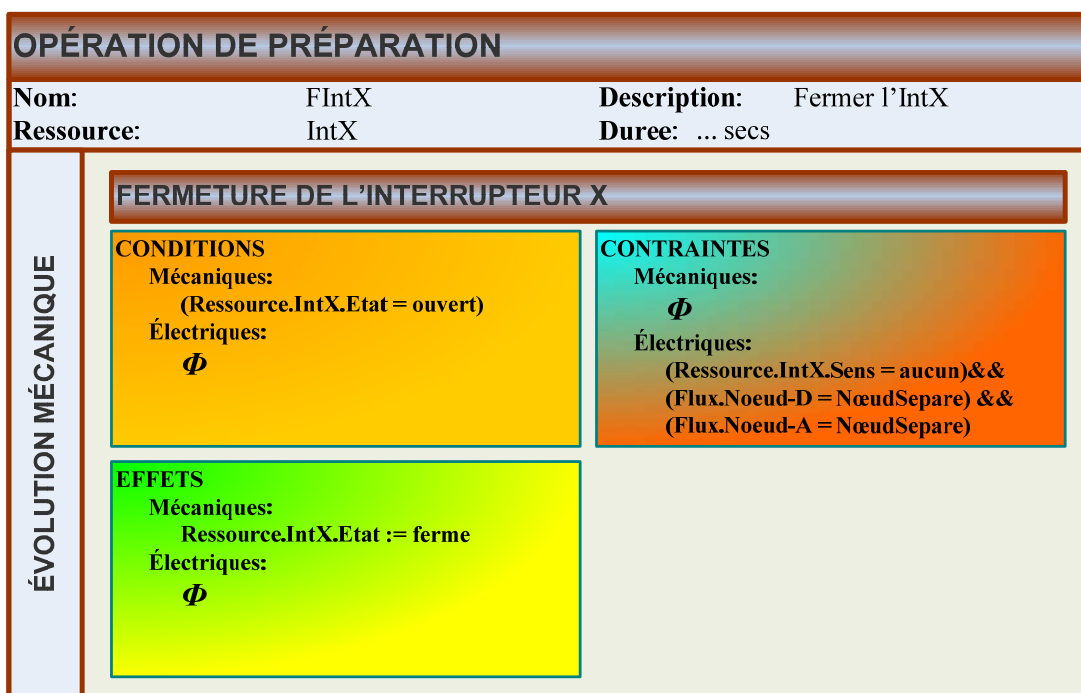


Figure A2.1 : modèle de l'opération de fermeture de l'IntX

A2.2 Opération d'ouverture d'un interrupteur X (cf. figure A2.2)

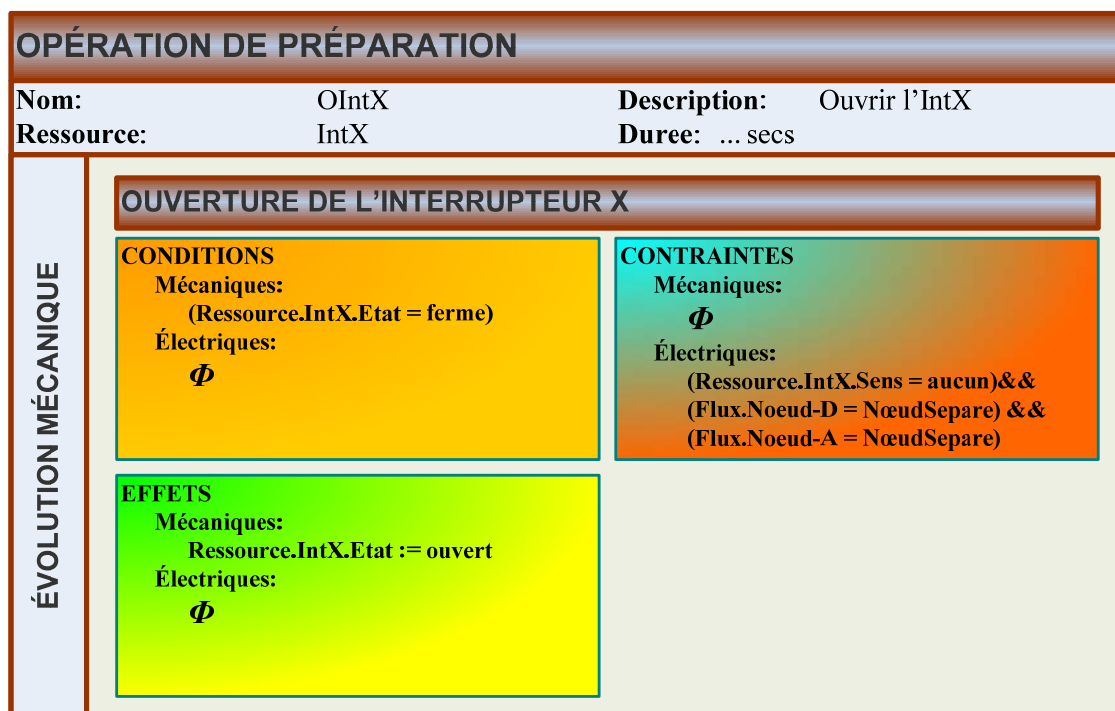


Figure A2.2 : modèle de l'opération d'ouverture de l'IntX

A2.3 Opération de fermeture d'un disjoncteur X (cf. figure A2.3)

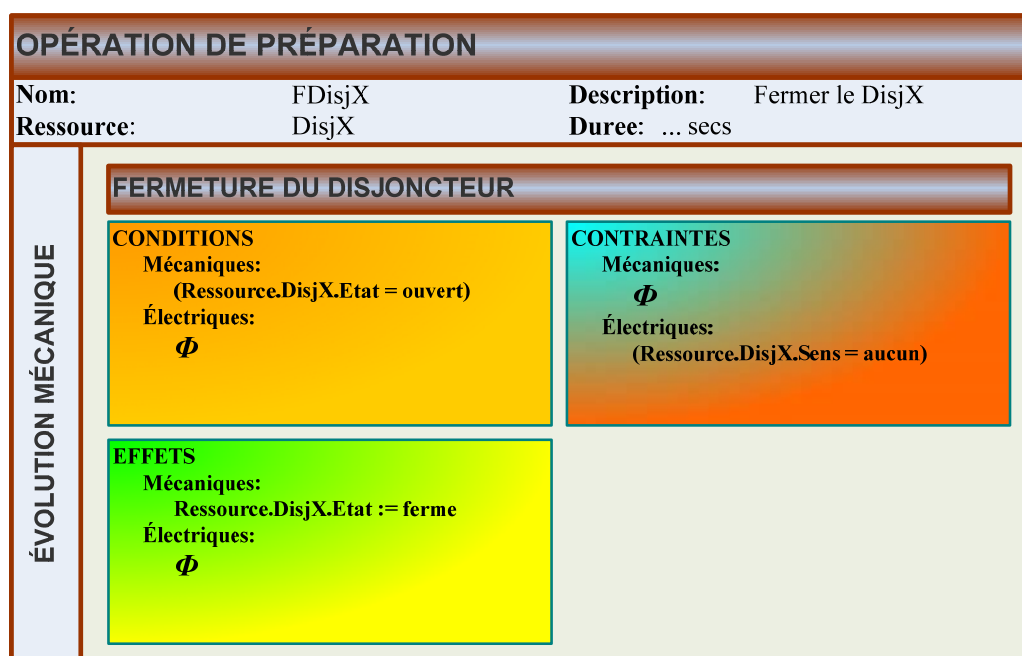


Figure A2.3 : modèle de l'opération de fermeture du DisjX

A2.4 Opération d'ouverture d'un disjoncteur X (cf. figure A2.4)

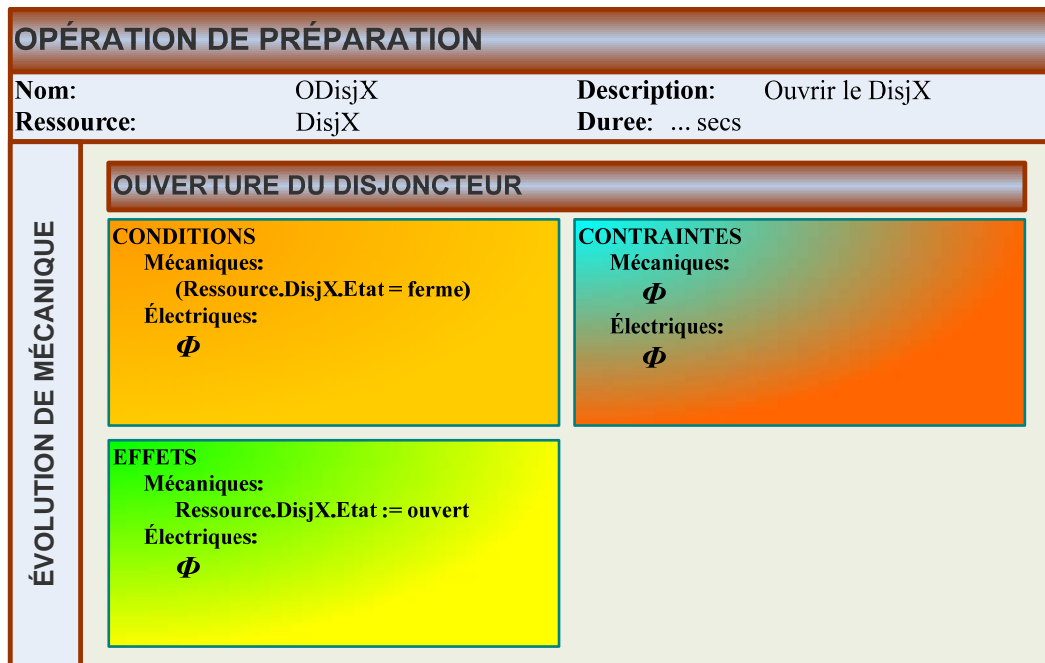


Figure A2.4 : modèle de l'opération d'ouverture du DisjX

A2.5 Opération d'activation d'une ConnInt X (cf. figure A2.5)

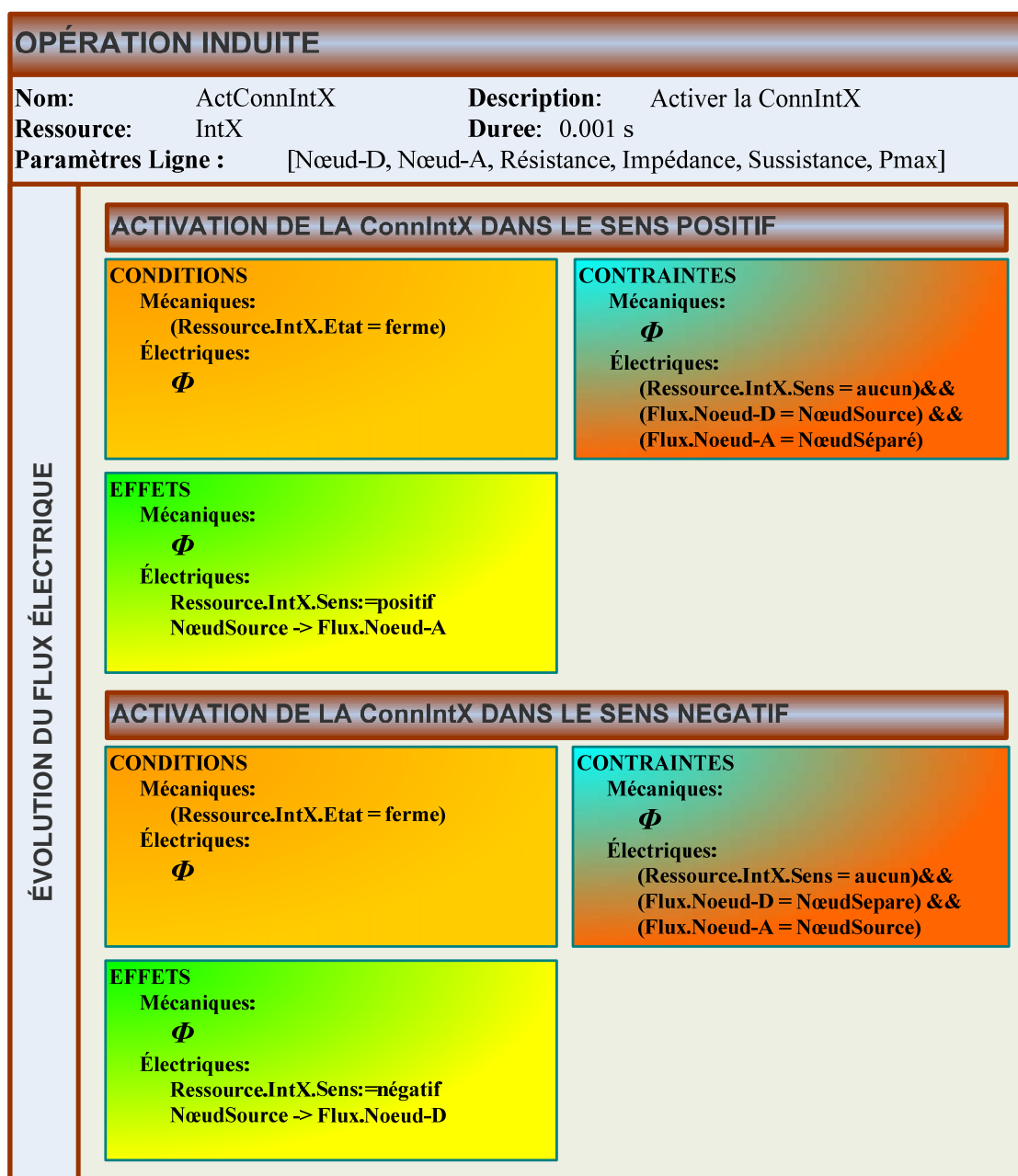


Figure A2.5 : modèle de l'opération d'activation de la ConnIntX

A2.6 Opération de désactivation d'une ConnInt X (cf. figure A2.6)

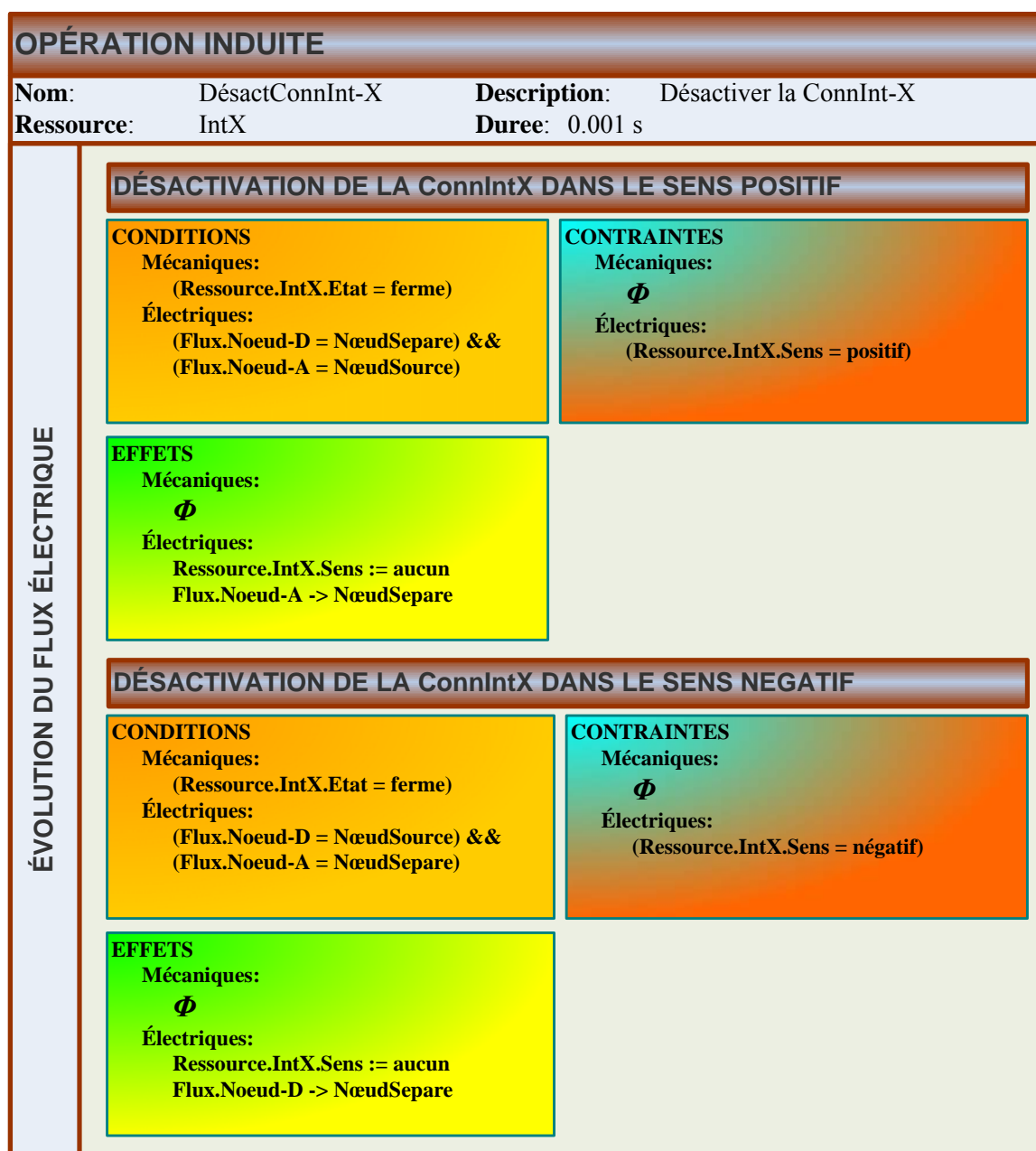


Figure A2.6 : modèle de l'opération de désactivation de la ConnIntX

A2.7 Opération de séparation d'une ConnInt X (cf. figure A2.7)

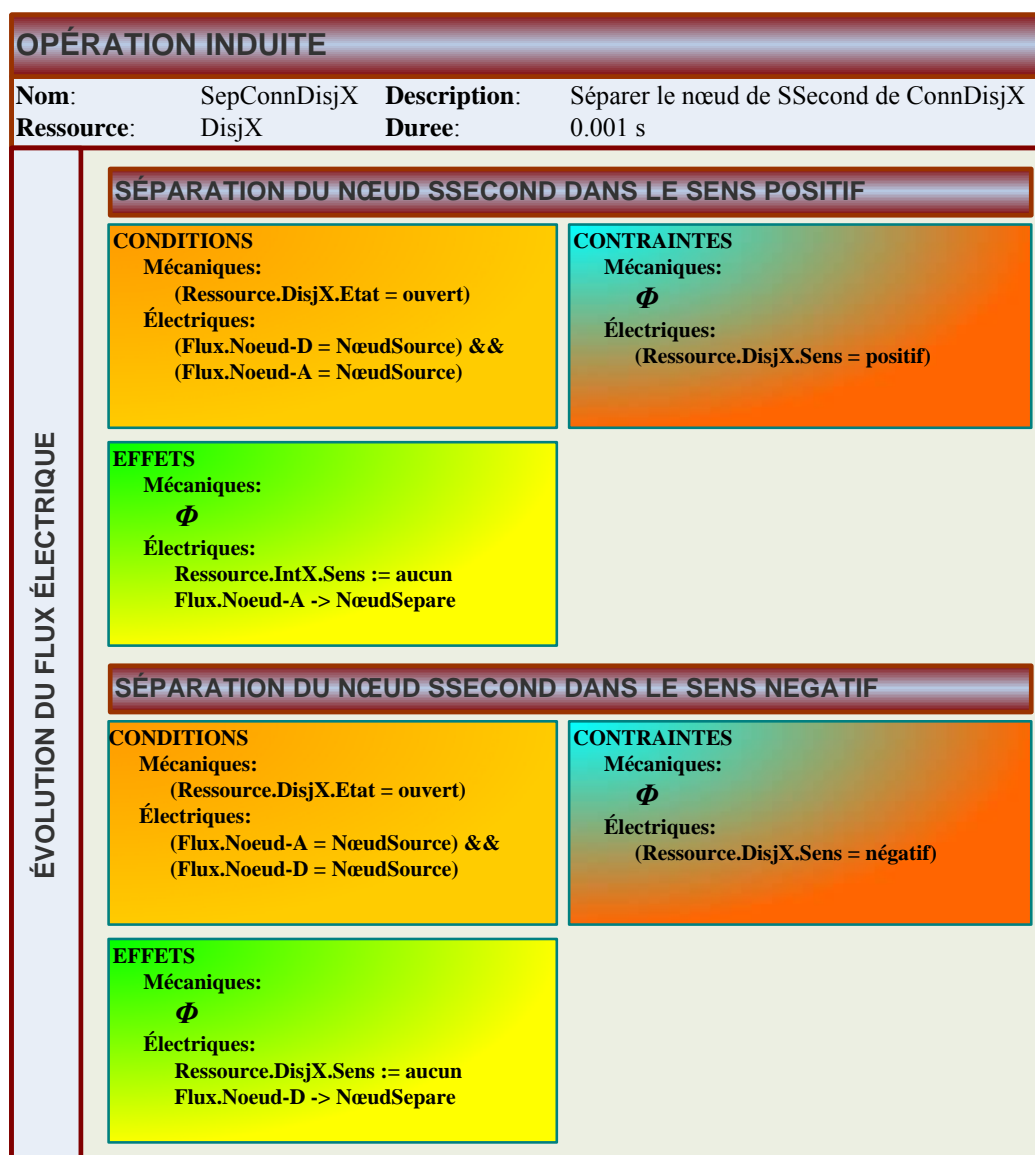


Figure A2.7 : modèle de l'opération de séparation de la ConnDisjX

A2.8 Opération d'activation d'une ConnDisjX (cf. figure A2.8)

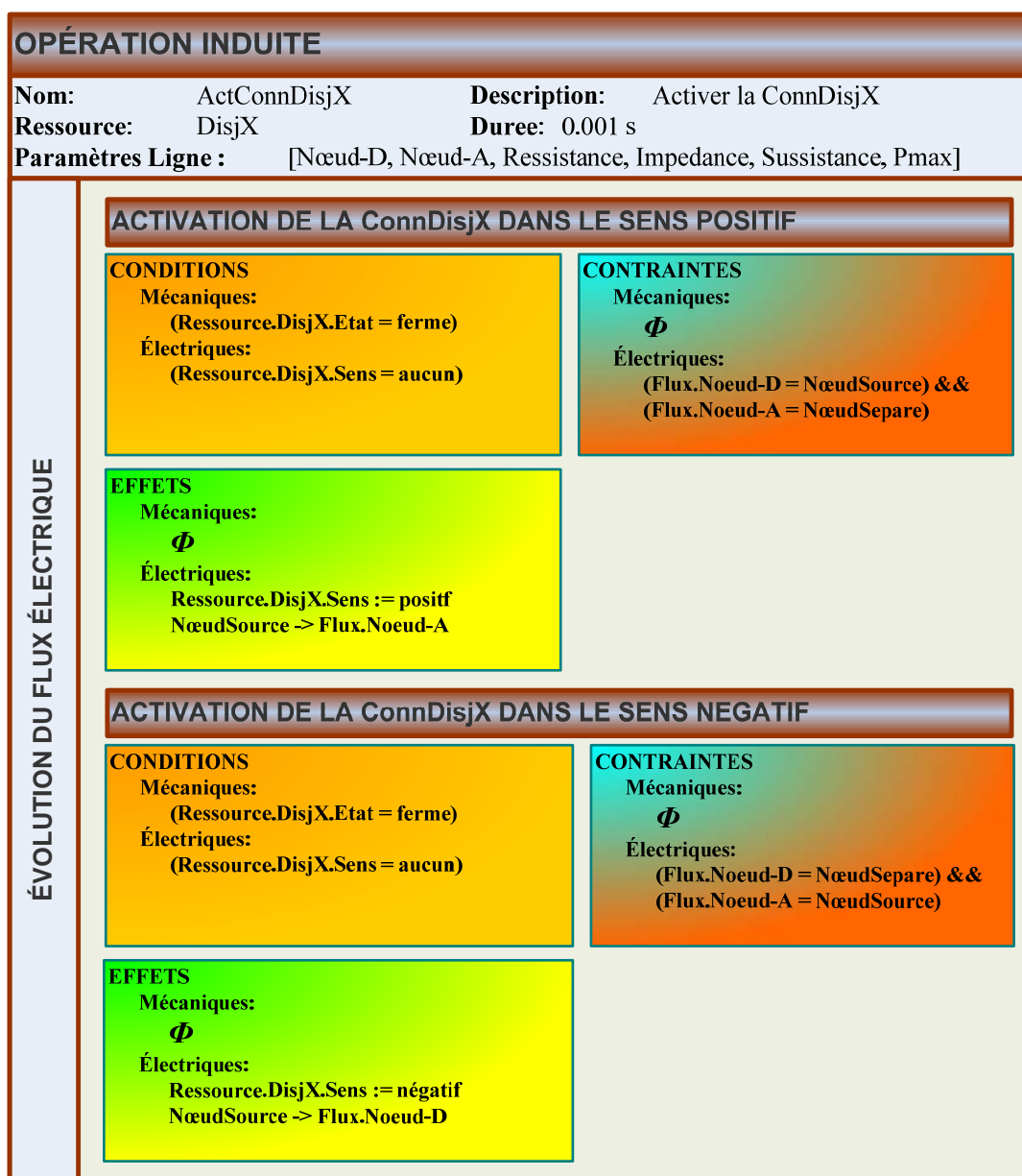


Figure A2.8 : modèle de l'opération d'activation de la ConnDisjX

A2.9 Opération de désactivation d'une ConnDisjX (cf. figure A2.9)

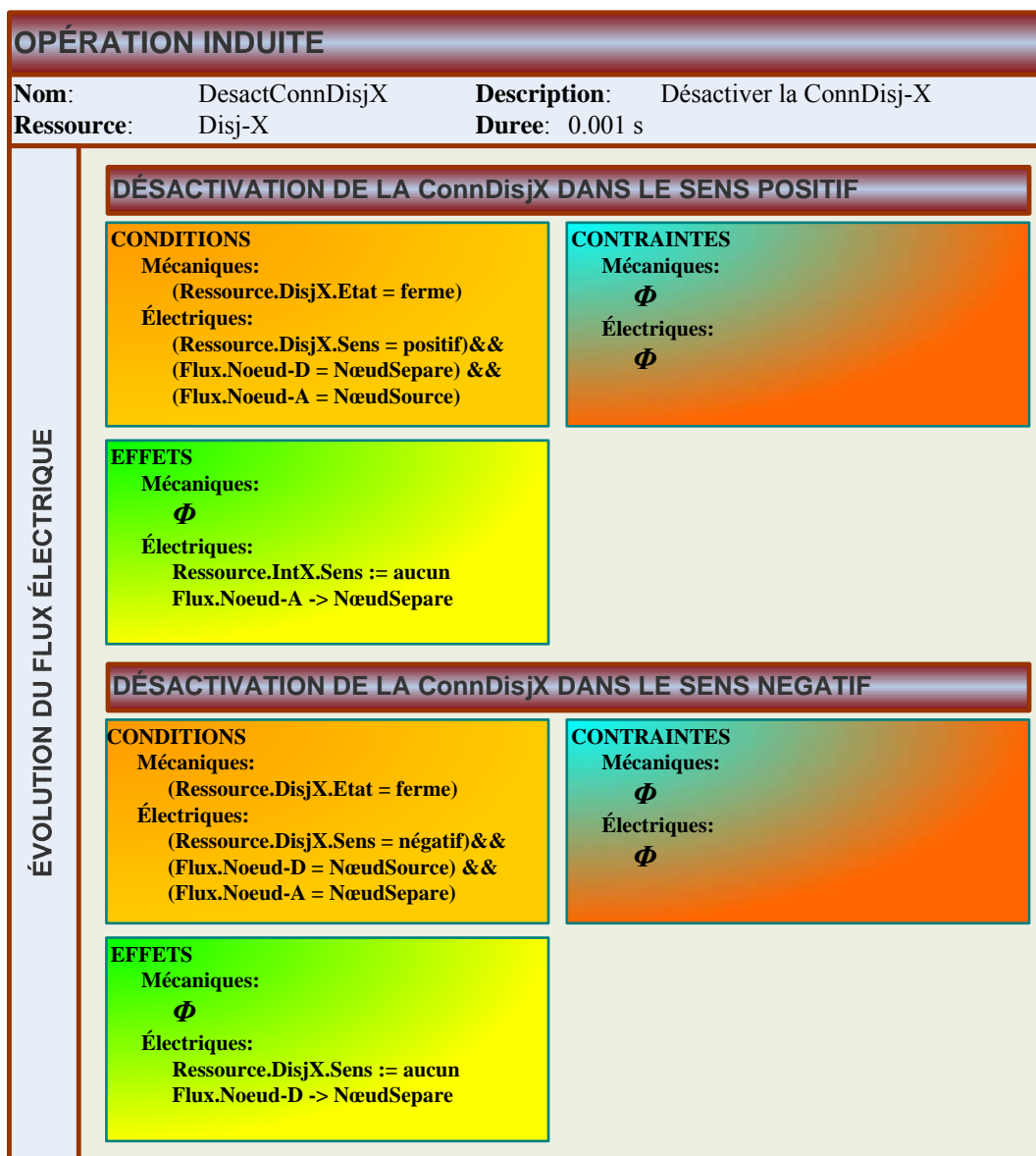


Figure A2.9 : modèle de l'opération de désactivation de la ConnDisjX

Annexe 3 : Modèle des nœuds (détaillés/groupés) du réseau exemple

A3.1 Modèle d'un nœud détaillé

Le modèle général d'un nœud détaillé est présenté dans la *Figure A3.1*.

Nom="XXX" paramètres = [Type, Tension, Pg, Qg, Pd, Qd, Qmin, Qmax]

Exemple: Nom="U_1" paramètres = [2, 1.05, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Descriptions des paramètres d'un nœud

Nom:	Le nom de nœud
Type:	Type du nœud 0 – nœud PQ, 1 – nœud PV, 2 – nœud slack (bilan)
Tension:	Tension apparente du nœud
Pg:	Puissance active générée
Qg:	Puissance réactive générée
Pd:	Puissance active consommée
Qd:	Puissance réactive consommée
Qmin:	Puissance réactive min
Qmax:	Puissance réactive max

Figure A3.1 : modèle d'un nœud détaillé

Dans le tableau A3.1 suivant, nous présentons tous les modèles des nœuds détaillés du réseau exemple.

Tableau A3.1 : modèles des nœuds détaillés du réseau exemple

Nom	Type	Tension	Pg	Qg	Pd	Qd	Qmin	Qmax
1	0	1.0	0	0	40	20	0	0
2	0	1.0	0	0	20	10	0	0
3	0	1.0	0	0	0	0	0	0
4	0	1.0	0	0	40	20	0	0
5	0	1.0	0	0	20	10	0	0
6	0	1.0	0	0	40	20	0	0
7	0	1.0	0	0	20	10	0	0
8	0	1.0	0	0	0	0	0	0
9	0	1.0	0	0	40	20	0	0
10	0	1.0	0	0	20	10	0	0
11	0	1.0	0	0	40	20	0	0
12	0	1.0	0	0	20	10	0	0
13	0	1.0	0	0	0	0	0	0
14	0	1.0	0	0	0	0	0	0

15	0	1.0	0	0	0	0	0	0
16	0	1.0	0	0	40	20	0	0
17	0	1.0	0	0	20	10	0	0
18	0	1.0	0	0	0	0	0	0
19	0	1.0	0	0	40	20	0	0
20	0	1.0	0	0	40	20	0	0
21	0	1.0	0	0	0	0	0	0
22	0	1.0	0	0	40	20	0	0
23	0	1.0	0	0	0	0	0	0
24	0	1.0	0	0	40	20	0	0
25	0	1.0	0	0	0	0	0	0
26	0	1.0	0	0	0	0	0	0
27	0	1.0	0	0	0	0	0	0
28	0	1.0	0	0	40	20	0	0
29	0	1.0	0	0	40	20	0	0
30	0	1.0	0	0	40	20	0	0
31	0	1.0	0	0	20	10	0	0
32	0	1.0	0	0	20	10	0	0
33	0	1.0	0	0	40	20	0	0
34	0	1.0	0	0	40	20	0	0
35	0	1.0	0	0	40	20	0	0
36	0	1.0	0	0	0	0	0	0
37	0	1.0	0	0	40	20	0	0
38	0	1.0	0	0	20	10	0	0
39	0	1.0	0	0	20	10	0	0
40	0	1.0	0	0	0	0	0	0
41	0	1.0	0	0	20	10	0	0
42	0	1.0	0	0	20	10	0	0
43	0	1.0	0	0	40	20	0	0
44	0	1.0	0	0	0	0	0	0
45	0	1.0	0	0	20	10	0	0
46	0	1.0	0	0	20	10	0	0
47	0	1.0	0	0	105	75	0	0
48	0	1.0	0	0	210	150	0	0
49	0	1.0	0	0	140	100	0	0
50	0	1.0	0	0	40	20	0	0
51	0	1.0	0	0	20	10	0	0
52	0	1.0	0	0	40	20	0	0
53	0	1.0	0	0	40	20	0	0
54	0	1.0	0	0	0	0	0	0
55	0	1.0	0	0	20	10	0	0
56	0	1.0	0	0	20	10	0	0
57	0	1.0	0	0	0	0	0	0
58	0	1.0	0	0	20	10	0	0
59	0	1.0	0	0	20	10	0	0
60	0	1.0	0	0	20	10	0	0
61	0	1.0	0	0	0	0	0	0
62	0	1.0	0	0	40	20	0	0
63	0	1.0	0	0	40	20	0	0
64	0	1.0	0	0	75	35	0	0
65	0	1.0	0	0	140	100	0	0
66	0	1.0	0	0	75	35	0	0
67	0	1.0	0	0	0	0	0	0
68	0	1.0	0	0	20	10	0	0
69	0	1.0	0	0	40	20	0	0
70	0	1.0	0	0	20	10	0	0
71	0	1.0	0	0	40	20	0	0

Annexe

72	0	1.0	0	0	0	0	0	0
73	0	1.0	0	0	40	20	0	0
74	0	1.0	0	0	40	20	0	0
75	0	1.0	0	0	40	20	0	0
76	0	1.0	0	0	245	180	0	0
77	0	1.0	0	0	40	20	0	0
78	0	1.0	0	0	0	0	0	0
79	0	1.0	0	0	40	20	0	0
80	0	1.0	0	0	40	20	0	0
81	0	1.0	0	0	0	0	0	0
82	0	1.0	0	0	40	20	0	0
83	0	1.0	0	0	20	10	0	0
84	0	1.0	0	0	20	10	0	0
85	0	1.0	0	0	40	20	0	0
86	0	1.0	0	0	20	10	0	0
87	0	1.0	0	0	40	20	0	0
88	0	1.0	0	0	40	20	0	0
89	0	1.0	0	0	0	0	0	0
90	0	1.0	0	0	40	20	0	0
91	0	1.0	0	0	0	0	0	0
92	0	1.0	0	0	40	20	0	0
93	0	1.0	0	0	0	0	0	0
94	0	1.0	0	0	40	20	0	0
95	0	1.0	0	0	20	10	0	0
96	0	1.0	0	0	20	10	0	0
97	0	1.0	0	0	0	0	0	0
98	0	1.0	0	0	40	20	0	0
99	0	1.0	0	0	40	20	0	0
100	0	1.0	0	0	40	20	0	0
101	0	1.0	0	0	0	0	0	0
102	0	1.0	0	0	20	10	0	0
103	0	1.0	0	0	40	20	0	0
104	0	1.0	0	0	40	20	0	0
105	0	1.0	0	0	0	0	0	0
106	0	1.0	0	0	40	20	0	0
107	0	1.0	0	0	40	20	0	0
108	0	1.0	0	0	0	0	0	0
109	0	1.0	0	0	40	20	0	0
110	0	1.0	0	0	0	0	0	0
111	0	1.0	0	0	20	10	0	0
112	0	1.0	0	0	20	10	0	0
113	0	1.0	0	0	40	20	0	0
114	0	1.0	0	0	20	10	0	0
149	0	1.0	0	0	0	0	0	0
150	2	1.05	0	0	0	0	0	0
151	0	1.0	0	0	0	0	0	0
152	0	1.0	0	0	0	0	0	0
135	0	1.0	0	0	0	0	0	0
195	0	1.0	0	0	40	20	0	0
250	0	1.0	0	0	0	0	0	0
251	0	1.0	0	0	0	0	0	0
160	0	1.0	0	0	20	10	0	0
300	0	1.0	0	0	0	0	0	0
350	0	1.0	0	0	20	10	0	0
197	0	1.0	0	0	0	0	0	0
450	0	1.0	0	0	0	0	0	0
451	2	1.05	0	0	0	0	0	0

610	2	1.05	0	0	0	0	0	0
-----	---	------	---	---	---	---	---	---

A3.2 Modèle d'un nœud groupé

Le modèle général d'un nœud groupé est présenté dans la *Figure A3.2*.

Nom = " xxx "	ParamètresLines = "[Nœud-D, Nœud-A, Résis, Réact, Suscept, Pmax]"
	"[Nœud-D, Nœud-A, Résis, Réact, Suscept, Pmax]"
	...
Paramètres de ligne-i dans le groupe correspondant	"[Nœud-D, Nœud-A, Résis, Réact, Suscept, Pmax]"
	...
	"[Nœud-D, Nœud-A, Résis, Réact, Suscept, Pmax]"

Descriptions des variables d'une ligne i dans le groupe « xxx »

Nœud-D:	Le nom du nœud de départ de la ligne
Nœud-A:	Le nom du nœud d'arrivée de la ligne
Résis:	Résistance totale de la ligne R_l
Réact:	Réactance totale de la ligne X_l
Suscept:	Susceptance totale de la ligne B_s
Pmax:	La puissance maximale de la ligne

Figure A3.2 : modèle d'un nœud groupe

Dans le tableau A3.2 suivant, nous présentons tous les modèles des nœuds groupés du réseau exemple. Les paramètres des lignes dans chaque nœud groupé peuvent être trouvés dans l'annexe 5.

Tableau A3.1 : modèles des nœuds groupés du réseau exemple

Nom de nœud groupé	Paramètres des lignes ne contenant pas de ressources et associés au nœud groupé correspondant
Gr_1	149-1, 1-2, 1-3, 3-4, 3-5, 5-6, 1-7
Gr_2	8-12, 8-13, 8-9, 9-14, 14-10, 14-11, 13-34, 34-15, 15-16, 15-17, 13-18, 18-19, 19-20, 18-21, 21-22, 21-23, 23-24, 23-25, 25-26, 25-28, 28-29, 29-30, 30-250, 250-251, 26-31, 31-32, 26-27, 27-33
Gr_3	135-35, 35-36, 36-37, 36-38, 38-39, 35-40, 40-41, 40-42, 42-43, 42-44, 44-45, 45-46, 44-47, 47-48, 47-49, 49-50, 50-51
Gr_4	151-300, 300-350, 300-108, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112, 112-113, 113-114
Gr_5	105-106, 106-107, 105-101, 101-102, 102-103, 103-104, 101-197, 197-97, 97-98, 98-99, 99-100, 100-450, 97-67, 67-160, 67-68, 68-69, 69-70, 70-71
Gr_6	72-73, 73-74, 74-75, 72-76, 76-77, 77-78, 78-79, 78-80, 80-81, 81-82, 82-83, 81-84, 84-85
Gr_7	86-87, 87-88
Gr_8	89-90, 89-91, 91-92, 91-93, 93-95, 95-96, 99-195
Gr_9	94-54, 54-55, 55-56, 54-53, 53-52, 52-152, 54-57, 57-58, 58-59, 57-60, 60-61, 60-62, 62-63, 63-64, 64-65, 65-66

Annexe 4 : Graphe trouvé en appliquant la méthode de reconfiguration d'un réseau pour le réseau exemple

A4.1 Formes pour exprimer un graphe

Nous avons deux formes pour exprimer un graphe : une forme exprimant un graphe sous une image constituée par des arcs et des sommets ; une autre forme exprimant un graphe sous un fichier texte. Elles sont présentées dans la suite.

Sous une forme d'une image, le graphe est représenté par un arbre dont les branches sont des arcs numérotés.

- Une branche du graphe est un arc qui part d'un sommet à l'autre.
- Un sommet est représenté sous un ovale numéroté.

Sous la forme d'un fichier texte, le graphe est commencé par une accolade ouvrante et terminé par une accolade fermante. Entre les deux accolades, il y a deux sections.

- la première section sert à exprimer les arcs. La forme d'un arc sous le texte est :

$$NumSomD \rightarrow NumSomA \ [label = "NumArc - NomOp"]$$

- la deuxième section sert à exprimer les sommets. La forme d'un sommet normal ou sommet objectif sous le texte est :

$$NumSom \ [label = "NumSom \ n"] \text{ - Sommet normal}$$

$$NumSom \ [label = "NumSom \ n", peripheries = 2] \text{ - Sommet objectif}$$

$NumSomD$: numéro du sommet de départ d'un arc

$NumSomA$: numéro du sommet d'arrivée d'un arc

$NumSom$: numéro d'un sommet

$NumArc$: numéro d'un arc

$NomOp$: nom de l'opération d'un arc

Pour faciliter à comprendre les manières de représentation du graphe présentées ci-dessus, nous montrons ci-dessous un petit exemple d'une image et d'un fichier texte résultat correspondant (*cf. figure A4.1*).

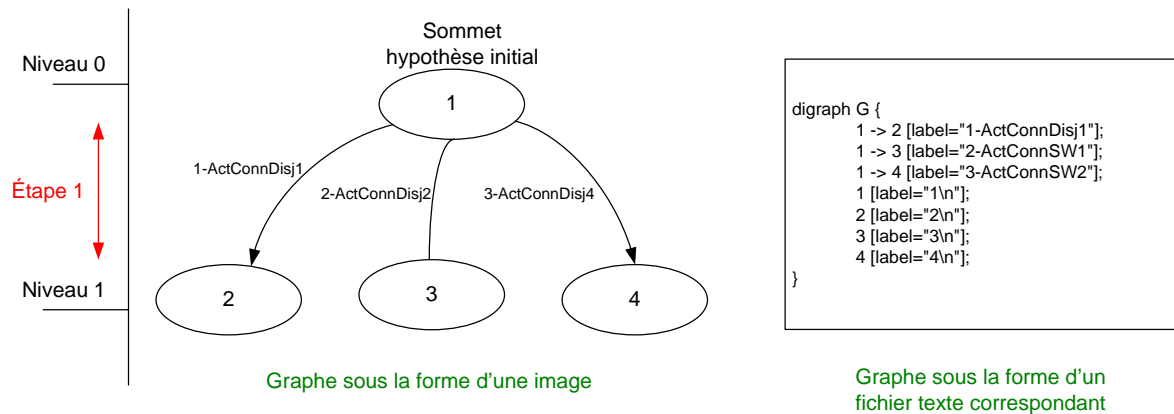


Figure A4.1 : exemple de l'image et du fichier d'un graphe

Dans l'image du graphe sous la forme d'une image (cf. figure A4.1), nous utilisons un indice avec le nom « Niveau » qui indique la taille du graphe par la profondeur. Le premier niveau commence avec le numéro 0 et il correspond au sommet hypothèse initial. La première étape de la construction du graphe part du sommet hypothèse initial vers les sommets du premier niveau du graphe. La deuxième étape de la construction du graphe part des sommets créés après la fin de la première étape de construction du graphe (les sommets du premier niveau du graphe) vers les sommets du deuxième niveau du graphe etc. (cf. chapitre IV, section 4.4.1.2).

A4.2 Graphe trouvé en appliquant la méthode de reconfiguration pour le réseau exemple

Le graphe trouvé est grand, nous montrons ici les premières et les dernières lignes du graphe sous la forme texte, l'image du graphe correspondant est présentée dans la Figure A4.2.

```
digraph G {
  266 -> 267 [label="685-ActConnDisj1"];
  266 -> 268 [label="686-ActConnDisj2"];
  266 -> 269 [label="687-ActConnDisj4"];
  267 -> 270 [label="688-ActConnDisj2"];
  267 -> 271 [label="689-ActConnDisj4"];
  267 -> 272 [label="690-ActConnInt1"];
  268 -> 273 [label="691-ActConnDisj4"];
  268 -> 274 [label="692-ActConnDisj6"];
  268 -> 275 [label="693-ActConnInt4"];
  269 -> 276 [label="694-ActConnInt3"];
  269 -> 277 [label="695-ActConnInt6"];
  270 -> 278 [label="696-ActConnDisj4"];
  270 -> 279 [label="697-ActConnDisj6"];
  270 -> 280 [label="698-ActConnInt1"];
  270 -> 281 [label="699-ActConnInt4"];
  271 -> 282 [label="700-ActConnInt1"];
  271 -> 283 [label="701-ActConnInt3"];
}
```

```
271 -> 284 [label="702-ActConnInt6"];
... ..
... ..
498 [label="498\n"];
499 [label="499\n"];
500 [label="500\n"];
501 [label="501\n"];
502 [label="502\n"];
503 [label="503\n"];
504 [label="504\n"];
505 [label="505\n",peripheries=2];
506 [label="506\n",peripheries=2];
507 [label="507\n",peripheries=2];
508 [label="508\n",peripheries=2];
509 [label="509\n",peripheries=2];
510 [label="510\n",peripheries=2];
511 [label="511\n",peripheries=2];
512 [label="512\n",peripheries=2];
513 [label="513\n",peripheries=2];
514 [label="514\n",peripheries=2];
515 [label="515\n",peripheries=2];
516 [label="516\n",peripheries=2];
517 [label="517\n",peripheries=2];
518 [label="518\n",peripheries=2];
519 [label="519\n",peripheries=2];
520 [label="520\n",peripheries=2];
521 [label="521\n",peripheries=2];
522 [label="522\n",peripheries=2];
523 [label="523\n",peripheries=2];
524 [label="524\n",peripheries=2];
}
```

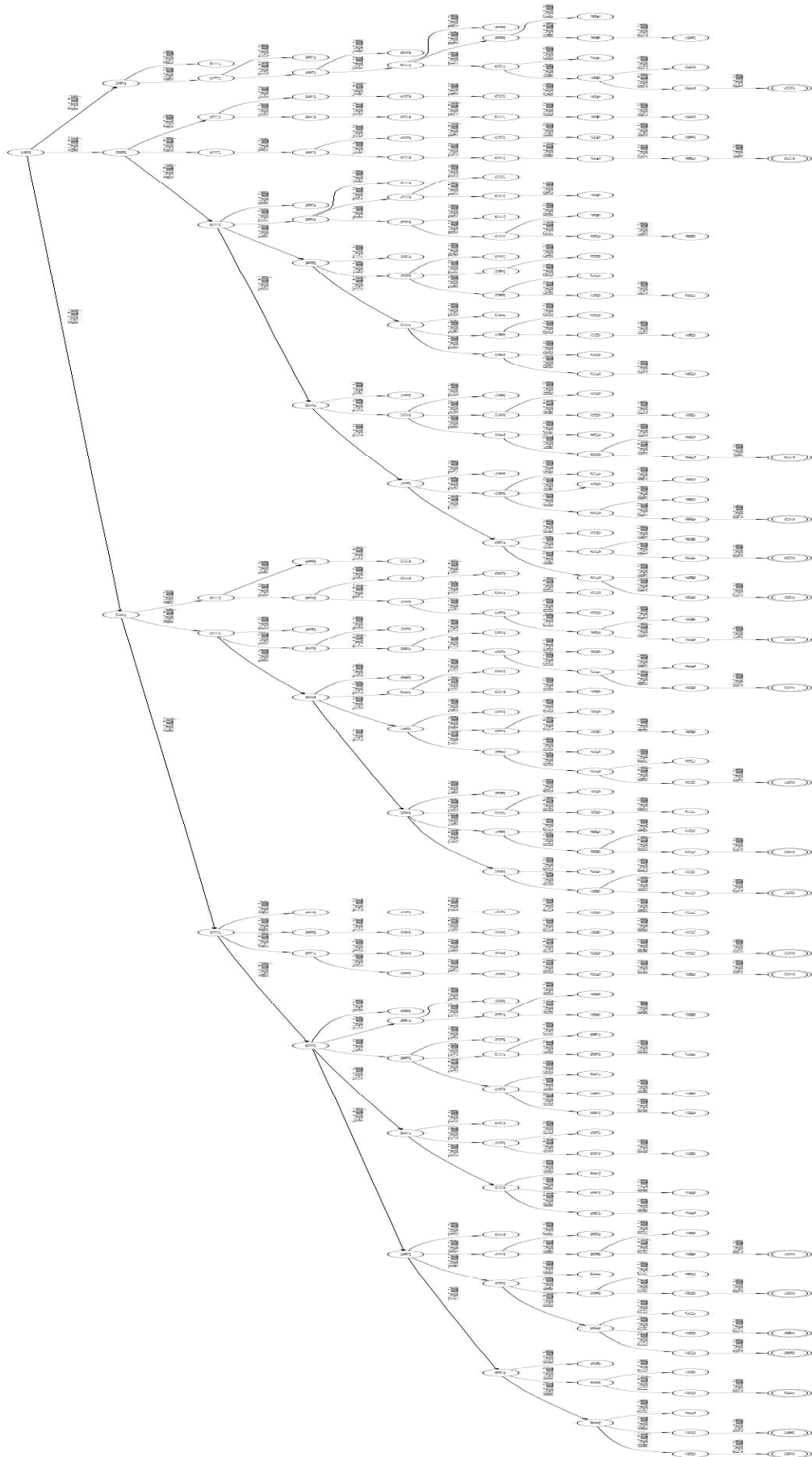


Figure A4.2 : graphe trouvé sous la forme d'une image

Annexe 5 : Trois jeux de données des lignes utilisés pour tester le réseau exemple

Les données des lignes du réseau complet sont constituées par les paramètres des lignes dans les connexions qui contiennent ou ne contiennent pas de ressources. La forme des paramètres d'une ligne est présentée ci-dessous (*cf. Figure A5.1*).

ParamètresLine = "[Nœud-D, Nœud-A, Résis, Réact, Suscept, Pmax]"

Exemple: paramettresLine="[U_8, U_14, 0.07, 0.20, 6.00, 45.64]"

Descriptions des variables d'une ligne

Nœud-D :	Le nom du nœud groupe de départ de la ligne
Nœud-A :	Le nom du nœud groupe d'arrivée de la ligne
Résis :	Résistance totale de la ligne R_l
Réact :	Réactance totale de la ligne X_l
Suscept :	Susceptance totale de la ligne Y_s
Pmax :	La puissance maximale de la ligne

Figure A5.1 : paramètres d'une ligne

Dans la suite, nous allons présenter les trois jeux de données utilisées à tester la méthode correspondant à trois scénarii de reconfiguration du réseau exemple.

A5.1 Premier jeu de données des lignes du réseau complet exemple

Tableau A5.1 : premier jeu de données

Conn	N-D	N-A	Résis	Réact	Suscept Qc	Pmax
1-2	1	2	0.014684975	0.014887153	3.00	190.00
1-3	1	3	0.020978535	0.021267361	3.00	190.00
1-7	1	7	0.020297348	0.042916667	3.00	2300.00
3-4	3	4	0.016782828	0.017013889	3.00	190.00
3-5	3	5	0.027272096	0.027647569	3.00	190.00
5-6	5	6	0.020978535	0.021267361	3.00	190.00
7-8	7	8	0.02	0.06	6.00	2200.00
8-12	8	12	0.018880682	0.019140625	3.00	590.00
8-9	8	9	0.018880682	0.019140625	3.00	590.00
8-13	8	13	0.019689394	0.010511364	3.00	2200.00
9-14	9	14	0.03566351	0.036154514	3.00	590.00
13-34	13	34	0.012587121	0.012760417	3.00	590.00
13-18	13	18	0.055947917	0.124125	3.00	590.00
14-11	14	11	0.020978535	0.021267361	3.00	590.00
14-10	14	10	0.020978535	0.021267361	3.00	590.00
15-16	15	16	0.031467803	0.031901042	3.00	590.00
15-17	15	17	0.029369949	0.029774306	3.00	590.00

Annexe

18-19	18	19	0.020978535	0.021267361	3.00	590.00
18-21	18	21	0.020344697	0.045136364	3.00	590.00
19-20	19	20	0.027272096	0.027647569	3.00	590.00
21-22	21	22	0.044054924	0.044661458	3.00	590.00
21-23	21	23	0.016953914	0.037613636	3.00	590.00
23-24	23	24	0.046152778	0.046788194	3.00	590.00
23-25	23	25	0.018649306	0.041375	3.00	590.00
25-26	25	26	0.020308396	0.047353851	3.00	590.00
25-28	25	28	0.013563131	0.030090909	3.00	590.00
26-27	26	27	0.015956597	0.037206597	3.00	590.00
26-31	26	31	0.018880682	0.019140625	3.00	590.00
27-33	27	33	0.041957071	0.042534722	3.00	590.00
28-29	28	29	0.020344697	0.045136364	3.00	590.00
29-30	29	30	0.02373548	0.052659091	3.00	590.00
30-250	30	250	0.013563131	0.030090909	3.00	590.00
31-32	31	32	0.025174242	0.025520833	3.00	590.00
34-15	34	15	0.008391414	0.008506944	3.00	590.00
35-36	35	36	0.031416667	0.072148359	3.00	810.00
35-40	35	40	0.016914457	0.035763889	3.00	810.00
36-37	36	37	0.025174242	0.025520833	3.00	810.00
36-38	36	38	0.020978535	0.021267361	3.00	810.00
38-39	38	39	0.027272096	0.027647569	3.00	810.00
40-41	40	41	0.027272096	0.027647569	3.00	810.00
40-42	40	42	0.016914457	0.035763889	3.00	810.00
42-43	42	43	0.041957071	0.042534722	3.00	810.00
42-44	42	44	0.013531566	0.028611111	3.00	810.00
44-45	44	45	0.016782828	0.017013889	3.00	810.00
44-47	44	47	0.016914457	0.035763889	3.00	810.00
45-46	45	46	0.025174242	0.025520833	3.00	810.00
47-48	47	48	0.010191288	0.021824811	3.00	810.00
47-49	47	49	0.01698548	0.036374684	3.00	810.00
49-50	49	50	0.01698548	0.036374684	3.00	830.00
50-51	50	51	0.01698548	0.036374684	3.00	870.00
52-53	52	53	0.013531566	0.028611111	3.00	850.00
53-54	53	54	0.008457229	0.017881944	3.00	820.00
54-55	54	55	0.018605903	0.039340278	3.00	620.00
54-57	54	57	0.023779672	0.050924558	3.00	1450.00
54-94	76	77	0.027126263	0.060171717	3.00	820.00
55-56	55	56	0.018605903	0.039340278	3.00	620.00
57-58	57	58	0.020978535	0.021267361	3.00	620.00
57-60	57	60	0.050956439	0.109124053	3.00	1450.00
58-59	58	59	0.020978535	0.021267361	3.00	620.00
60-61	60	61	0.037368056	0.080024306	3.00	1500.00
60-62	60	62	0.055793876	0.026284722	3.00	620.00
62-63	62	63	0.039055713	0.018399306	3.00	620.00
63-64	63	64	0.078111427	0.036798611	3.00	620.00
64-65	64	65	0.09484959	0.044684028	3.00	620.00
65-66	65	66	0.072532039	0.034170139	3.00	620.00
67-68	67	68	0.016782828	0.017013889	3.00	470.00
67-72	67	72	0.06	0.19	5.00	950.00
67-97	67	97	0.01698548	0.036374684	3.00	2550.00
68-69	68	69	0.023076389	0.023394097	3.00	470.00
69-70	69	70	0.027272096	0.027647569	3.00	470.00
70-71	70	71	0.023076389	0.023394097	3.00	470.00
72-73	72	73	0.023076389	0.023394097	3.00	670.00
72-76	72	76	0.013588384	0.029099747	3.00	920.00
73-74	73	74	0.029369949	0.029774306	3.00	670.00

Annexe

74-75	74	75	0.033565657	0.034027778	3.00	670.00
76-77	76	77	0.027126263	0.060171717	3.00	670.00
76-86	76	86	0.07	0.2	6.00	350.00
77-78	77	78	0.006781566	0.015042929	3.00	670.00
78-79	78	79	0.015258523	0.033846591	3.00	670.00
78-80	78	80	0.032212437	0.071453914	3.00	670.00
80-81	80	81	0.032212437	0.071453914	3.00	670.00
81-82	81	82	0.016953914	0.037607323	3.00	670.00
81-84	81	84	0.056642045	0.057421875	3.00	670.00
82-83	82	83	0.016953914	0.037607323	3.00	670.00
84-85	84	85	0.039859217	0.040407986	3.00	670.00
86-87	86	87	0.030517045	0.067693182	3.00	120.00
87-88	87	88	0.014684975	0.014887153	3.00	120.00
87-89	87	89	0.05	0.15	4.00	250.00
89-90	89	90	0.018880682	0.019140625	3.00	210.00
89-91	89	91	0.015258523	0.033846591	3.00	240.00
91-92	91	92	0.025174242	0.025520833	3.00	210.00
91-93	91	93	0.015258523	0.033846591	3.00	250.00
93-94	93	94	0.07	0.2	6.00	250.00
93-95	93	95	0.020344697	0.045128788	3.00	210.00
95-96	95	96	0.016782828	0.017013889	3.00	210.00
95-195	95	195	0.023076389	0.023394097	3.00	210.00
97-98	97	98	0.018684028	0.040012153	3.00	2550.00
97-197	97	197	0.022081124	0.04728709	3.00	2500.00
98-99	98	99	0.037368056	0.080024306	3.00	2600.00
99-100	99	100	0.020382576	0.043649621	3.00	2600.00
100-450	100	450	0.054353535	0.11639899	3.00	2600.00
101-102	101	102	0.018880682	0.019140625	3.00	470.00
101-105	101	105	0.018684028	0.040012153	3.00	2600.00
102-103	102	103	0.027272096	0.027647569	3.00	470.00
103-104	103	104	0.058739899	0.059548611	3.00	470.00
105-106	105	106	0.018880682	0.019140625	3.00	470.00
105-108	105	108	0.06	0.18	4.00	1000.00
106-107	106	107	0.048250631	0.048914931	3.00	470.00
108-109	108	109	0.037761364	0.03828125	3.00	180.00
108-300	108	300	0.067941919	0.145498737	3.00	1000.00
109-110	109	110	0.025174242	0.025520833	3.00	180.00
110-111	110	111	0.048250631	0.048914931	3.00	180.00
110-112	110	112	0.010489268	0.010633681	3.00	180.00
112-113	112	113	0.044054924	0.044661458	3.00	180.00
113-114	113	114	0.027272096	0.027647569	3.00	180.00
135-35	135	35	0.02547822	0.054562027	3.00	810.00
149-1	149	1	0.027063131	0.057222222	3.00	2300.00
152-52	152	52	0.027063131	0.057222222	3.00	850.00
160-67	160	67	0.02373548	0.052650253	3.00	460.00
197-101	197	101	0.01698548	0.036374684	3.00	2550.00
151-300	151	300	0.018649306	0.041368056	3.00	980.00
250-251	250	251	0.018684028	0.040012153	3.00	610.00
300-350	300	350	0.013531566	0.028611111	3.00	200.00
150-149	150	149	0.08	0.24	5.00	2300.00
610-61	610	61	0.02	0.06	6.00	1500.00
51-151	51	151	0.05	0.17	4.00	820.00
451-450	451	450	0.07	0.2	6.00	2600.00
18-135	18	135	0.05	0.15	2.00	850.00
13-152	13	152	0.08	0.24	5.00	950.00

A5.2 Deuxième jeu de données des lignes du réseau complet exemple

Par rapport au premier jeu de données, ce deuxième jeu de données a les différences présentés dans les lignes ci-dessous. Les autres lignes sont conservées à l'identique.

Conn	N-D	N-A	Résis	Réact	Suscept Qc	Pmax
7-8	7	8	0.02	0.06	6.00	2000.00
67-72	67	72	0.06	0.19	5.00	950.00
76-86	76	86	0.07	0.2	6.00	350.00
87-89	87	89	0.05	0.15	4.00	250
93-94	93	94	0.07	0.2	6.00	250.00
105-108	105	108	0.06	0.18	4.00	200.00
150-149	150	149	0.08	0.24	5.00	2200.00
610-61	610	61	0.02	0.06	6.00	1500.00
51-151	51	151	0.05	0.17	4.00	420.00
451-450	451	450	0.07	0.2	6.00	1600.00
18-135	18	135	0.05	0.15	2.00	850.00
13-152	13	152	0.08	0.24	5.00	850.00

A5.3 Troisième jeu de données des lignes du réseau complet exemple

Avec ce cas, nous réduisons tous les valeurs des P_{\max} des connexions dans le tableau suivant par rapport au *tableau A5.1* sous une valeur 40 kW. Les autres lignes sont inchangées.

Conn	N-D	N-A	Résis	Réact	Suscept Qc	Pmax
7-8	7	8	0.02	0.06	6.00	40.00
67-72	67	72	0.06	0.19	5.00	40.00
76-86	76	86	0.07	0.2	6.00	40.00
87-89	87	89	0.05	0.15	4.00	40.00
93-94	93	94	0.07	0.2	6.00	40.00
105-108	105	108	0.06	0.18	4.00	40.00
150-149	150	149	0.08	0.24	5.00	40.00
610-61	610	61	0.02	0.06	6.00	40.00
51-151	51	151	0.05	0.17	4.00	40.00
451-450	451	450	0.07	0.2	6.00	40.00
18-135	18	135	0.05	0.15	2.00	40.00
13-152	13	152	0.08	0.24	5.00	40.00