



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي



كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الكهربائية

Première année Master Réseaux Electriques

Cours:

**Planification des Réseaux
Électriques**

Préparer par :

Dr: MIDA Dris

Année Universitaire 2019/2020



Sommaire

Sommaire

Chapitre I: Les Architectures des Réseaux Electriques

I.1 - Introduction :	1
I.2 - Différents types de réseaux électriques :	1
I.3 - Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ :	3
I.4.- Architectures de Réseaux:	4
I.5.- Architectures des postes de livraison HTB [5]:	6
I.6.-Modes d'alimentation des postes livraisons HTA à comptage BT [5]:	10
I.7.-Les postes de livraison HTA à comptage HT	12
1.8-Les réseaux HTA à l'intérieur du site:	13
1.9.Postes de distribution BT:	25
1.10. Points à retenir:	26
1.11. Les réseaux BT à l'intérieur du site:	26

Chapitre II: Planification de Réseau de Distribution

II.1. Introduction :	37
II.2. La continuité de service :	37
III.3. La qualité de service :	37
II.4. La chute de tension :	38
II.5. Méthodes d'amélioration du plan de la tension :	39
II.6. Limite de tenue thermique des équipements :	40
II.7. Les pertes par effet Joule :	40
II.8. Méthodologie d'étude des réseaux de distribution [12]	41
II.9. Prévision des charges :	42
II.10. Coefficient d'évolution de la charge :	42
II.11. Importance de l'outil informatique pour le calcul des réseaux de distribution :	42
II.12. Le logiciel CARA	43
II.13. Méthodes de calcul des réseaux de distribution:	45

Chapitre III: Planification de Réseau de Distribution HTA

III .1. Définitions:	49
III .2 Schémas directeurs	49
III .3 Objectifs de la planification:	49
III.4. Conclusion	59
Bibliographies	60
Symbole Graphique	61

Chapitre I :

***Les Architectures des
Réseaux Electriques***

I.1 - Introduction :

Le principe du réseau de distribution d'énergie électrique c'est d'assurer le mouvement de cette énergie (active ou réactive) en transitant par des lignes ou câbles HTA (30 et 10 kV) et entre les différents postes de livraison (postes sources HTB/HTA) et les consommateurs BT (400/230 V) [1]. L'architecture d'un réseau de distribution électrique moyenne tension (MT ou HTA) est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise.

Selon la définition de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs. Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution.

Il existe plusieurs types de postes électriques [1].[2]:

- ❖ Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau;
- ❖ Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques HTB,
- ❖ Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur,
- ❖ Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

I.2 - Différents types de réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont partagés en trois types :

I.2.1 - Réseaux de transport et d'interconnexion [3][4]:

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

- ✓ De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport),
- ✓ De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion),
- ✓ La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV,
- ✓ Neutre directement mis à la terre,
- ✓ Réseau maillé.

I.2.2 - Réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions. Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation [3].

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres. Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- ✓ La tension est 90 kV ou 63 kV,
- ✓ Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre,
 - Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV,
 - Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV,
- ✓ Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

I.2.3 - Réseaux de distribution :

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [1],[5].

I.2.3.1 - Réseaux de distribution à moyenne tension :

- ✓ HTA (30 et 10 kV le plus répandu),
- ✓ Neutre à la terre par une résistance,
- ✓ Limitation à 300 A pour les réseaux aériens,
- ✓ Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains,
- ✓ Réseaux souterrains en boucle ouverte.

I.2.3.2 - Réseaux de distribution à basse tension :

- ✓ BTA (230 / 400 V),
- ✓ Neutre directement à la terre,
- ✓ Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

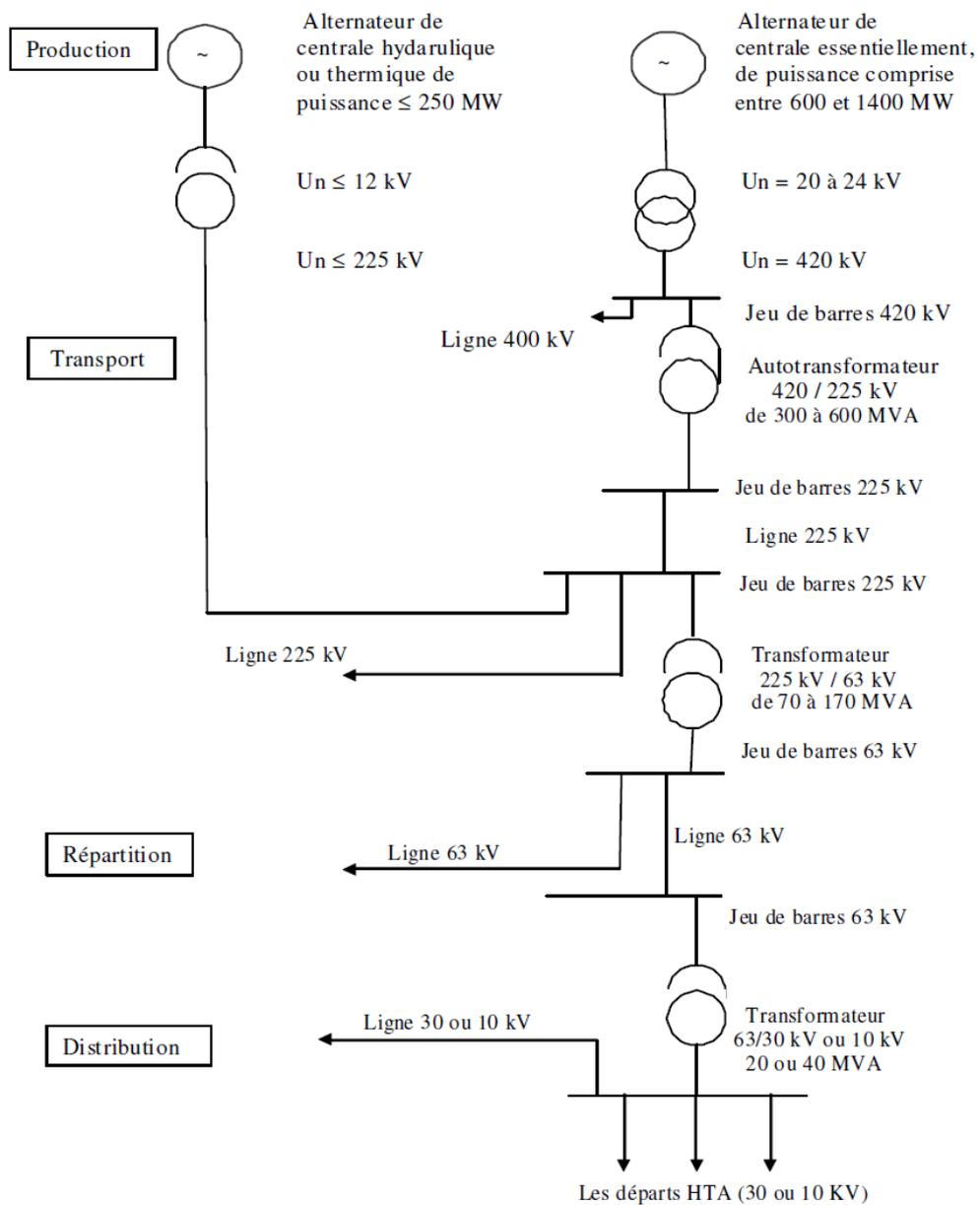


Figure. I.1 - Architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie.

I.3 - Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ :

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative comme suit :

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (U_n en Volts)	
		Tension Alternatif	Tension Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTB	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50\ 000$	$1500 < U_n \leq 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

Tableau I.1 - Tableau des domaines de tension [1].

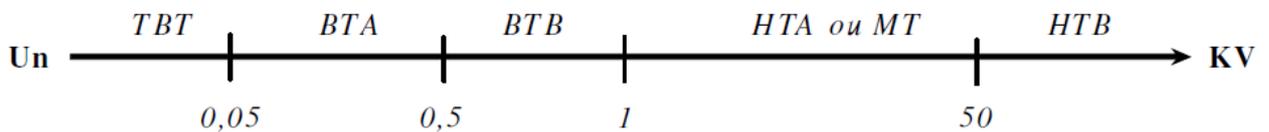


Figure. I.2 - Domaines des tensions électriques utilisées par groupe SONELGAZ [1].

I.4.- Architectures de Réseaux:

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Nous allons identifier les différents postes de livraison HTB et HTA, et la structure des réseaux HTA et BT.

1.4.1. Structure générale d'un réseau privé de distribution:

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte (voir figure suivante) :

- ✚ Un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection
- ✚ Une source de production interne
- ✚ Un ou plusieurs transformateurs HTB / HTA
- ✚ Un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres
- ✚ Un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT
- ✚ Des récepteurs HTA
- ✚ Des transformateurs HTA / BT
- ✚ Des tableaux et des réseaux basse tension
- ✚ des récepteurs basse tension.

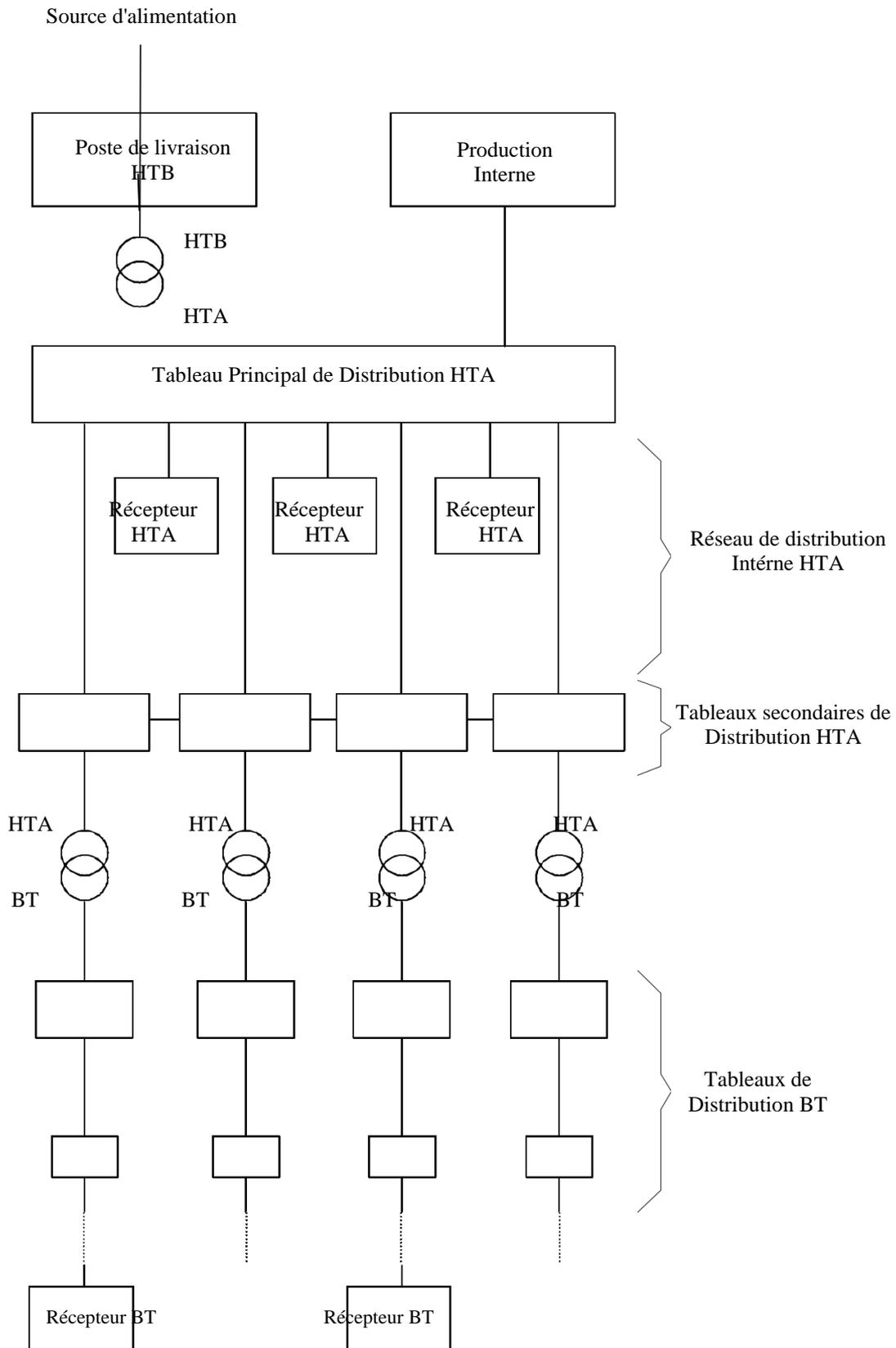


Figure 1-3 : structure générale d'un réseau privé de distribution

1.4.2.. La source d'alimentation:

L'alimentation des réseaux industriels peut être réalisée, soit :

- ❖ En HTB, La tension est supérieure à 50 kV, en général 63 kV, 90 kV ou 225 kV.
- ❖ En HTA, La tension est comprise entre 1 kV et 50 kV, en général 5,5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV ou 33 kV.
- ❖ En BTA, La tension est inférieure à 1 kV, en général 400 V.

La tension de la source d'alimentation est liée à la puissance de livraison. Le tableau suivant indique les niveaux de tensions d'alimentation usuellement choisis en fonction de la puissance souscrite.

tension d'alimentation	puissance de livraison			
	0	250 kVA	10000 kVA	40000 kVA
BTA				
HTA				
HTB 63 kV ou 90 kV				
HTB 225 kV				

Tableau 1-2 : niveaux de tension d'alimentation en fonction de la puissance souscrite

Nota : les puissances associées aux différentes tensions résultent d'études technico-économiques globales qui prennent en compte l'intérêt du client et du distributeur. Les caractéristiques locales du réseau de distribution ou les particularités de l'installation électrique du client peuvent entraîner des modifications à ces choix de niveau de tension.

I.5.- Architectures des postes de livraison HTB [5]:

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA. L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- ✓ D'une part, le point de raccordement au réseau HTB,
- ✓ D'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA,
- ✓ Indice O pour « position ouvert » et F pour « position fermé ».

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

I.5.1- Simple Antenne:

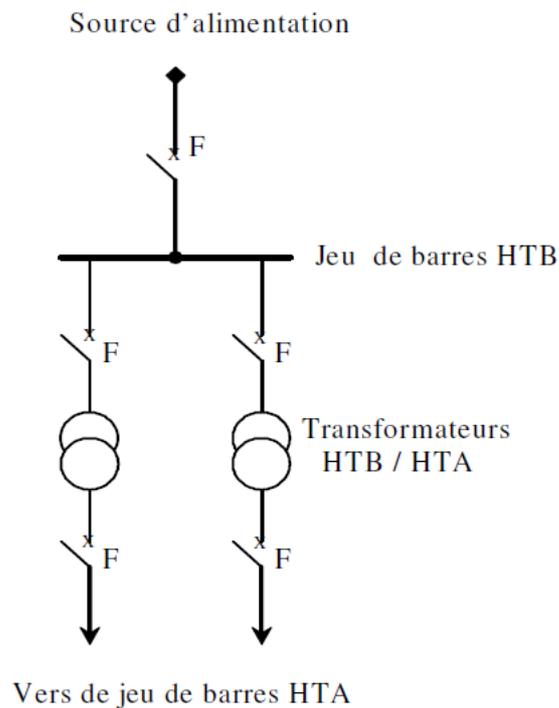


Figure 1-4 : alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

Mode d'exploitation :

Normal :

- Les transformateurs HTB/HTA sont alimentés par un seul jeu de barre HTB.

Perturbé :

- En cas de perte d'une source d'alimentation, les transformateurs HTB/HTA sont mis hors service.

Avantage :

Coût minimal.

Inconvénient :

Disponibilité faible

Nota : les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés.

I.5.2- Double Antenne:

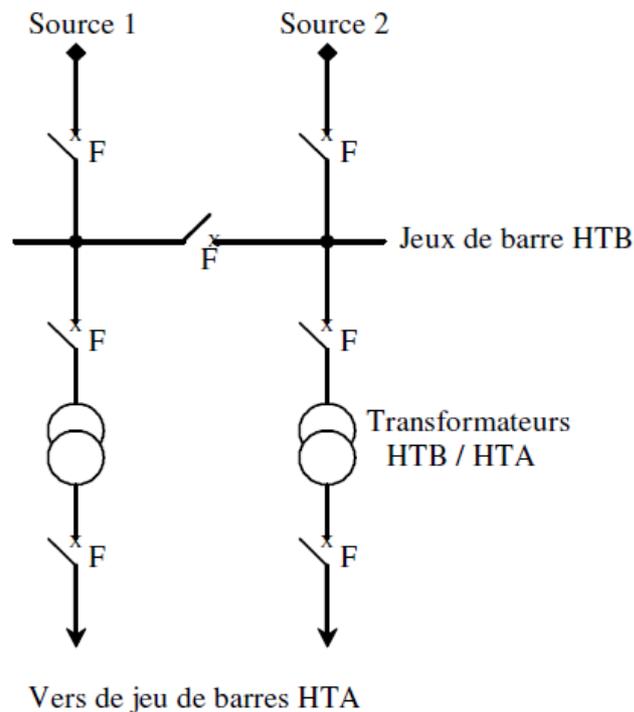


Figure 1-5 : alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

Mode d'exploitation :

Normal :

- ✓ Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage.
- ✓ Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.

Perturbé :

- ✓ En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

Avantages :

- ✓ bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau
- ✓ maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci

Inconvénients :

- ✓ solution plus coûteuse que l'alimentation simple antenne
- ✓ ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci

Nota : les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés.

I.5.3- double antenne - double jeu de barres:

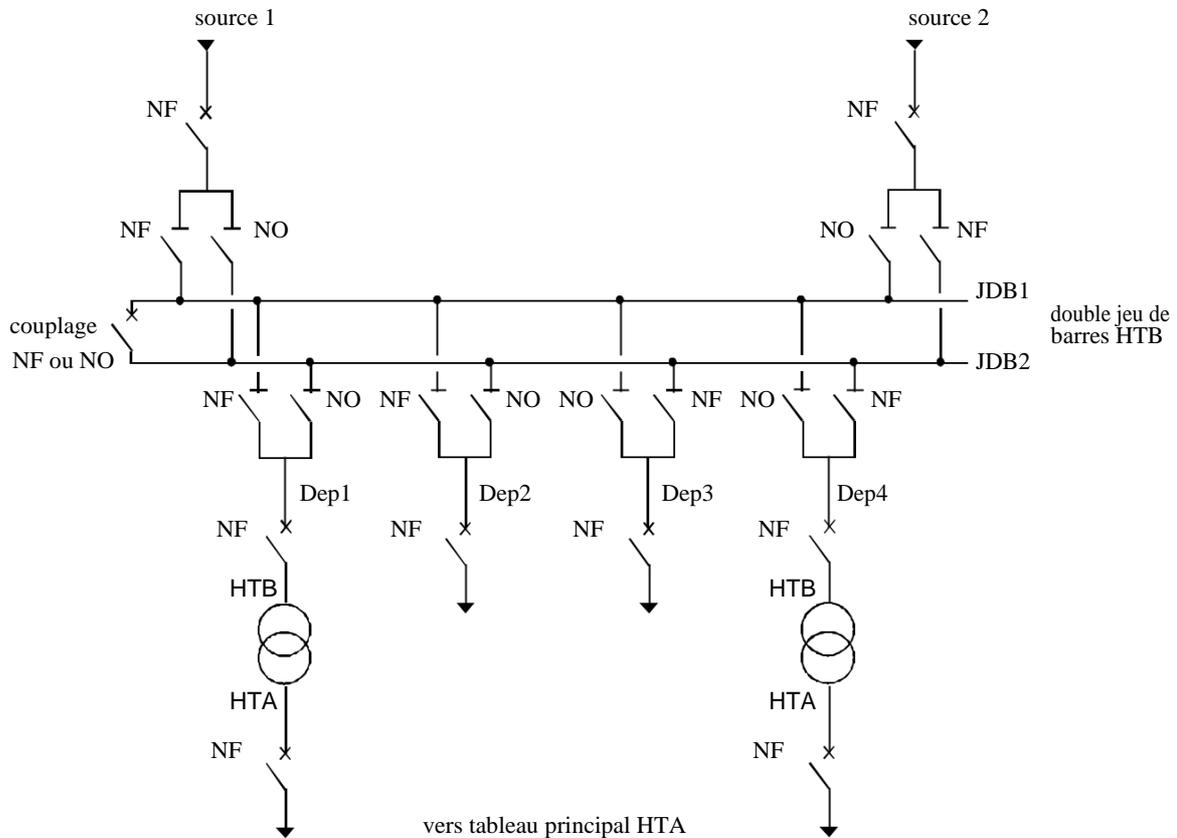


Figure 1-6 : alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB

Mode d'exploitation :

Normal :

- ✓ La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.
- ✓ La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.
- ✓ Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

Perturbé :

- ✓ En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.
- ✓ En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

Avantages :

- ✓ Bonne disponibilité d'alimentation
- ✓ Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- ✓ Possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manoeuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

Inconvénients :

- ✓ Surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres

Nota : les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés.

I.6.-Modes d'alimentation des postes livraisons HTA à comptage BT [5]:

Ils sont régis par la norme NF C 13-100, ils ne comportent qu'un seul transformateur dont le courant secondaire est inférieur ou égal à 2000 A, soit une puissance inférieure ou égale à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V.

I.6.1-Simple Dérivation:

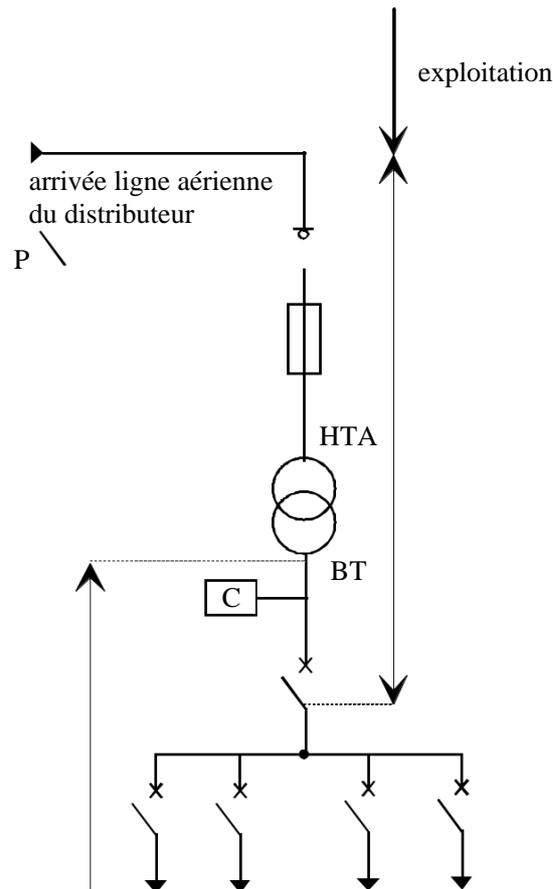


Figure 1-7 : alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1).

Ce type de poste est utilisé en général pour la distribution publique HTA en lignes aériennes, il comporte une seule source d'alimentation possible par le distributeur.

I.6.2-coupure d'artère:

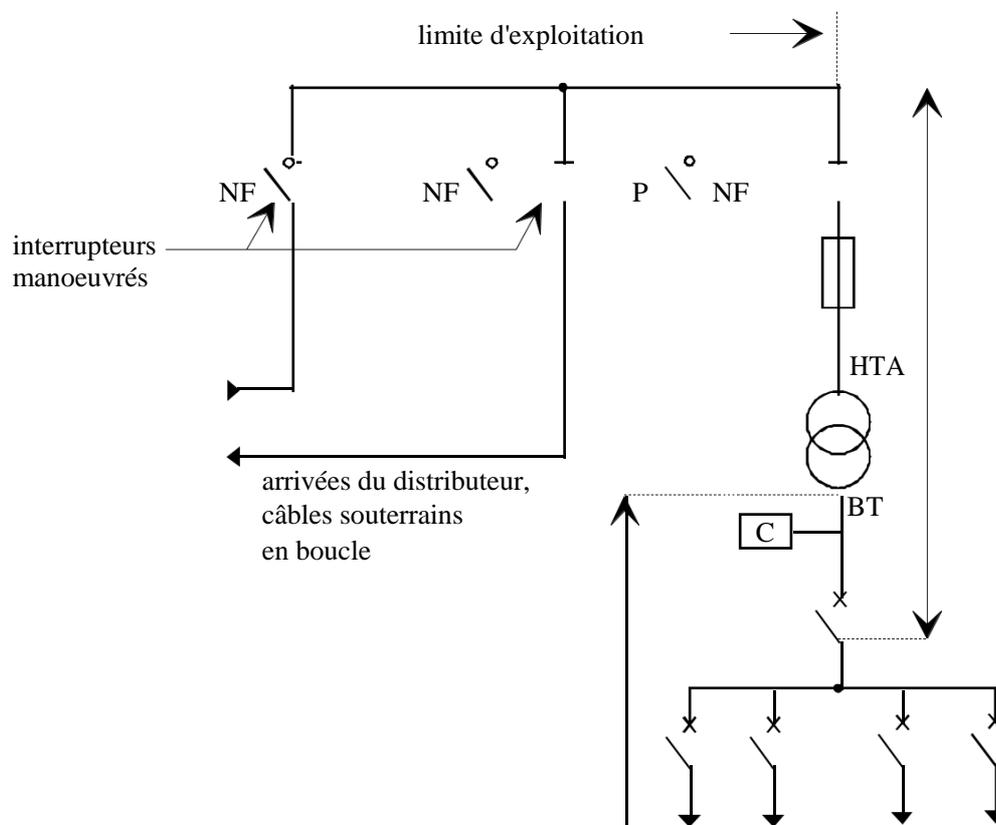


Figure 1-8 : alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1).

Ce type de poste est utilisé pour la distribution publique HTA urbaine en réseaux souterrains, il permet à l'utilisateur de bénéficier d'une source d'alimentation fiable à partir de deux postes sources ou 2 départs HTA, ce qui limite les interruptions pour travaux ou en cas de panne.

I.6.3-double dérivation:

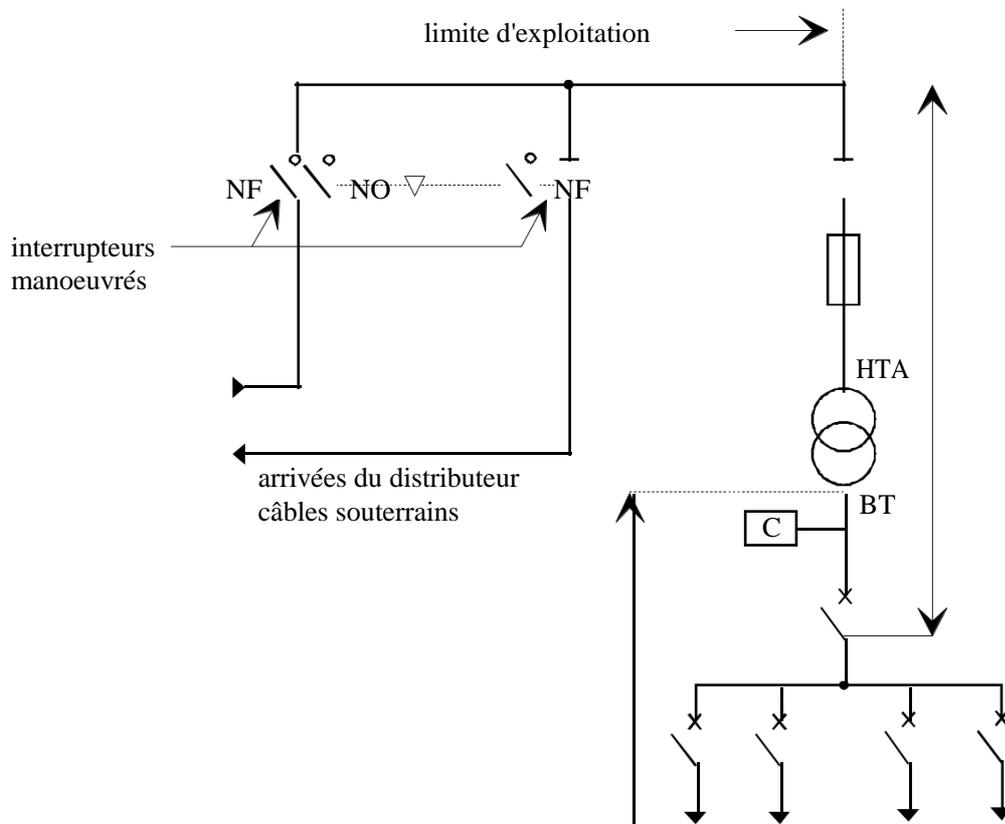


Figure 1-9 : alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1).

Lorsque le réseau public HTA comporte deux câbles souterrains distincts en parallèle, le poste peut être alimenté par l'une ou l'autre de ces deux dérivations.

La permutation d'une alimentation sur l'autre s'effectue lors de la disparition de la tension sur le câble alimentant le poste. Elle est réalisée soit automatiquement, soit manuellement.

Ce schéma, très coûteux pour le distributeur, est utilisé lorsque les exigences de disponibilité sont importantes (le surcoût est généralement payé par l'utilisateur).

I.7.-Les postes de livraison HTA à comptage HT

Ils comportent plusieurs transformateurs ou un seul si son courant secondaire est supérieur à 2000 A (puissance supérieure à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V) et peuvent comporter des départs HTA.

La partie de l'installation allant du point de raccordement au réseau HTA jusqu'au sectionneur d'isolement situé en aval du disjoncteur général est régie par la norme NF C 13-100 ; les jeux de barres, le réseau HTA et les transformateurs sont régis par la norme NF C 13-200.

De façon identique aux postes de livraison à comptage BT, l'alimentation par le distributeur peut être en simple dérivation, coupure d'artère ou double dérivation.

I.7.1-Exemple de Schéma:

Poste de livraison avec une alimentation en coupure d'artère comportant 2 transformateurs et 2 départs HTA.

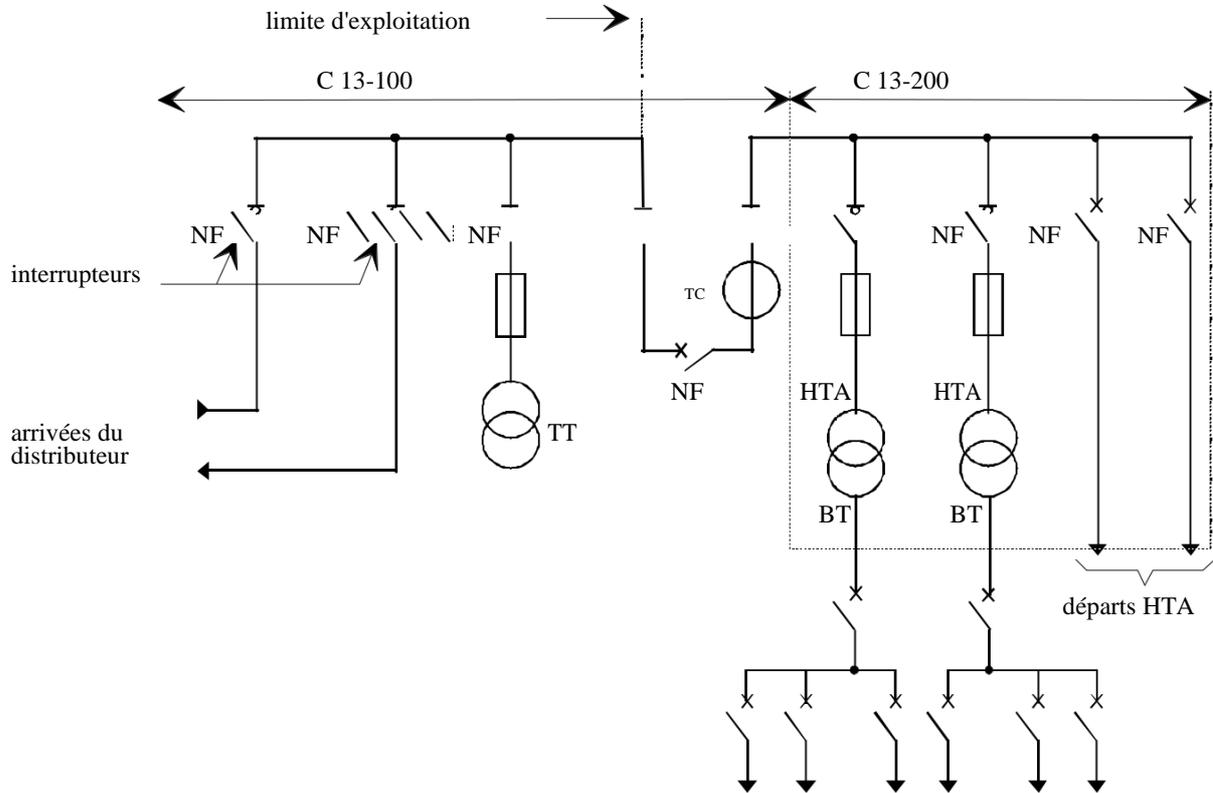


Figure 1-10 : exemple de poste de livraison HTA à comptage HT

Le comptage HT est réalisé grâce au TT (transformateur de tension) et au TC (transformateur de courant).

Le transformateur de courant possède généralement un deuxième secondaire utilisé pour la protection contre les surintensités.

1.8-Les réseaux HTA à l'intérieur du site:

Les réseaux HTA sont composés de tableaux et de liaisons alimentant ces tableaux. Nous allons d'abord étudier les différents modes d'alimentation des tableaux, puis les différentes structures des réseaux permettant d'alimenter ces tableaux.

Nota: les sectionneurs d'isolement et les systèmes de débrogage permettant d'effectuer la maintenance de l'installation ne sont pas représentés sur les schémas.

1.8.1. Modes d'alimentation des tableaux HTA

Nous allons identifier les principales solutions d'alimentation d'un tableau HTA, indépendamment de son emplacement dans le réseau. Le nombre de sources et la complexité du tableau diffèrent suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré.

Les schémas sont classés dans un ordre tel que la sûreté de fonctionnement s'améliore tandis que le coût d'installation augmente.

1.8.1.1-Un jeu de barres avec une source d'alimentation:

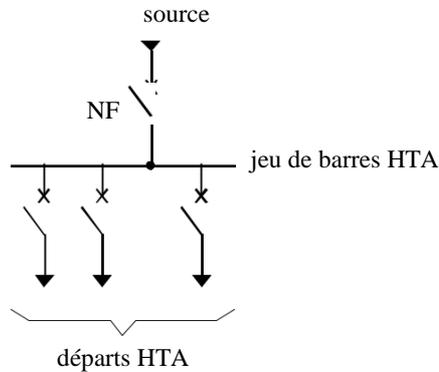


Figure 1-11 :: 1 jeu de barres, 1 source d'alimentation

Fonctionnement :

en cas de perte de la source d'alimentation, le jeu de barres est hors service jusqu'à l'opération de réparation.

1.8.1.2-Un jeu de barres sans couplage avec deux sources d'alimentation:

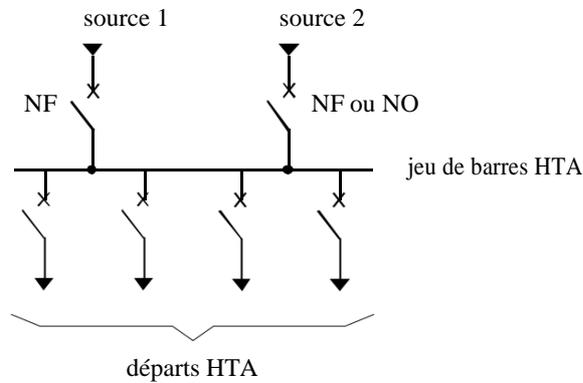


Figure 1-12: 1 jeu de barres sans couplage, 2 sources d'alimentation

Fonctionnement :

les deux sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours de l'autre. En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés.

1.8.1.3-deux jeux de barres avec couplage et deux sources d'alimentations:

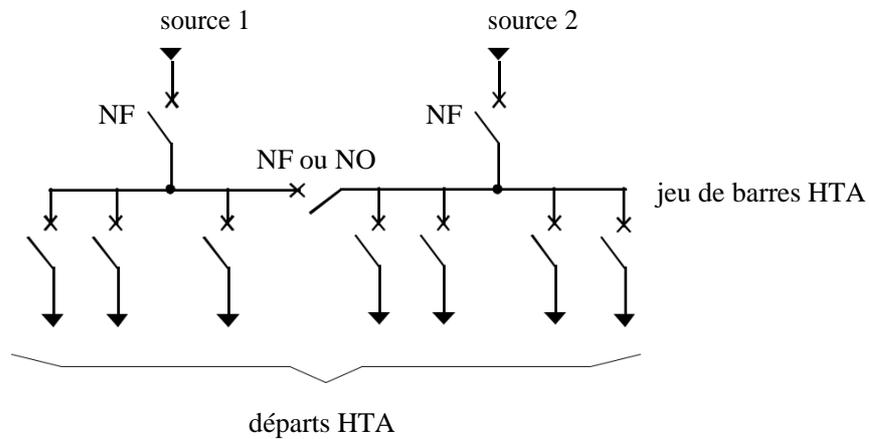


Figure 1-13: 2 demi-jeux de barres avec couplage, 2 sources d'alimentations

Fonctionnement :

- ✓ Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.
- ✓ S'il est ouvert, chaque source alimente un demi - jeu de barres. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé et l'autre source alimente les 2 demi jeux de barres.
- ✓ En cas de défaut sur un demi jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimentée.

1.8.1.4-Un jeu de barres sans couplage et trois sources d'alimentation:

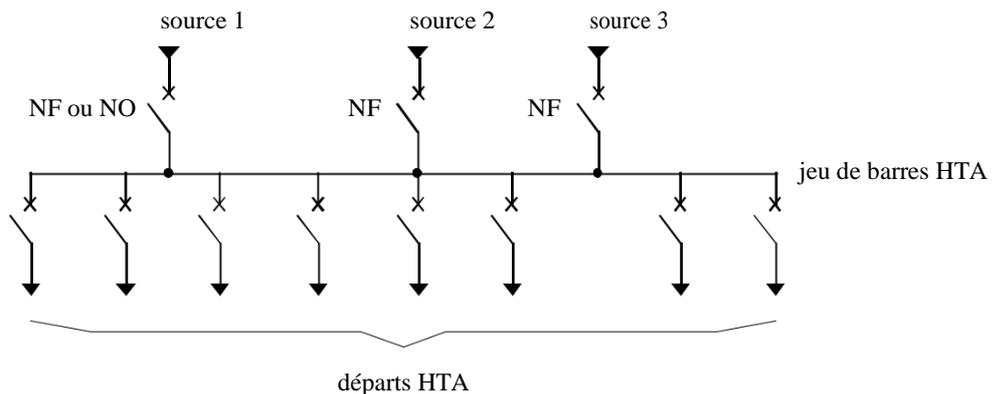


Figure 1-14: 1 jeu de barres sans couplage, 3 sources d'alimentation

Fonctionnement :

- ✓ Les 3 sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours des deux autres.
- ✓ En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés.

1.8.1.5-Trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation:

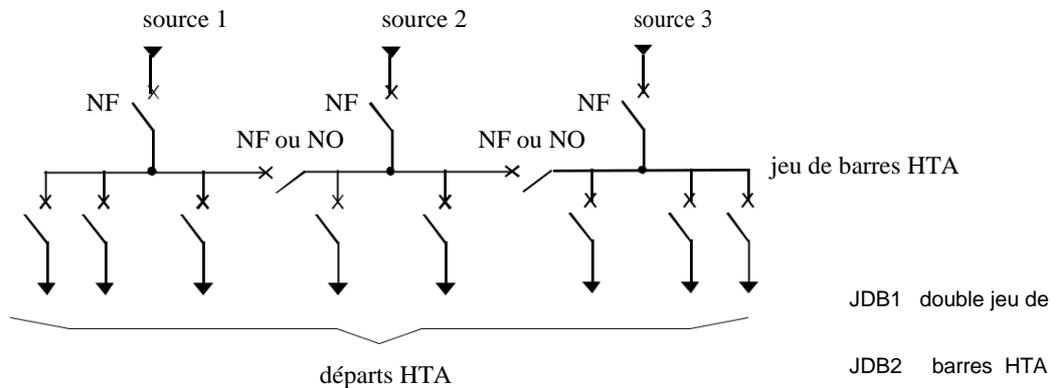


Figure 1-15: 3 sections de barres avec couplages, 3 sources d'alimentation

Fonctionnement :

- ✓ les 2 disjoncteurs de couplage peuvent être maintenus ouverts ou fermés.
- ✓ S'ils sont ouverts, chaque source alimente sa section de barres. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage associé est fermée, une source alimente 2 sections de barres et l'autre 1 section de barres.
- ✓ En cas de défaut sur une section de barres (ou maintenance de celle-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimentée.

1.8.1.6-Sources et départs en "duplex" :

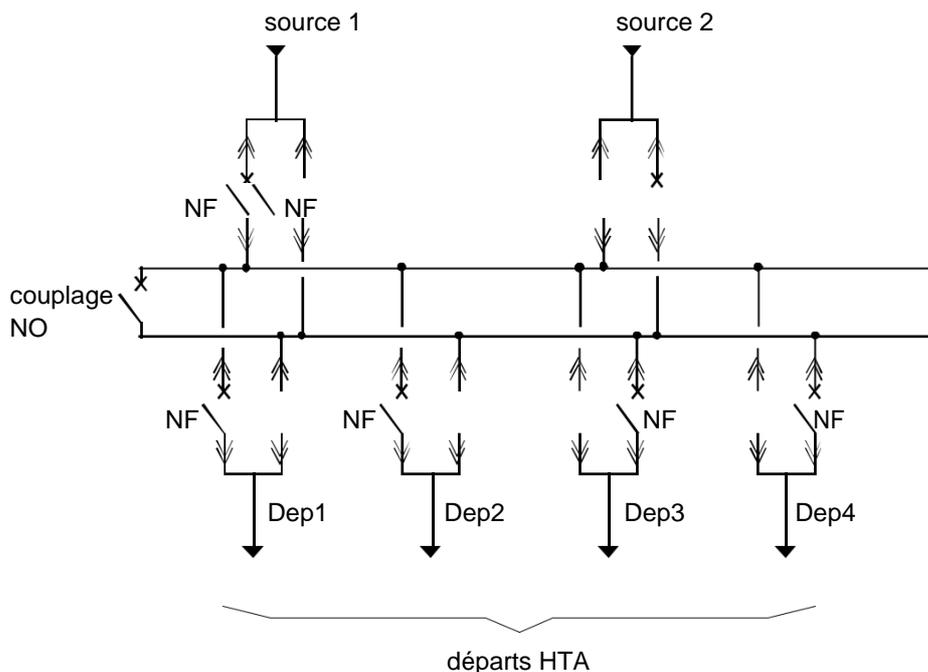


Figure 1-16: Sources et départs en "duplex"

Fonctionnement :

- ✓ le disjoncteur de couplage est maintenu ouvert en fonctionnement normal.
- ✓ Chaque source peut alimenter l'un ou l'autre des jeux de barres par ses deux cellules disjoncteur débroschables. Par souci d'économie, il n'y a qu'un seul disjoncteur pour les 2 cellules débroschables qui sont installées tête-bêche. On peut ainsi facilement déplacer le disjoncteur d'une cellule à l'autre. Ainsi, si l'on veut que la source 1 alimente le jeu de barres JDB2, on déplace le disjoncteur dans l'autre cellule associée à la source 1.
- ✓ Le même principe est mis en place pour les départs. Ainsi, à chaque départ sont associées deux cellules débroschables et un seul disjoncteur. Chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des jeux de barres suivant l'emplacement du disjoncteur. Par exemple, la source 1 alimente le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2. La source 2 alimente le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.
- ✓ En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.
- ✓ En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et chaque disjoncteur est placé sur le jeu de barres en service, afin que tous les départs soient alimentés.
- ✓ L'inconvénient du système "duplex" est qu'il ne permet pas les permutations automatiques. En cas de défaut, chaque permutation à effectuer dure plusieurs minutes et nécessite la mise hors tension des jeux de barres.

1.8.1.7-Deux jeux de barres avec deux attaches par départ et deux sources d'alimentation:

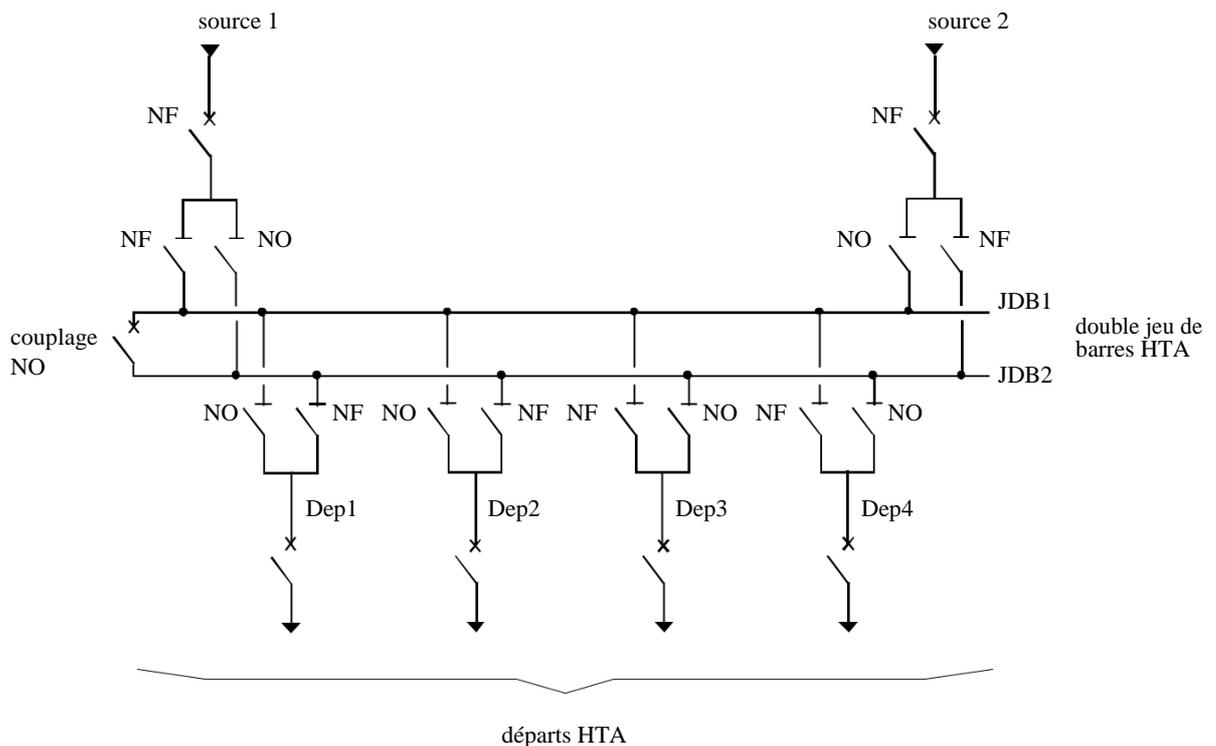


Figure 1-17: 2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation

Fonctionnement :

- ✓ le disjoncteur de couplage est maintenu ouvert en fonctionnement normal.
- ✓ Chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des jeux de barres suivant l'état des sectionneurs qui lui sont associés, un seul sectionneur par départ doit être fermé.
- ✓ Par exemple, la source 1 alimente le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2. La source 2 alimente le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.
- ✓ En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.
- ✓ En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

1.8.1.8-Deux doubles jeux de barres couplés entre eux:

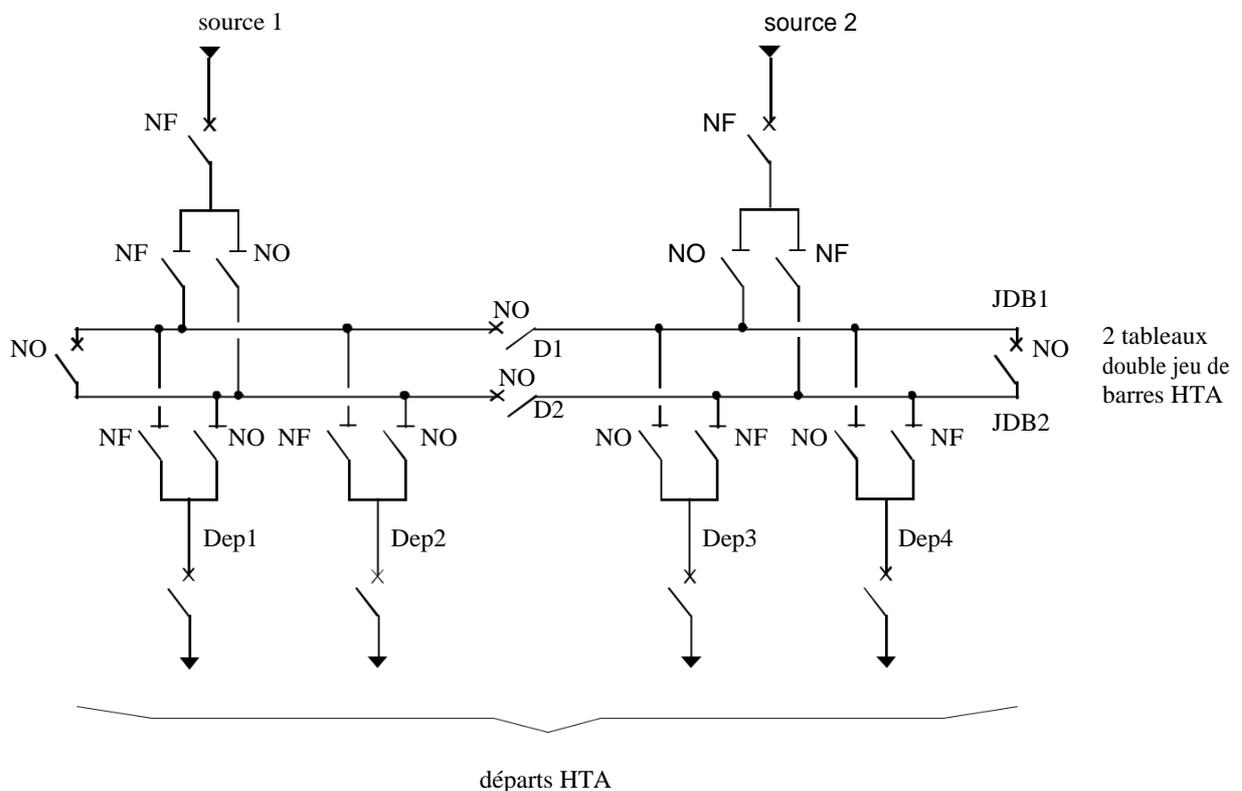


Figure 1-18: 2 doubles jeux de barres couplés entre eux

Fonctionnement :

- ✓ il est presque identique au schéma précédent (2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation). La décomposition du double jeux de barres en 2 tableaux avec couplage (par D1 et D2) permet une plus grande souplesse d'exploitation.
- ✓ Chaque jeu de barres alimente un nombre de départs moins important en fonctionnement normal.

1.8.2-Architectures des réseaux HTA:

Nous allons identifier les principales structures de réseaux HTA permettant d'alimenter les tableaux secondaires et les transformateurs HTA / BT. La complexité de la structure diffère suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré.

Les schémas électriques des réseaux HTA les plus souvent rencontrés sont les suivants :

1.8.2.1-Radial en simple antenne:

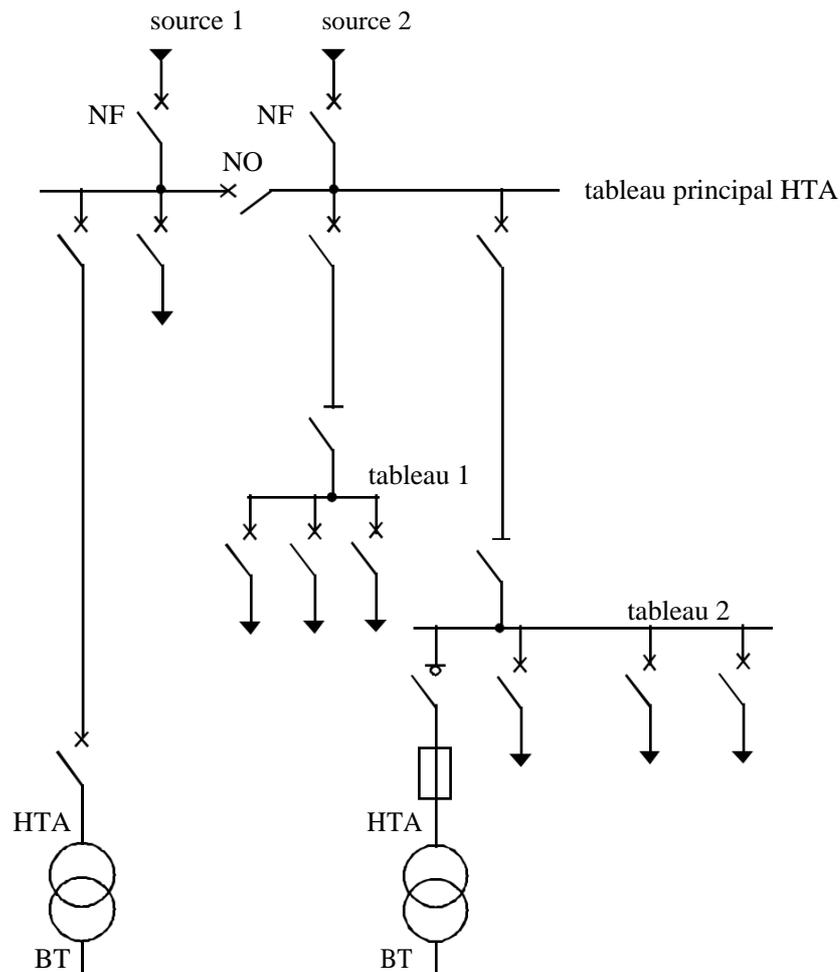


Figure 1-19: réseau HTA radial en simple antenne

Fonctionnement :

- ✓ les tableaux 1 et 2 et les transformateurs sont alimentés par une seule source, il n'y a pas de solution de dépannage
- ✓ cette structure est préconisée lorsque les exigences de disponibilité sont faibles, elle est souvent retenue pour les réseaux de cimenterie.

1.8.2.2-Radial en double antenne sans couplage:

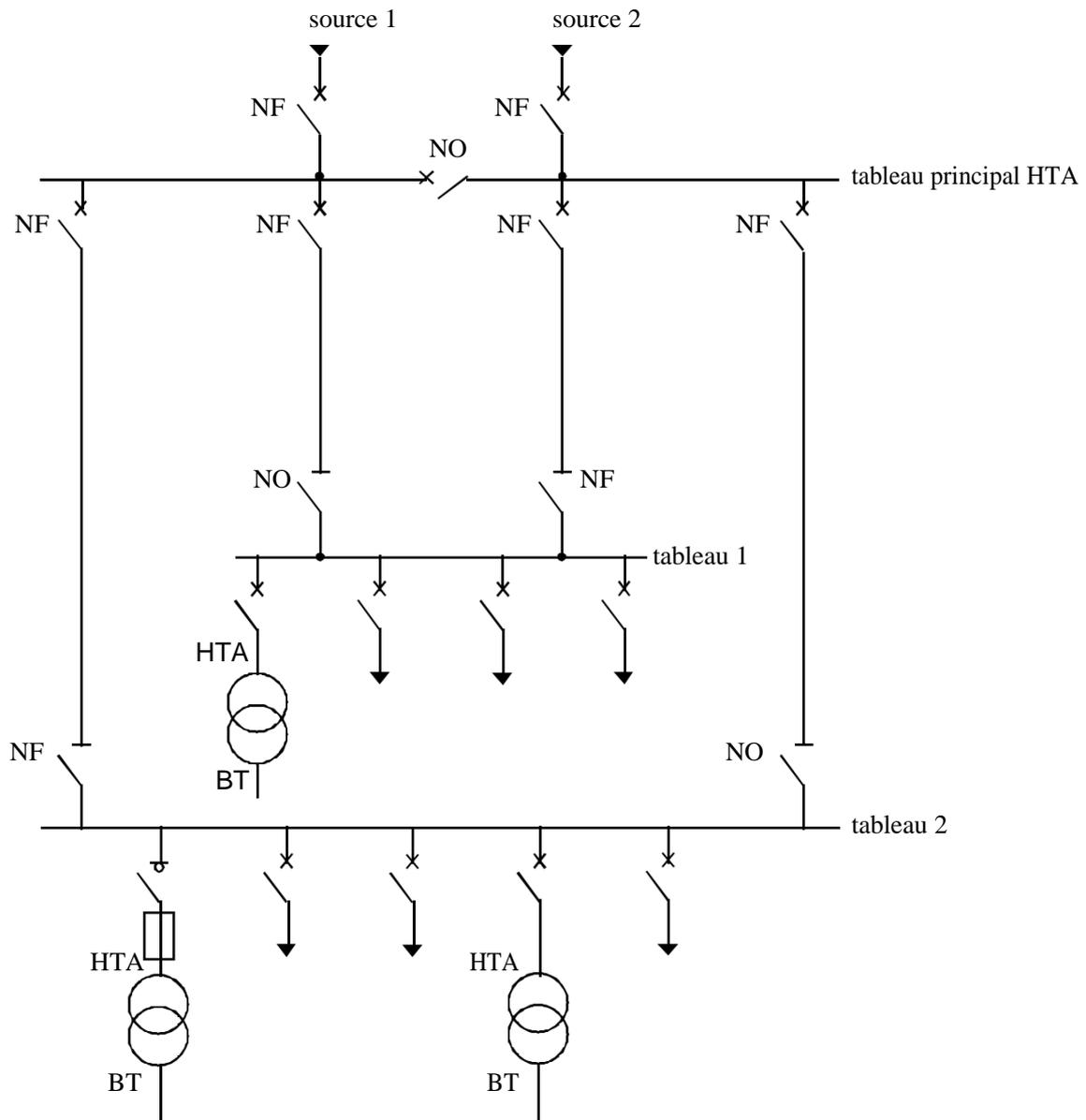


Figure 1-20: réseau HTA radial en double antenne sans couplage

Fonctionnement :

- ✓ les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources sans couplage, l'une en secours de l'autre
- ✓ la disponibilité est bonne
- ✓ l'absence de couplage des sources pour les tableaux 1 et 2 entraîne une exploitation moins souple.

1.8.2.3- Radial en double antenne avec couplage:

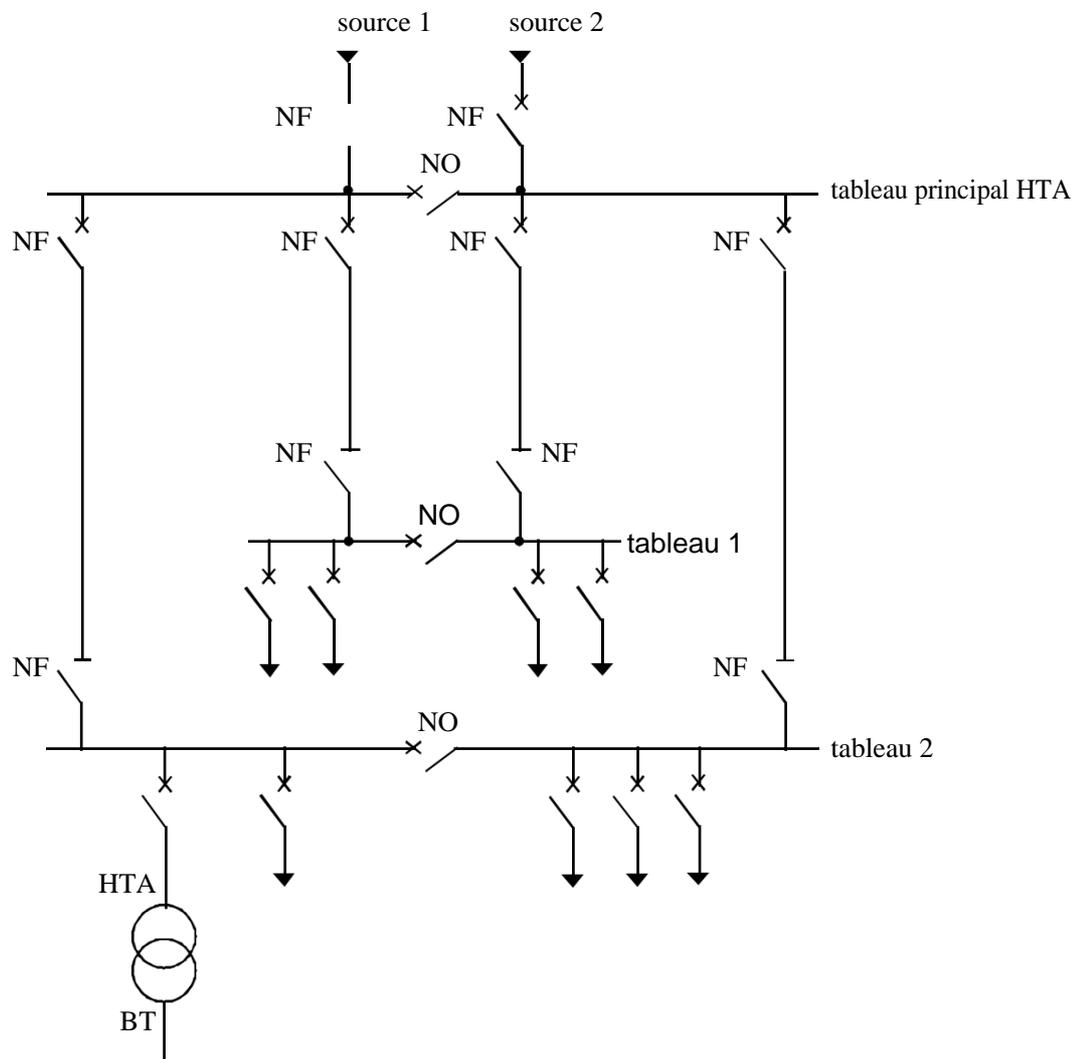


Figure 1-21: réseau HTA radial en double antenne avec couplage

Fonctionnement :

- ✓ Les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources avec couplage. En fonctionnement normal, les disjoncteurs de couplage sont ouverts.
- ✓ Chaque demi jeu de barres peut être dépanné et être alimenté par l'une ou l'autre des sources
- ✓ Cette structure est préconisée lorsqu'une bonne disponibilité est demandée, elle est souvent retenue dans les domaines de la sidérurgie et de la pétrochimie

1.8.2.4 En boucle ouverte:

Cette solution est bien adaptée aux réseaux étendus avec des extensions futures importantes.

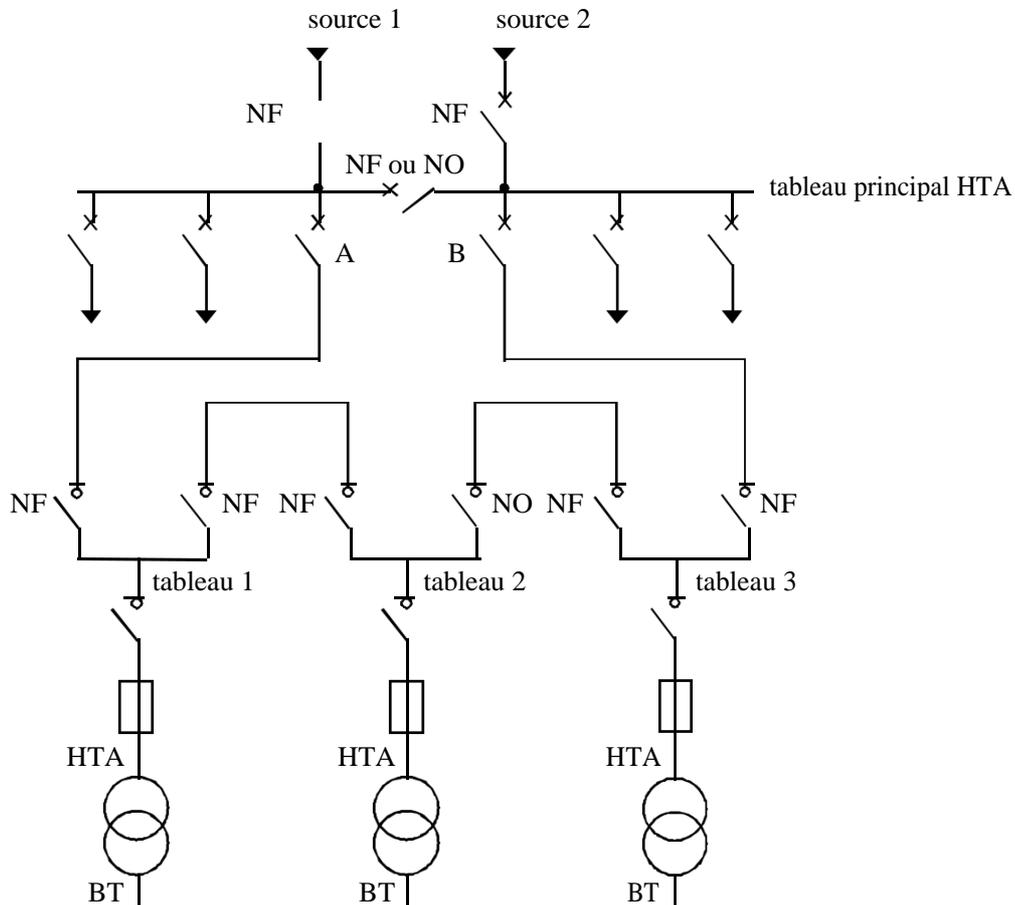


Figure 1-22: réseau HTA en boucle ouverte

Fonctionnement :

- ✓ les têtes de boucle en A et B sont équipées de disjoncteurs.
- ✓ les appareils de coupure des tableaux 1, 2 et 3 sont des interrupteurs.
- ✓ En fonctionnement normal, la boucle est ouverte (sur la figure, elle est ouverte au niveau du tableau 2).
- ✓ Les tableaux peuvent être alimentés par l'une ou l'autre des sources.
- ✓ Un défaut sur un câble ou la perte d'une source est palié par une reconfiguration de la boucle. Cette reconfiguration engendre une coupure d'alimentation de quelques secondes si un automatisme de reconfiguration de boucle est installé. La coupure est d'au moins plusieurs minutes ou dizaines de minutes si la reconfiguration de boucle est effectuée manuellement par le personnel d'exploitation.

1.8.2.5- En boucle fermée:

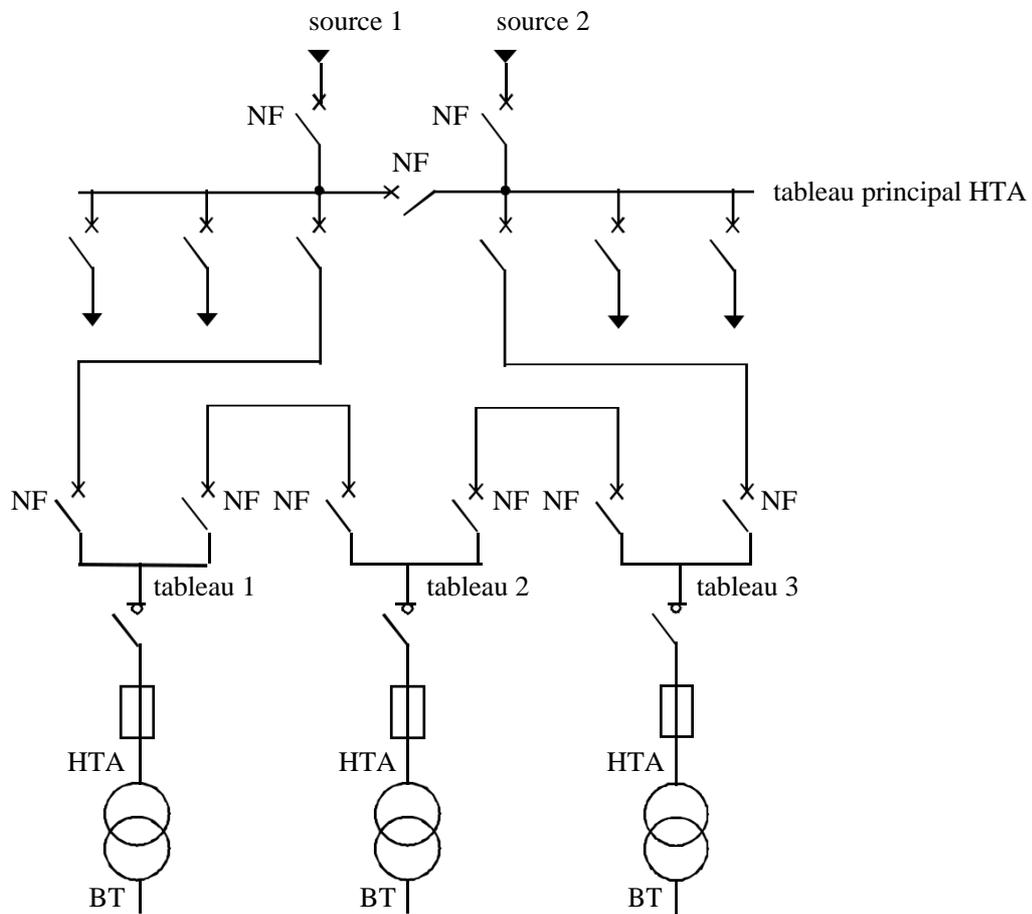


Figure 1-23: réseau HTA en boucle fermée

Fonctionnement :

- ✓ Tous les appareils de coupure de la boucle sont des disjoncteurs.
- ✓ En fonctionnement normal, la boucle est fermée .
- ✓ Le système de protection permet d'éviter les coupures d'alimentation lors d'un défaut.
- ✓ Cette solution est plus performante que le cas de la boucle ouverte car elle évite les coupures d'alimentation.
- ✓ Par contre, elle est plus onéreuse car elle nécessite des disjoncteurs dans chaque tableau et un système de protection plus élaboré.

1.8.2.6- En double dérivation:

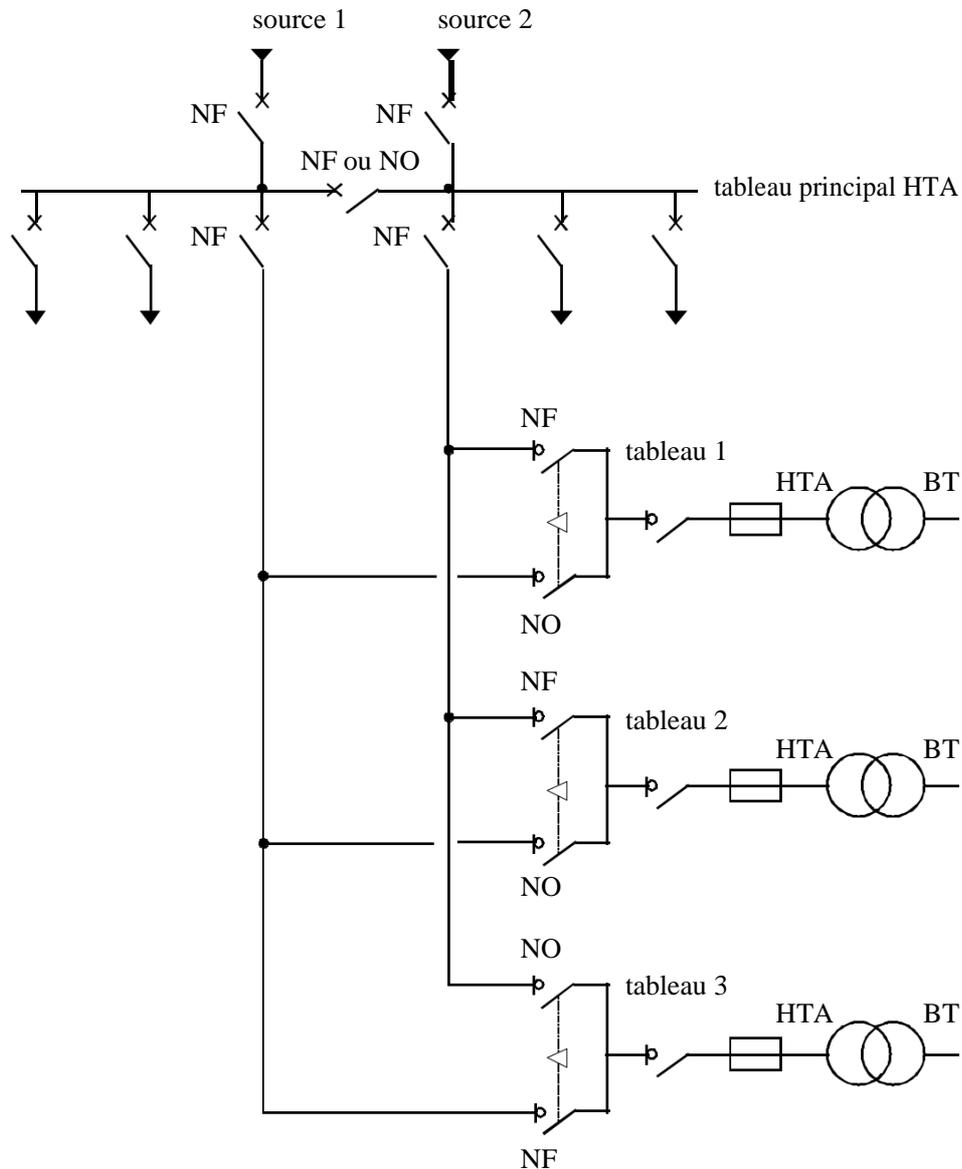


Figure 1-24: réseau HTA en double dérivation

Fonctionnement :

- ✓ Les tableaux 1, 2 et 3 peuvent être dépannés et être alimentés par l'une ou l'autre des sources indépendamment
- ✓ Cette structure est bien adaptée aux réseaux étendus avec des extensions futures limitées et nécessitant une très bonne disponibilité.

1.9. Postes de distribution BT:

Les postes de distribution basse tension (MT/BT) sont relativement plus simples. En terme de puissance, se sont des postes qui ne dépasse pas 10 MW. selon leurs puissances ils peuvent être soit mis sur poteaux (en zones rural surtout ou semi urbaine) soit dans des cellules maçonnés (zone urbaine). La Figure suivante montre deux schémas de poste de distribution BT [6];

1.9.1. Poste MT/BT en zone rural ou semi urbaine:

- ✚ Le poste est alimenté côté MT par une arrivée aérienne simple, et alimente un ou plusieurs départ BT ;
- ✚ L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- ✚ Le poste est soit mis sur le poteau pour des puissances faible (inférieures ou égale à 160 kVA, 63, 100,160 kVA), soit dans une cellule au bas du poteau pour des puissances plus grandes 250 ou 400 kVA.

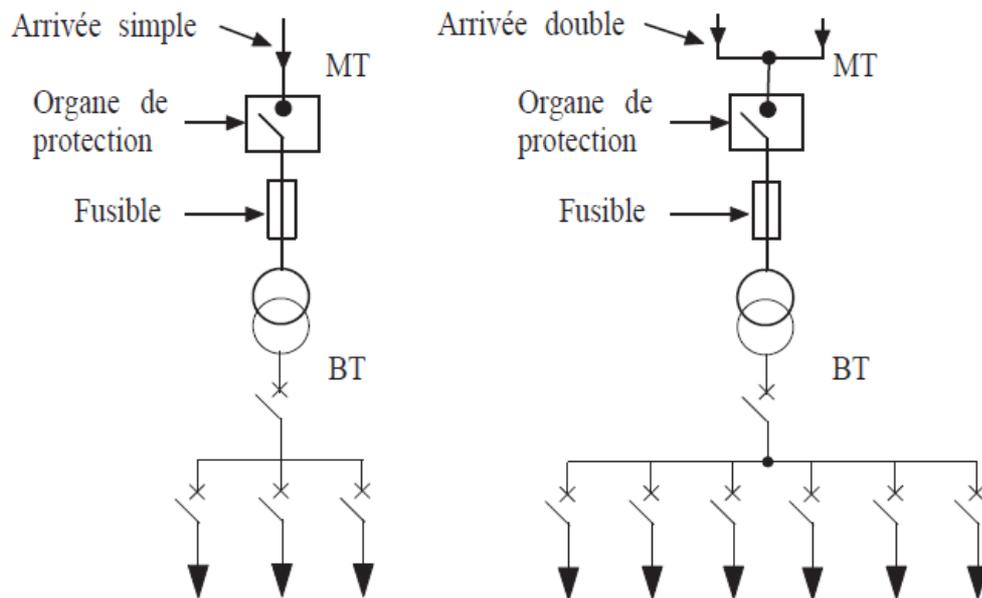


Figure 1-25: Postes de distribution basse tension.

1.9.2. Poste MT/BT en zone urbaine:

- ✚ Le poste est alimenté côté MT par une arrivée souterraine en double dérivation ou en coupure d'artère. Côté BT, souvent plusieurs départs ;
- ✚ L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- ✚ Le poste est obligatoirement mis en cellule maçonnée.

1.10. Points à retenir:

- Les points essentiels à retenir sur l'architecture des réseaux peuvent être résumés comme suit
1. L'architecture d'un poste électrique est dictée par les nombres et les dispositions des jeux de barres et des disjoncteurs ;
 2. Plusieurs jeux de barres ou tronçons de barres améliore la fiabilité du poste mais augmente ses coûts de réalisation et de maintenance ;
 3. Il y a deux architectures principales pour les postes électriques ; Architecture à couplage de barres, et architecture à couplage de disjoncteurs. Celle-ci est meilleure de point de vue fiabilité mais elle coûte souvent cher ;
 4. Le réseau de transport est souvent maillé, alors que le réseau de distribution MT est souvent bouclé. Néanmoins, on peut trouver des structures radiales simples ;
 5. La distribution MT se fait souvent en double dérivation ou en coupure d'artère pour les milieux urbains et en simple dérivation pour les zones rurales ;

1.11. Les réseaux BT à l'intérieur du site:

Nous allons d'abord étudier les différents modes d'alimentation des tableaux basse tension. Ensuite, nous étudierons les schémas d'alimentation des tableaux secourus par des groupes électrogènes ou par une alimentation sans interruption[7].

1.11.1. Modes d'alimentation des tableaux BT:

Nous allons identifier les principales solutions d'alimentation d'un tableau BT, indépendamment de son emplacement dans le réseau. Le nombre de sources d'alimentation possibles et la complexité du tableau diffèrent suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré.

1.11.1.1-Des tableaux BT avec une seule source d'alimentation:

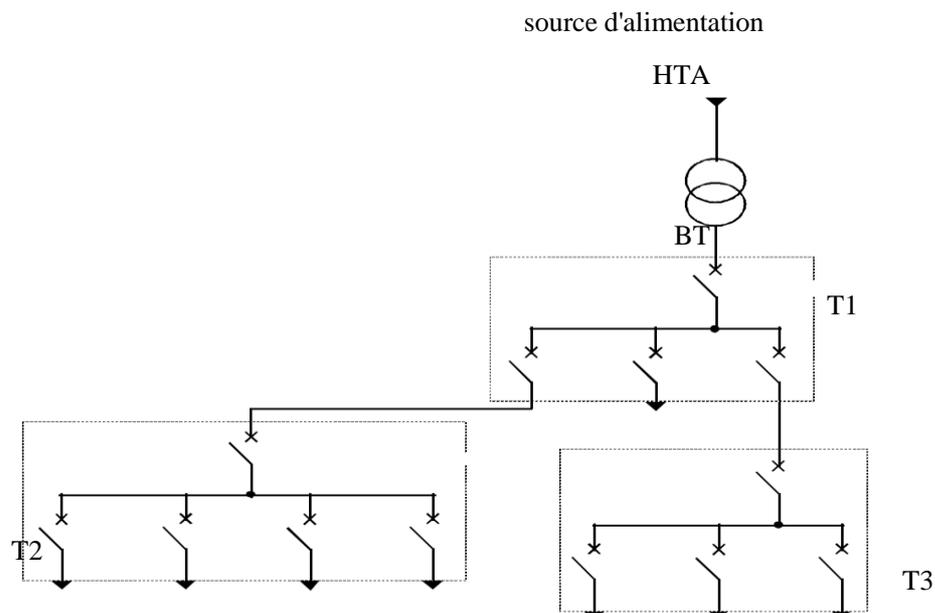


Figure 1-26: alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation

- ✓ Les tableaux T1, T2, T3 bénéficient d'une seule source d'alimentation. Le réseau est dit de type radial arborescent.
- ✓ En cas de perte de la source d'alimentation d'un tableau, celui-ci est hors service jusqu'à l'opération de réparation.

1.11.1.2- Des tableaux BT par une double alimentation sans couplage:

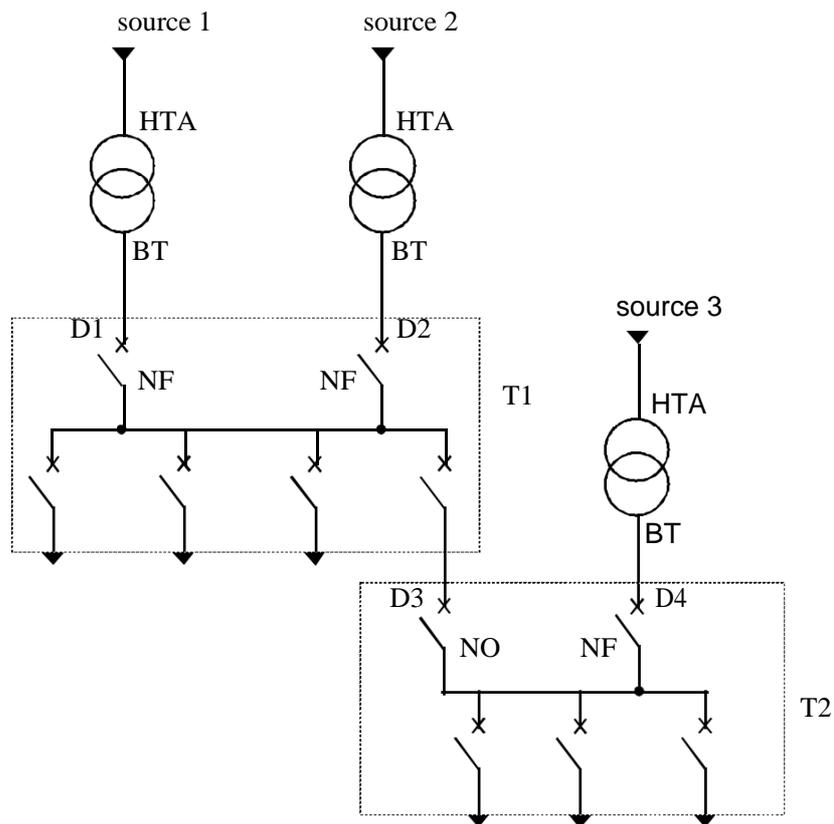


Figure 1-27: alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage

Le tableau T1 bénéficie d'une double alimentation sans couplage par 2 transformateurs HTA/BT.

Fonctionnement de l'alimentation de T1 :

- ✓ Les deux sources alimentent T1 en parallèle
- ✓ En fonctionnement normal, les deux disjoncteurs sont fermés (D1 et D2).

Le tableau T2 bénéficie d'une double alimentation sans couplage par un transformateur HTA/BT et par un départ issu d'un autre tableau BT.

Fonctionnement de l'alimentation de T2 :

- ✓ Une source alimente le tableau T2, la seconde assure le secours.
- ✓ En fonctionnement normal, un seul disjoncteur est fermé (D3 ou D4).

1.11.1.3- Des tableaux BT par une double alimentation avec couplage:

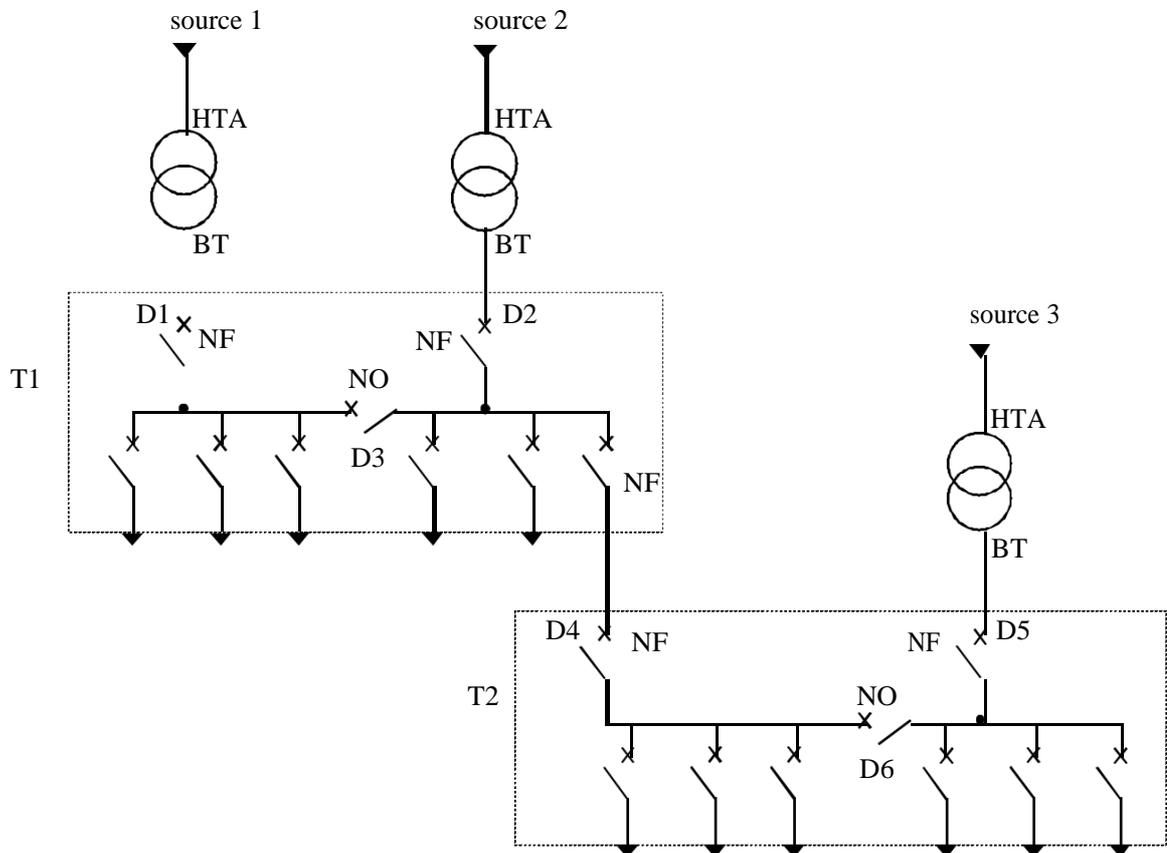


Figure 1-28: alimentation des tableaux BT par une double alimentation avec couplage

Le tableau T1 bénéficie d'une double alimentation avec couplage par 2 transformateurs HTA/BT.

Fonctionnement de l'alimentation de T1 :

- ✓ En fonctionnement normal, le disjoncteur de couplage D3 est ouvert.
- ✓ Chaque transformateur alimente une partie de T1. En cas de perte d'une source d'alimentation, le disjoncteur de couplage D3 est fermé et un seul transformateur alimente la totalité de T1.

Le tableau T2 bénéficie d'une double alimentation avec couplage par un transformateur HTA/BT et par un départ issu d'un autre tableau BT.

Fonctionnement de l'alimentation de T2 :

- ✓ En fonctionnement normal, le disjoncteur de couplage D6 est ouvert.
- ✓ Chaque source alimente une partie de T2. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage D6 est fermé et l'autre source alimente la totalité de T2.

1.11.1.4- Des tableaux BT par une triple alimentation sans couplage:

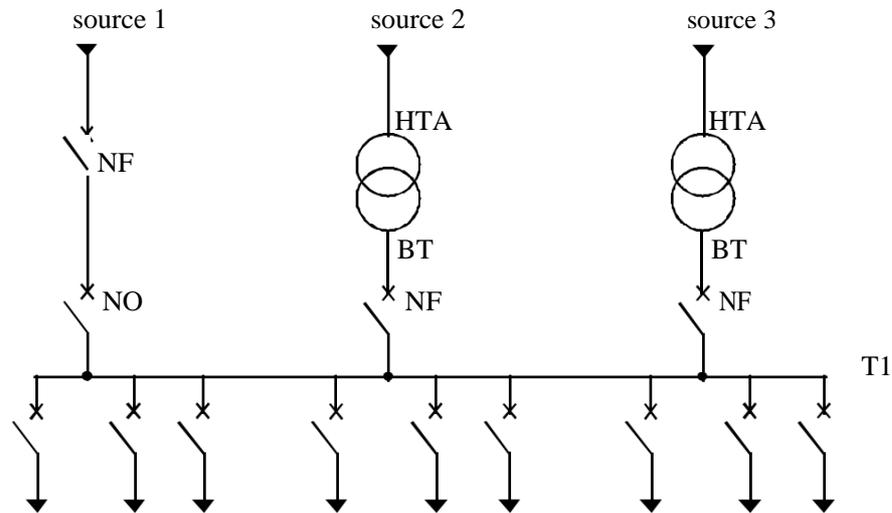


Figure 1-29: alimentation des tableaux BT par une triple alimentation sans couplage

Le tableau T1 bénéficie d'une triple alimentation sans couplage par 2 transformateurs HTA/BT et par un départ issu d'un autre tableau BT.

- ✓ En fonctionnement normal, le tableau est alimenté par les 2 transformateurs en parallèle.
- ✓ En cas de défaillance d'un ou des deux transformateurs, le tableau T1 est alimenté par le départ issu d'un autre tableau.

1.11.1.5- Des tableaux BT par une triple alimentation avec couplage:

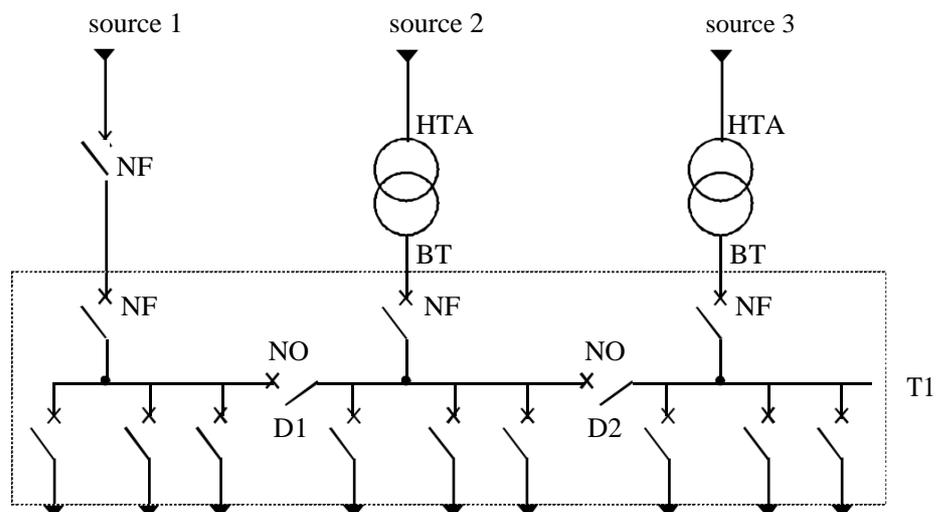


Figure 1-30: alimentation des tableaux BT par une triple alimentation avec couplage

Le tableau T1 bénéficie d'une triple alimentation avec couplage par 2 transformateurs HTA/BT et par un départ issu d'un autre tableau BT.

- ✓ En fonctionnement normal, les 2 disjoncteurs de couplage sont ouverts, le tableau T1 est alimenté par les 3 sources d'alimentation.
- ✓ En cas de défaillance d'une source, le disjoncteur de couplage de la source associée est fermé, le disjoncteur arrivée de la source défaillante est ouvert.

1.11.1.6- Les tableaux BT secourus par des alternateurs:

1^{er} exemple : 1 transformateur et 1 alternateur:

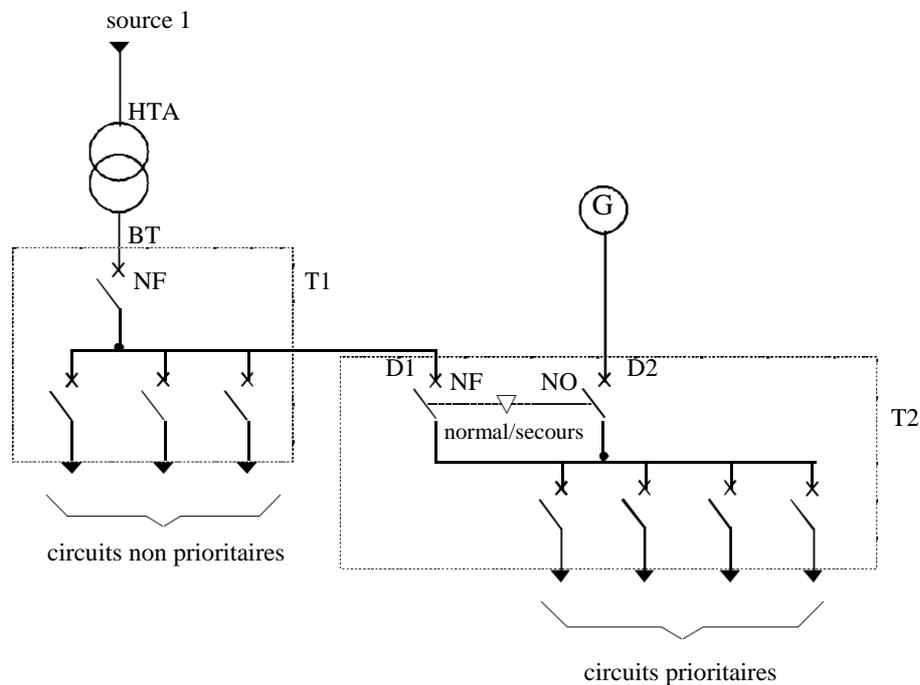


Figure 1-31: 1 transformateur et 1 alternateur

En fonctionnement normal, D1 est fermé et D2 est ouvert. Le tableau T2 est alimenté par le transformateur. En cas de perte de la source normale, on réalise les étapes suivantes :

1. Fonctionnement du dispositif normal/secours, ouverture de D1.
2. Délestage éventuel d'une partie des récepteurs des circuits prioritaires, afin de limiter l'impact de charge subi par l'alternateur.
3. Démarrage de l'alternateur.
4. Fermeture de D2 lorsque la fréquence et la tension de l'alternateur sont à l'intérieur des plages requises.
5. Relestage des récepteurs éventuellement délestés à l'étape 2.

Lorsque la source normale est de nouveau en état de marche, le dispositif normal/secours bascule l'alimentation de T2 sur cette source et l'alternateur est arrêté.

2ème exemple : 2 transformateurs et 2 alternateurs:

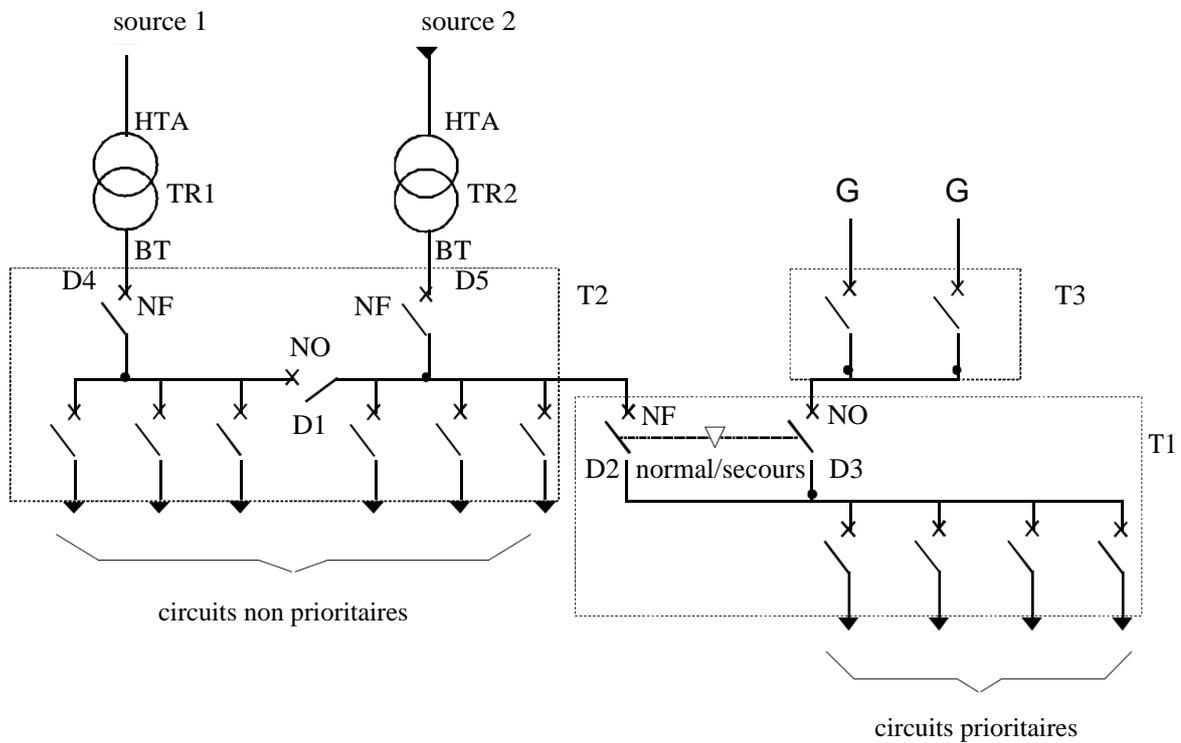


Figure 1-32: 2 transformateurs et 2 alternateurs

- ✓ En fonctionnement normal, le disjoncteur de couplage D1 est ouvert et le dispositif normal/secours est sur la position D2 fermé et D3 ouvert. Le tableau T1 est alimenté par le transformateur TR2.
- ✓ En cas de perte de la source 2 ou de panne sur TR2, le secours de T1 (et une partie de T2) est assuré prioritairement par le transformateur TR1, après fermeture du disjoncteur de couplage D1.
- ✓ Les alternateurs ne sont mis en marche qu'après la perte des 2 sources principales d'alimentation ou du jeu de barres de T2.
- ✓ Le déroulement des étapes de sauvegarde de l'alimentation des circuits prioritaires est identique au 1er exemple.

1.11.1.7- Les tableaux BT secourus par une alimentation sans interruption(ASI):

Les principaux éléments constituant une ASI sont indiqués sur la figure et le tableau suivants:

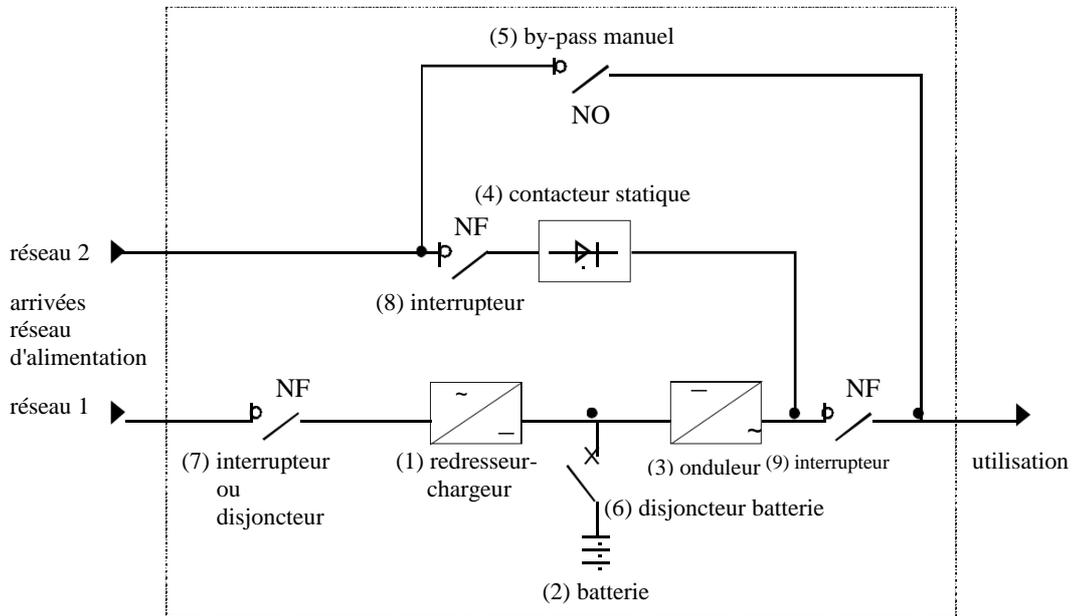


Figure 1-33: constitution d'une alimentation sans interruption[8]

Arrivée(s) Réseau:

Les appellations réseau 1 et réseau 2 désignent deux arrivées indépendantes du même réseau :

- ✓ réseau 1 (ou normal) désigne l'arrivée alimentant normalement le redresseur-chargeur,
- ✓ réseau 2 (ou secours) est une arrivée dite de secours.

L'onduleur est synchronisé en fréquence et en phase avec le réseau 2. Ainsi, le contacteur statique peut commuter instantanément l'alimentation vers le réseau 2 (en un temps inférieur à 1 ms).

Le raccordement de l'ASI à un réseau 2 indépendant est recommandé car il augmente la disponibilité de l'ensemble. Cependant, il est possible de n'avoir qu'une arrivée commune.

Le choix d'un type d'architecture d'alimentation sans interruption dépend de la qualité des réseaux 1 et 2, de l'utilisation et de la disponibilité requise. Le constructeur doit donner des éléments suffisants au concepteur pour qu'il puisse choisir l'architecture la mieux adaptée. Les exemples ci-après explicitent les architectures les plus courantes.

Dénomination	Repères	Fonction
Redresseur- Chargeur	(1)	Transforme la tension alternative du réseau d'alimentation en tension continue destinée à : - alimenter l'onduleur d'une part, - assurer la charge et l'entretien de la batterie d'accumulateurs d'autre part.
Batterie d'accumulateurs	(2)	Assure une réserve d'énergie destinée à alimenter l'onduleur en cas de : - disparition du réseau d'alimentation, - réseau d'alimentation hors tolérance.
Onduleur	(3)	Transforme la tension continue issue du redresseur-chargeur ou de la batterie d'accumulateurs en tension alternative à tolérances plus sévères que celles du réseau (délivre un courant alternatif proche de la sinusoïde théorique).
Contacteur statique	(4)	Réalise le basculement de l'alimentation de l'utilisation, de l'onduleur vers le réseau 2 (secours) et réciproquement, sans interruption (pas de coupure due à un temps de permutation d'organes mécaniques - le basculement est réalisé à partir de composants électroniques en un temps < 1 ms). Ce basculement intervient en cas d'arrêt de l'onduleur, pour l'une des raisons suivantes : - arrêt volontaire, - surcharge sur l'utilisation dépassant les capacités de limitation de l'onduleur, - anomalie interne.
By-pass manuel	(5)	Interrupteur manuel qui permet d'alimenter l'utilisation par le réseau 2 (secours), pendant une intervention de maintenance.
Interrupteurs manuels disjoncteurs de batterie	(6) (7) (8) (9)	Permettent d'isoler les différents éléments lors d'une intervention de maintenance

Tableau 1-4 : fonctions des différents éléments d'une alimentation sans interruption[9]

- 1er exemple : Tableau BT secouru par un onduleur, avec un alternateur pour pallier l'autonomie limitée de la batterie (généralement de l'ordre de 15 mn):

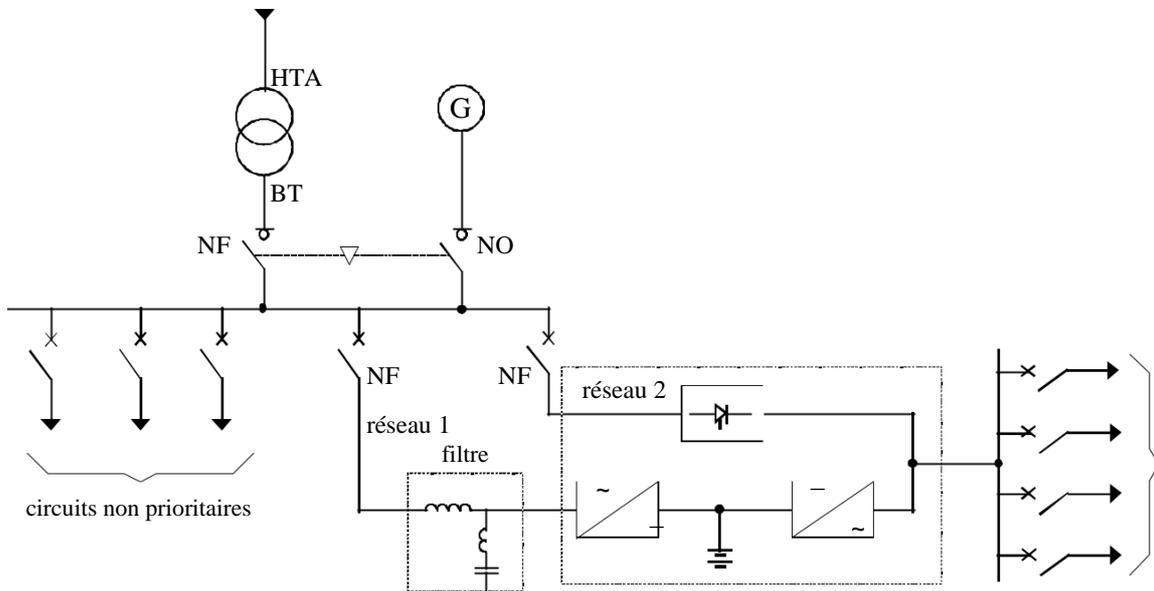


Figure 1-34: tableau BT secouru par un onduleur

Le filtre permet de diminuer les courants harmoniques remontant dans le réseau d'alimentation.

- 2ème exemple : Tableau BT secouru par 2 onduleurs en parallèle sans redondance:

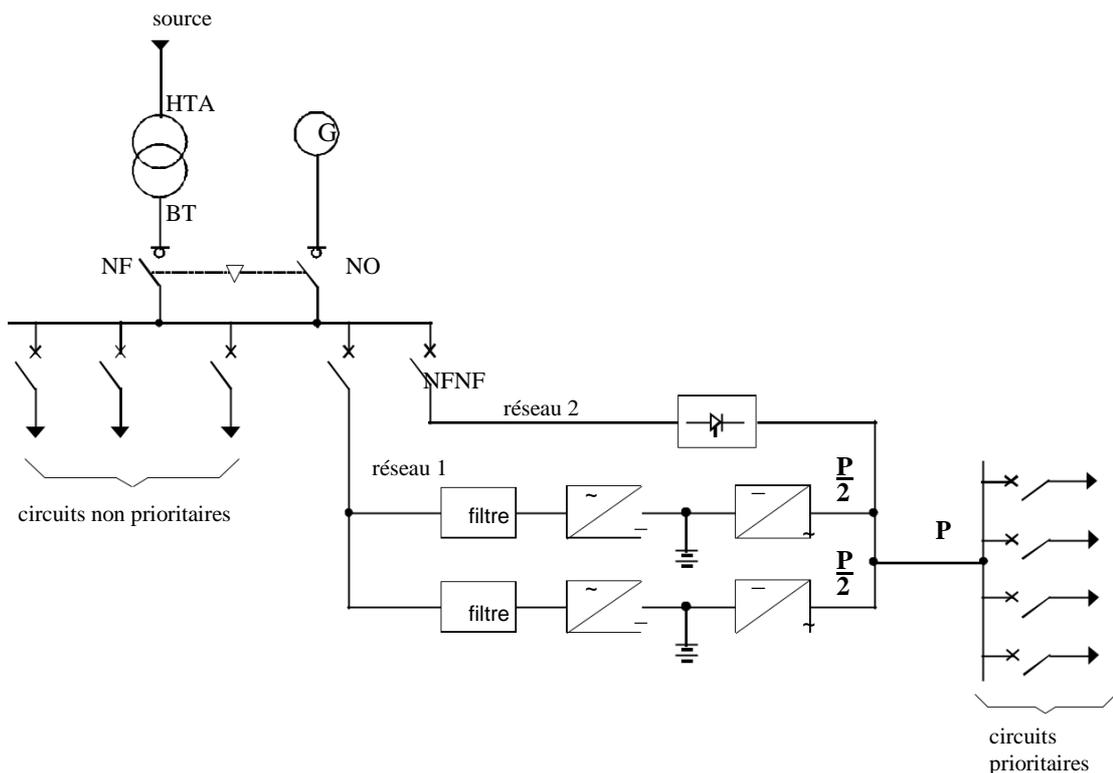


Figure 1-35: tableau BT secouru par 2 onduleurs en parallèle sans redondance

Cette configuration permet seulement d'obtenir un ensemble de puissance supérieure à celle disponible en chaîne unitaire.

La puissance P à fournir est divisée également entre les 2 onduleurs.

Toute défaillance, de l'une des chaînes se traduit par un transfert sans coupure de l'utilisation sur le réseau 2, sauf si le réseau est hors tolérance.

Chapitre II :



Planification de Réseau de Distribution

II.1. Introduction :

La planification d'un réseau de distribution a pour but la couverture de la charge du réseau avec un minimum de défaillances, une qualité acceptable de l'énergie livrée et un coût aussi faible que possible. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la couverture de la charge du réseau à étudier et à la qualité de l'énergie. Nous allons présenter la méthodologie d'étude de développement d'un réseau électrique, présenter quelques méthodes de calcul de réseaux de distribution et citer quelques logiciels utilisés à cet effet et en particulier le logiciel CARA[10].

II.2. La continuité de service :

La continuité de l'alimentation en tension et en courant relève de la conception des réseaux publics et industriels, de la qualité de leurs matériels et des bonnes pratiques de maintenance et des investissements réalisés pour assurer l'alimentation d'un point particulier ou d'une zone donnée, c'est donc le résultat d'un compromis technico-économique.

La continuité de l'alimentation est l'un des éléments importants de la qualité de la fourniture perçue par les clients, elle se mesure par le nombre de coupures d'alimentation d'un point donné, on parle simplement de coupures par unité de temps.

Dans les normes on définit trois types de coupures :

- 1) **Les microcoupures ($t < 1 \text{ s}$)** : occasionnées par exemple par un réenclenchement rapide sur défaut fugitif.
- 2) **Les coupures brèves ($1 \text{ s} < t < 3 \text{ min}$)** : dues en général à des fonctionnements soit de protections telle que les réenclencheraient lents sur défauts semi-permanents, soit d'automatismes de reprise de service.
- 3) **Les coupures longues ($t > 3 \text{ min}$)** : qui peuvent durer jusqu'à quelques heures, voire plus en cas d'incidents généralisés, elles peuvent être dues à un incident ou bien à des travaux programmés, dans ce cas la clientèle est en principe préalablement informé et peut s'organiser en conséquence.

III.3. La qualité de service :

La qualité est définie comme l'aptitude d'un produit à satisfaire le besoin d'un utilisateur. La qualité de l'alimentation électrique est donc fonction de ce qu'attend le client. Les attentes des clients se sont fortement modifiées au cours des dernières années parce que les usages de l'électricité se sont eux-mêmes modifiés. Les matériels sont généralement plus exigeants en termes de qualité de l'énergie et les conséquences des non-qualités de la distribution sont souvent plus importantes parce que l'électricité joue un rôle majeur dans de nombreux procédés industriels ou matériels courants.

Les anomalies qui touchent la qualité de la fourniture qui sont des phénomènes plus ou moins permanents regroupant l'ensemble des anomalies de la forme d'onde et des paramètres du signal électrique sont:

- creux de tension
- variations lentes de tension

- variations rapides de tension
- des tensions trop hautes ou trop basses

II.4. La chute de tension :

La chute de tension d'une ligne est la différence entre les tensions à ses extrémités. Pour veiller à la bonne marche des appareils alimentés, il faut que la chute de tension ne dépasse pas des limites préalablement fixées.

II.4.1. Calcul de la chute de tension :

Le calcul direct des chutes de tension dans un réseau quelconque, pour une fréquence considérée, revient à calculer l'état électrique du réseau à partir des éléments connus, en utilisant les méthodes classiques des calculs de réseaux.

Le circuit équivalent des lignes moyennes, se compose seulement d'une résistance (R), et d'une réactance (X), on représente donc une ligne comme un dipôle parcouru par un courant (I).

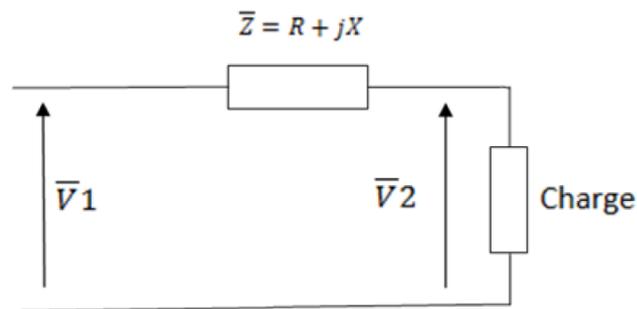


Figure II-1: schéma d'une ligne moyenne tension

La tension V_1 de départ est :

$$\bar{V}_1 = R \cdot \bar{I} + jX \cdot \bar{I} + \bar{V}_2$$

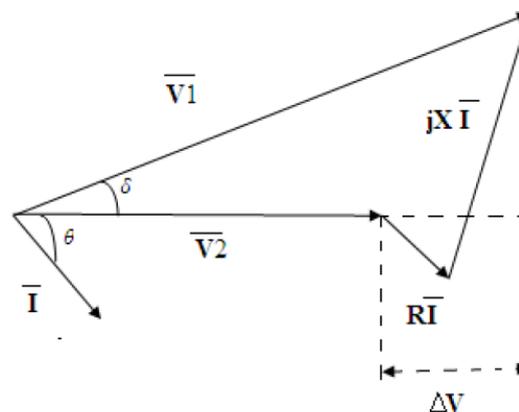


Figure II-2: Diagramme vectoriel des tensions

La chute de tension ΔV est la différence entre la tension de départ et la tension d'arrivée.

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2$$

En projetant sur la direction de V_2 tous les autres vecteurs, on aura

$$V_1 \cos \delta = V_2 + R \cdot I \cdot \cos \theta + X \cdot I \cdot \sin \theta$$

L'angle δ est très faible, donc $\cos \delta \sim 1$ donc:

$$\Delta V = R \cdot I \cdot \cos \theta + X \cdot I \cdot \sin \theta$$

Soit en introduisant la tension composée :

$$\Delta U = \sqrt{3}(R \cdot I \cdot \cos \theta + X \cdot I \cdot \sin \theta)$$

En divisant les deux membres par U_1 et en les multipliant par 100, on aura :

$$\frac{\Delta U}{U_1} \% = \sqrt{3}(R \cdot I \cdot \cos \theta + X \cdot I \cdot \sin \theta) \cdot \frac{100}{U_1}$$

II.5. Méthodes d'amélioration du plan de la tension :

Pour assurer la sécurité et la qualité de fourniture de l'énergie électrique, les réseaux électriques sont soumis à de nombreuses contraintes de fonctionnement. Ces contraintes s'appliquent à tous les acteurs du système électrique, de la production à la consommation.

La tension, la fréquence, sont des paramètres les plus importants pour la sûreté et la stabilité du système électrique.

Les chutes de tension dans les réseaux électriques sont limitées. Un réglage correct de la tension permet donc de promouvoir les ventes d'énergie et de retarder de quelques années les investissements destinés à faire face à l'accroissement continu de la charge.

On donne ci après quelques méthodes pour l'amélioration de la qualité de la tension :

II.5.1. Réglage par réduction de l'impédance:

Une ligne MT est caractérisée par une résistance « R » et une réactance « X », son Impédance sera :

$$Z=R+jX$$

Deux méthodes de réglage peuvent se présenter:

II.5.1.1. Réduction de la longueur de la ligne:

$$R=r \cdot l \quad (\Omega)$$

$$X=x \cdot l \quad (\Omega)$$

Avec :

l : longueur de la ligne en (km).

r : résistance linéique de la ligne en (Ω /km).

x : réactance linéique de la ligne en (Ω /km).

Il serait bon de réduire les longueurs des lignes.

II.5.1.2. Réduction de l'impédance par la mise en parallèle de plusieurs lignes:

Cette solution peut s'obtenir par la mise en parallèle de plusieurs lignes pour la limitation de la chute de tension, soit suivant le même tracé, soit suivant des tracés différents, c'est le moyen général de renforcement des réseaux pour faire face aux augmentations de transit.

II.5.2. Réglage par compensation de l'énergie réactive:

C'est l'installation de condensateurs qui agit sur la circulation de la puissance réactive, elle peut se faire à proximité du récepteur ayant un mauvais facteur de puissance.

Ces batteries de condensateurs sont utilisées surtout sur les lignes MT, outre la réduction des pertes et l'amélioration de rendement du réseau, elles réduisent les chutes de tensions.

II.6. Limite de tenue thermique des équipements :

La continuité et qualité de service dans les réseaux de distribution se concrétise essentiellement par la limitation des fluctuations de la tension et du courant.

✓ Chute tension admissible :

Les chutes de tension, à l'état sain ou perturbé du réseau devront être maintenues dans des limites bien précises dans le but de garantir un minimum de qualité de la distribution.

La limite de la chute de tension entre l'origine de l'installation MT et tout point d'utilisation :

$$\frac{\Delta U}{U_1} \% < 10\% \text{ Pour les lignes aériennes}$$

$$\frac{\Delta U}{U_1} \% < 6\% \text{ Pour les liaisons souterraines}$$

✓ Courant admissible :

On appelle courant admissible (I_{adm}) le courant maximal que peut supporter un conducteur. Au-delà de cette valeur, l'isolant se détériore et cela peut entraîner des risques d'incendie.

Dans le but de garantir la continuité de la distribution de réseau MT, Le courant de branche (I_b) ne doit pas dépasser le courant admissible (I_{adm}). $I_b < I_{adm}$

II.7. Les pertes par effet Joule :

Les pertes par effet Joule sont causées par le courant qui circule dans les résistances des transformateurs et des lignes. La quantité d'énergie perdue dans l'ensemble des lignes et des transformateurs électriques n'est pas négligeable devant la quantité d'énergie consommée.

Les pertes par effet Joule font partie des coûts d'exploitation de réseaux électriques. Pour un ouvrage donné, le coût actualisé des pertes, sur sa durée de vie, est de l'ordre de grandeur du coût d'un ouvrage. Les pertes ont donc un poids économique du même ordre de grandeur que celui du matériel [11].

II.7.1. Calcul des pertes joules dans le réseau de distribution :

Les pertes par effet Joule ' P_j ' à travers une branche du réseau de distribution peuvent être calculées par : $P_j = 3.R.I_b^2$

Avec :

R : la résistance de la branche.

I_b : le courant de la branche.

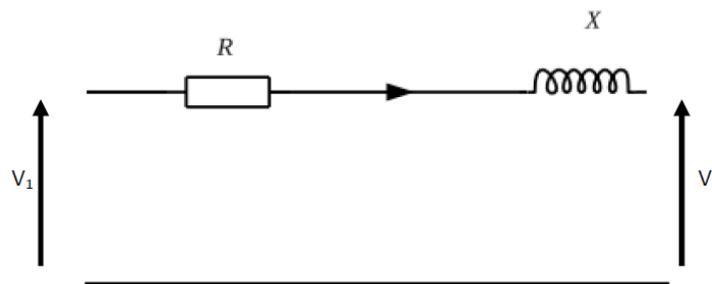


Figure II-3: Modèle d'une ligne électrique

II.8. Méthodologie d'étude des réseaux de distribution [12]

Le travail de planification de réseau de distribution est un travail qui exige une concentration entre planificateur et exploitant. En effet, la présence de ce dernier s'avère indispensable lors du choix judicieux du renforcement étant donné qu'il est le seul à détenir les données de base de l'étude.

Toute étude de développement de réseau de distribution s'articule autour des 3 phases principales :

1. Collecte des données
2. Traitement des données
3. Calcul et interprétation des résultats.

II.8.1. La collecte des données :

Avant de procéder à la collecte des données, il est nécessaire en particulier de connaître la topologie du réseau qui donne un aperçu sur son étendue et ses limites.

Cette étape revêt un intérêt important car la fiabilité de l'étude dépend de la qualité des données introduites par la suite pour le traitement.

II.8.1.1. Données physiques du réseau :

Le document établi par l'exploitant est constamment mis à jour (carte schématique et fichier du réseau) il permet d'avoir toutes les informations nécessaires sur les différents éléments du réseau tels que :

- ✓ Les différentes longueurs des arcs
- ✓ La résistance et la réactance linéiques et la capacité thermique des conducteurs
- ✓ La puissance installée des postes MT/BT.

II.8.1.2. Données dynamiques :

Les données dynamiques sont les courants des différents postes. Ces courants sont calculés à partir de la formule suivante :

$$I_{DP} = \frac{P_i}{U_n \cdot \sqrt{3}} \cdot \alpha$$

$$I_{LV} = \frac{P_i}{U_n \cdot \sqrt{3}} \cdot \beta$$

P_i : puissance installée de poste

U_n : tension nominale du poste

α et β coefficient de foisonnement

II.8.2. Traitement des données :

Une fois la phase de la collecte de données est terminée, et les données dynamiques calculées, toutes ces données (physiques et dynamiques) sont introduites à la machine pour permettre à l'outil informatique de faire le diagnostic du réseau à étudier.

II.8.3. interprétation et analyse des résultats :

C'est à cette dernière phase de l'étude que des solutions sont proposées pour résoudre les différents problèmes qui sont signalés dans la phase de traitement.

II.9. Prévision des charges :

Selon la nature du problème à résoudre, le planificateur est amené à effectuer des prévisions de natures diverses. Les deux caractéristiques essentielles d'une prévision de charge sont, d'une part, la date horizon à étudier, d'autre part, l'étendue géographique de la zone sur laquelle porte la prévision.

II.10. Coefficient d'évolution de la charge :

Le coefficient d'évolution de la charge est une valeur qui permet d'évaluer avec plus ou moins d'exactitude, la valeur de la charge d'une région, au bout d'un certain temps afin de pouvoir prendre les précautions nécessaires pour pallier aux éventuelles carences due à l'augmentation de la charge.

Le coefficient global d'évolution de la charge peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$P_T = P_0 (1+a)^T$$

T : année

P_T : puissance à l'année T

P_0 : puissance initial

a : coefficient d'évolution de la charge

II.11. Importance de l'outil informatique pour le calcul des réseaux de distribution :

Compte tenu des quantités importantes d'ouvrages à traiter, de la complexité des réseaux électriques et du grand nombre de calculs qu'il faut effectués, il est difficile d'imaginer une

planification des réseaux de distribution efficace sans l'utilisation d'outils informatiques. Plusieurs logiciels ont été conçus à cet effet.

Parmi lesquels on peut citer :

CYMDIST :

C'est un logiciel d'analyse de réseaux de distribution de base du logiciel CYME. Il regroupe tous les outils de modélisation et d'analyse nécessaires à la réalisation de divers types de simulations relatives à la planification des réseaux de distribution. [13]

OpenDSS :

(Distribution System Simulator) il permet d'effectuer plusieurs types de simulations sur le réseau de distribution qui sont difficiles à réaliser avec des outils plus traditionnels d'études transitoires ou d'écoulements de puissance. [14]

GridLAB-D :

également c'est un logiciel de simulation de réseau de distribution

Le logiciel CARA :

pour le calcul des réseaux arborescents, il est utilisé par le groupe Sonelgaz, il a été mis au point par le département de recherche et développement de traction et d'électricité.

II.12. Le logiciel CARA

Le programme vérifie si, pour un réseau donné, il existe un schéma d'exploitation radial qui permet d'alimenter toutes les charges indiquées en respectant les contraintes imposées.

Ces contraintes portent sur les capacités de transit des lignes et la chute de tension maximum admissible aux noeuds, de plus le modèle recherche pour les cas d'incidents demandés, un schéma de secours.

La limite de tension imposée peut être différente pour la structure en exploitation normale de celle pour les cas d'incidents.

Le modèle refait les mêmes calculs (exploitations normales et incidents) pour l'année ultérieure en tenant compte des renforcements éventuellement introduits dans le réseau.

Il devrait répondre aux exigences de :

- ✓ L'évolution des charges en réseau est souvent brusquée par l'apparition de nouveaux clients, le modèle devra donc être rapide et prévu pour un usage intensif [13]
- ✓ Prise en compte des chutes de tension maximales admises (en régime normal et en cas d'incident) ainsi que de la limite de tenue thermique des équipements.
- ✓ La recherche de plusieurs politiques de renforcement nécessite un nombre de passages à l'ordinateur souvent importants, une grande rapidité des calculs est donc indispensable pour limiter leur coût.

II.12.1. Capacité de modèle :

- ✓ 14 injecteurs,
- ✓ 14 injecteurs 'de secours'
- ✓ 20 paliers de charge
- ✓ 150 noeuds
- ✓ 200 branches ou arcs,
- ✓ 15 connexions à un noeud.

II.12.2. Exploitation de programme CARA:

Les données étant collectées et traitées, il faut les introduire dans la machine en vue de les utiliser dans le programme CARA, la saisie de ces données par le programme se fait sous un certain format à l'aide de différentes cartes, le programme contient 04 cartes qui sont les suivantes :

II.12.2.1. Carte titre (code 0):

Contient le titre de l'étude.

II.12.2.2. Carte paramètre (code 1):

Elle Contient :

- Année de début de l'étude
- Année de fin de l'étude
- Tension nominal de réseau
- Tension minimale (en%) admise à l'état sain: Ex. 90%
- Tension minimale (en%) admise en cas d'incident Ex 88%
- Surcharge (en%) admise en cas d'incident: Ex. 20%
- Cosφ moyen du réseau (0.9)

II.12.2.3. Carte branche (code 2)

Elle contient :

- Nom du noeud amont
- Nom du noeud aval
- Possibilité de mettre des éléments en série ou en parallèle
- Priorité de l'arc
- Capacité de l'arc
- Résistance et réactance linéique de l'arc en (Ω/km)
- Longueur de l'arc

II.12.2.4. Carte charge (code 3):

Ces cartes sont destinées à définir l'évolution de la charge en un noeud. Cette évolution sera décrite par une ou plusieurs composantes, chaque composante est caractérisée par :

- Sa valeur initiale à une année déterminée
- Son taux d'évolution

II. 12.2.5. Carte charge (code 4)

La carte charge (code 4) est destinée à définir l'évolution de la charge durant 10 ans de l'année initiale jusqu'à l'année finale.

L'impression du schéma d'exploitation à l'année considérée par le programme ressorti pour chaque arc :

- Les noms des noeuds amont et aval
- La capacité nominale de l'arc en (A)
- Le courant transitant dans l'arc en (A)
- Le taux d'utilisation de l'arc « PCT » en (%)
- La tension au noeud aval en (V)
- La chute de tension en (%)
- Les pertes de puissance sur l'arc en (kW)

II.13. Méthodes de calcul des réseaux de distribution:

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution telles que la méthode de Gauss Seidel, de Newton-Raphson et de Backward/Forward Sweep. Pour le calcul des courants, des chutes de tension et des pertes par effet Joules dans les différentes branches du réseau de distribution ainsi que pour le calcul de la tension aux différents noeuds du réseau . La méthode Backward/Forward Sweep peut être utilisée parce que elle est simple à mettre en oeuvre , rapide et converge systématiquement dans le cas des réseaux de distribution de grande taille [15].

II.13.1. Methode de (Backward/Forward Sweep):

La Méthode de (Backward/Forward Sweep) est une méthode itérative, elle comprend deux balayages à chaque itération ; le balayage arrière et le balayage avant. Le balayage arrière consiste à calculer les courants dans les branches du réseau en utilisant la première loi de Kirchhoff. Le balayage avant consiste à calculer les tensions aux noeuds du réseau à l'aide de calcul des chutes de tension le long des branches.

La méthode repose sur deux matrices dérivées de la topologie du réseau : la matrice BIBC et la matrice BCBV .

La relation entre les injections de courant de noeuds et les courants de branches est déterminée par la loi des noeuds ou de courant de Kirchhoff. Les courants de branches peuvent alors être formulés en fonction de différents courants injectés aux noeuds.

Comme exemple, on prend le réseau de distribution de la figure suivante:

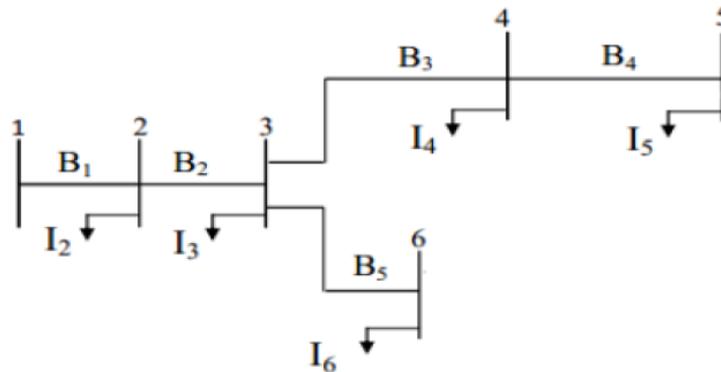


Figure II.4. Schéma unifilaire d'un réseau de distribution.

Les courants des branches du réseau peuvent être exprimés en fonction des courants de charges comme suit :

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_5 = I_6$$

Par conséquent, cette relation peut être exprimée comme :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \leftrightarrow [B] = [BIBC][I]$$

Où BIBC est la matrice qui exprime la relation entre le courant injecté au noeud et le courant de branche :

$B = i = 1, 2, \dots, 5$ est le vecteur des injections de courants de branche.

$I_i = i = 2, 3, \dots, 6$ est le vecteur des courants de noeud I.

La tension de noeud peut être exprimée comme une fonction des courants de branche, des paramètres de ligne et de la tension référence au niveau de poste source (MT). La relation entre les courants de branche et les tensions de noeud, est obtenue par l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

Donc:

$$[\Delta V] = [BCBV][B]$$

Ou BCBV est la matrice qui représente la relation entre les courants de branches et les tensions des noeuds. 'V_i' , i=2, 3,4,5,6 est la tension du noeud i, et 'Z_{ij}' est l'impédance de ligne triphasée entre le noeud i et le noeud j.

Les matrices BIBC et BCBV sont élaborées en fonction de la structure topologique du réseau de distribution. En combinant les équations sus-citées, la relation entre ces deux matrices peut être exprimée comme :

$$[\Delta V] = [BCBV] [BIBC] [I]$$

Chapitre III :



Planification des Réseaux de Distribution HTA

III .1. Définitions:

La planification d'un réseau de Distribution HTA permet de choisir une solution technique à un problème posé grâce à des études technico-économiques. Les problèmes techniques peuvent être des problèmes à court terme, dans l'année, (raccordement de producteurs, de charges, étude de renforcement) ou à long terme, dans un horizon de 30 - 40 ans, (construction de réseaux HTA ou encore mise en place d'un poste source HTB/HTA). La planification à court terme, sert à faire des calculs technico-économiques simples permettent de trouver les solutions adaptées. La planification long terme consiste à mettre en place des schémas directeurs de développement du réseau électrique c'est-à-dire à trouver son avenir le plus probable en se fondant sur des hypothèses réalistes afin de s'adapter à l'évolution des contraintes (charges, environnement, production) [16].

III .2 Schémas directeurs

La mise en place de schémas directeurs permet d'étudier les réseaux existants, d'analyser leur performance et leurs failles de façon à établir des stratégies de développement à coût minimal. On peut citer deux exemples d'application :

- ☒ La décision d'opérations de maintenance sur le réseau. Celles-ci vont dépendre, entre autres, du type de matériels (lignes aériennes, souterraines, organes de coupure entre autres), de leur âge, de leur coût, du nombre de clients qui pourraient être affectés par une défaillance du matériel).
- ☒ La prévision des investissements à réaliser sur une période donnée. Les différents choix possibles peuvent être la construction et/ou le démantèlement de conducteurs, la modification d'architectures par la création de circuits de secours, entre autres.

III .3 Objectifs de la planification:

Les objectifs de la planification sont de développer un réseau électrique plus fiable, plus économique et respectant au mieux l'environnement. Pour cela, les différentes solutions proposées doivent respecter un ensemble des critères que nous allons définir:

III 3.1 Indices de fiabilité et produit PL équivalent:

Le **SAIDI** (System Average Interruption Duration Index) est le temps moyen de coupure par an et par client. Le **SAIFI** (System Average Frequency Duration Index) est la fréquence moyenne de coupure par an et par client. Enfin, l'**END** est l'Energie Non Distribuée par an.

Ces trois indices de fiabilité donnent une image de la qualité du réseau. Plus ces indices sont

petits et plus le réseau sera de bonne qualité. Pour chaque tronçon i délimité par deux organes de coupure, si un défaut se produit sur le tronçon i , on définit :

$$SAIDI(i) = \frac{T_{cou}(i) \times N_{cl}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)}$$

$$SAIFI(i) = \frac{N_{cl}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)}$$

$$END(i) = \frac{P_{cou}(i) \times T_{cou}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)}$$

Avec :

- ☒ $T_{cou}(i)$ = Durée de la coupure du tronçon i (min)
- ☒ $N_{cl}(i)$ = Nombre de clients coupés,
- ☒ $N_{cou}(i)$ = Nombre de coupures,
- ☒ $N_{tot}(i)$ = Nombre total de clients,
- ☒ $P_{cou}(i)$ = Puissance coupée.

Pour calculer un indice de fiabilité IND total (IND représentant le SAIDI, SAIFI ou END), on aura donc : $IND = \sum_{ij=1}^n IND(i)$ où n est le nombre de tronçons du réseau. Le calcul de T_{cou} , N_{cl} , N_{tot} et P_{cou} dépendent des organes de coupure utilisés et de leur emplacement ainsi que du mode d'exploitation du réseau.

PL pour une zone donnée est le produit de la puissance totale consommée par les clients de la zone par la longueur totale de la zone qui alimente les clients. En d'autres termes, si on tente d'équilibrer cet indice, des clients qui consomment peu d'énergie seront alimentés par une longueur de conducteur plus importante que des clients qui consomment beaucoup d'énergie. La probabilité de défaut étant proportionnelle à la longueur de conducteur, on minimise ainsi la puissance coupée lors d'un défaut et donc on améliore la qualité de service. Par ailleurs, l'équilibrage de ce critère permet d'assurer une répartition des risques de défauts[17].

Le Tableau suivant résume les différents critères (techniques, de fiabilité et environnementaux) que doivent vérifier les solutions proposées.

Critères techniques	Critères de qualité	Critères environnementaux
- Courant admissible du matériel - Courant de court-circuit admissible du matériel	Urbain	- Réduction de la pollution - Diminution de la pollution visuelle en enfouissant les câbles
	- SAIDI par départ HTA de 15 min/an - END par départ HTA de 300 kWh/an - Zones de produit PL équivalent	
Chute de tension +/- 5 % en mode normal +/- 8 % en mode secours	Rural	Encombrement du territoire
	- END par départ HTA de 1250 kWh/an - SAIDI par départ HTA de 75 min/an - Zones de produit PL équivalent	

Tableau III-1 : Critères que doivent valider les solutions proposées[18].

III 3.2. Exemple sur un réseau en coupure d'artère:

Nous allons détailler les différents critères de qualité sur l'exemple d'un réseau de type coupure d'artère. On appelle artère principale l'ensemble des conducteurs reliant des consommateurs d'une source à l'autre. On appelle départ l'ensemble des conducteurs reliant les consommateurs d'une source à un organe de coupure normalement ouvert. Ainsi, une artère est composée de deux départs.

Tout d'abord, les zones dont les produits PL doivent être équivalents sont représentées sur la Figure suivante. Toutes les artères principales doivent avoir un PL équivalent. De plus, les deux départs qui forment l'artère principale doivent avoir un PL équivalent. Par ailleurs, les organes de coupure télécommandés (OMT) de chaque artère doivent être placés en respectant des zones de PL équivalent. Nous allons détailler les règles de placement des OMT sur une artère.

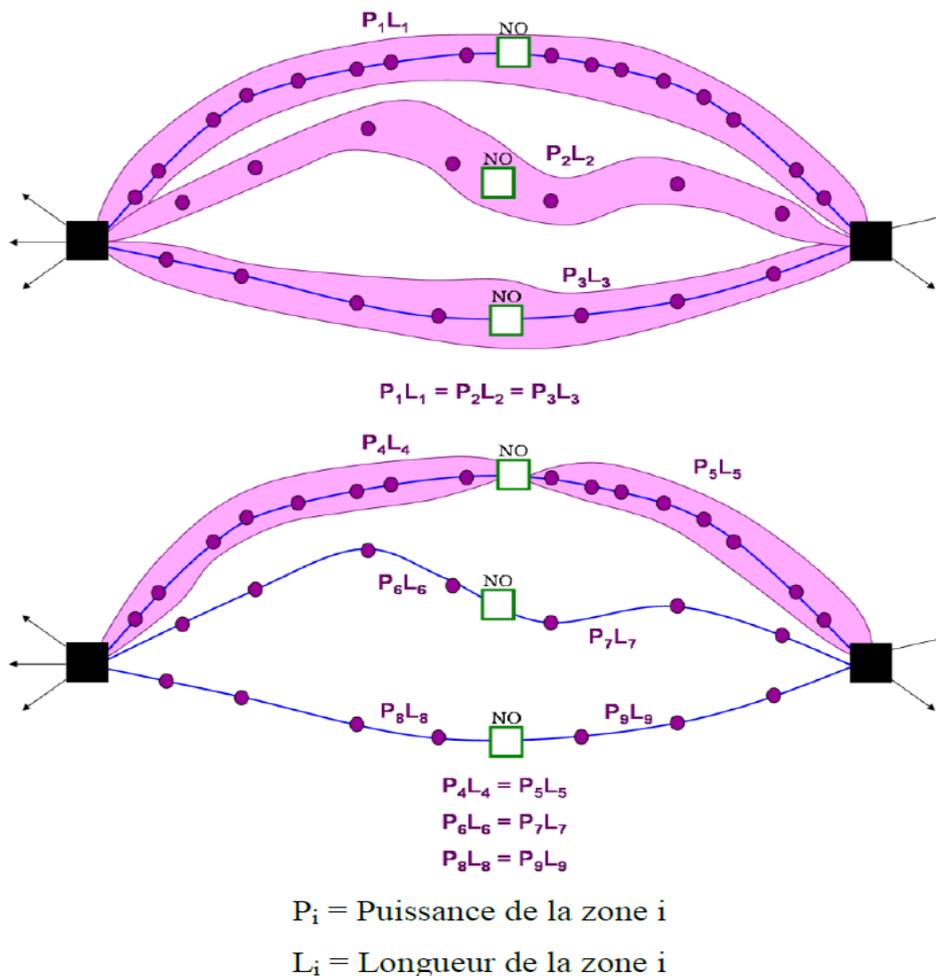


Figure III-1 : Zones de PL équivalent pour la coupure d'artère

La Figure sous-déssous représente une artère principale d'un réseau en coupure d'artère constitué par deux postes sources HTB/HTA. Un organe de coupure télécommandé normalement ouvert (OMT₃) sépare l'artère principale en deux départs alimentés chacun par un poste source tel que les PL des deux zones ainsi formés soient équivalents. Sur chaque départ, deux autres organes de coupure télécommandés sont placés de sorte que le produit PL des 3 zones formées de chaque départ soit équivalent. Les postes sources situés entre deux organes de coupure télécommandés sont équipés d'organes de coupures manuels.

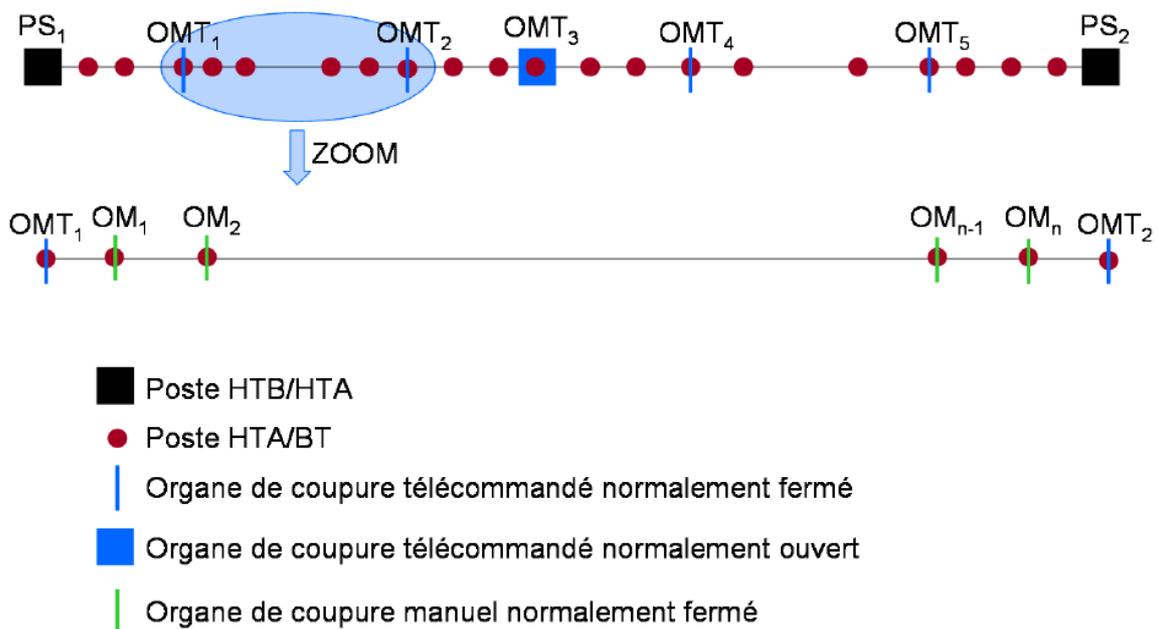


Figure III-2 : Deux départs d'un réseau en coupure d'artère

La Figure suivante, illustre la procédure de détection et d'isolement du défaut. Lorsqu'un défaut se produit entre l'OMT₁ et l'OMT₂, le disjoncteur de la cellule de départ déclenche et tous les clients du départ sont coupés. En quelques minutes, les conducteurs de réseaux manoeuvrent les organes de coupure télécommandés de façon à isoler la partie en défaut et à réalimenter le plus de clients. Dans ce cas de la Figure, les OMT₁ et OMT₂ sont ouverts. Ensuite, le poste source PS₁ réalimente les charges du côté amont du défaut puis l'OMT₃ normalement ouvert est fermé afin de réalimenter les charges du côté aval du défaut. L'étape 2 terminée, une équipe part sur le terrain afin de manoeuvrer les organes de coupure manuels des postes HTA/BTA de façon à réalimenter des clients supplémentaires. Ils peuvent ensuite effectuer la réparation sur le conducteur en défaut. Cette dernière étape de réalimentation prend entre 40 et 60 min.

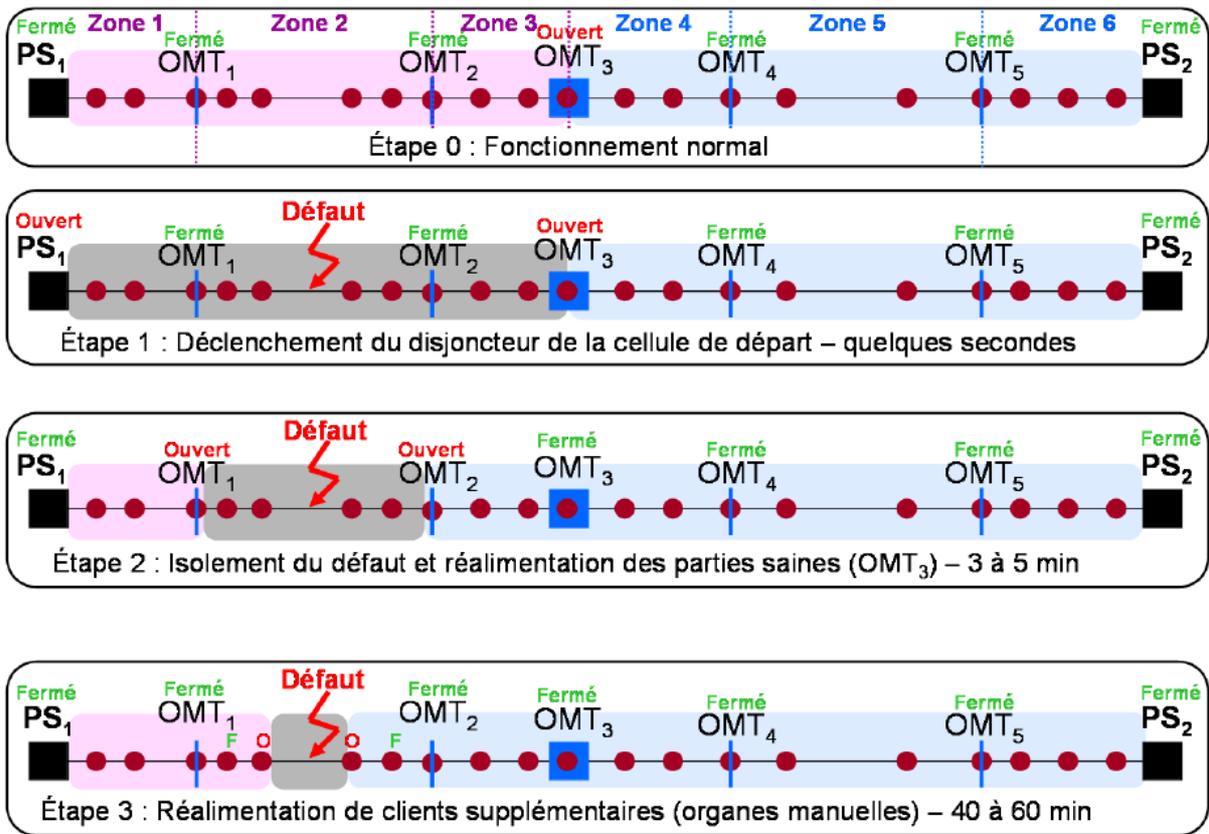


Figure III-3: Procédure de localisation et d'isolement d'un défaut

Chaque départ d'un réseau en coupure d'artère est usuellement découpé en 3 zones. Pour chaque zone Z_i , on définit :

$$SAIDI(i) = \tau \times L_i \times \left(T_d + T_m \times \frac{N_i}{N_1 + N_2 + N_3} \right)$$

$$SAIFI(i) = \tau \times L_i \times \left(\frac{N_i}{N_1 + N_2 + N_3} \right)$$

$$END(i) = \tau \times L_i \times (T_d \times P_{depart} + T_m \times P_i)$$

- ☒ τ = Taux de défaillance d'un conducteur souterrain,
- ☒ T_d = Temps de l'étape 1 et 2,
- ☒ T_m = Temps de l'étape 3,
- ☒ N_i = Nombre de clients de la zone Z_i ,
- ☒ L_i = Longueur de conducteur de la zone Z_i ,
- ☒ P_i = Puissance totale de la zone Z_i ,

☒ P_{depart} = Puissance totale du départ,

☒ L_{depart} = Longueur totale du départ,

Le SAIDI (respectivement SAIFI et l'END) pour un départ est donc égale à la somme des SAIDI (respectivement SAIFI et END) des trois zones. On a donc :

$$\text{SAIDI}_{\text{depart}_j} = \sum_{i=1}^3 \text{SAIDI}(i), \text{SAIFI}_{\text{depart}_j} = \sum_{i=1}^3 \text{SAIFI}(i) \text{ et } \text{END}_{\text{depart}_j} = \sum_{i=1}^3 \text{END}(i)$$

D'où en notant n le nombre de départs du réseau,

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{SAIDI}_{\text{depart}_j}}{n}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{SAIFI}_{\text{depart}_j}}{n}$$

$$\text{END} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{END}_{\text{depart}_j}}{n}$$

III 3.3. Planification long terme et planification moyen terme:

On distingue deux horizons de temps pour la planification[19].

La planification long terme: permet de construire une cible à 30 ans à partir d'un ensemble d'hypothèses cohérentes (évolution de la charge et de la production entre autres) et de contraintes à respecter (techniques, économiques, fiabilité entre autres).

La planification moyen terme: consiste à construire une cible intermédiaire à 10 ans qui est un sous-ensemble de la cible à long terme. Elle permet de donner l'ensemble des opérations à effectuer sur le réseau sur la période [0-10ans].

La Figure suivante résume la démarche à suivre pour mettre en place les schémas directeurs.

Les principaux paramètres influençant le choix de la cible sont les suivants :

- ☒ L'emplacement des postes sources HTB/HTA par rapport aux charges à desservir, il dépend des contraintes géographiques (place, passage de lignes HTB, sortie des départs HTA) et de contraintes économiques.
- ☒ La conception de la source, selon la nature du poste, certaines structures sont mieux adaptées que d'autres.

- ☒ Les contraintes topologiques, représentent l'ensemble des contraintes liées aux constructions de l'homme (pont, passage à niveau entre autres) mais aussi les contraintes géographiques (réserve naturelle).
- ☒ Les densités de charges (si la charge est dense alors on peut améliorer la qualité générale à moindre coût). Des structures comme la coupure d'artère, la grille ou la maille sont bien adaptées à de fortes densités de charges. Par contre, si la densité de charges est faible, des structures en antenne conviennent plus car sont moins coûteuses.).

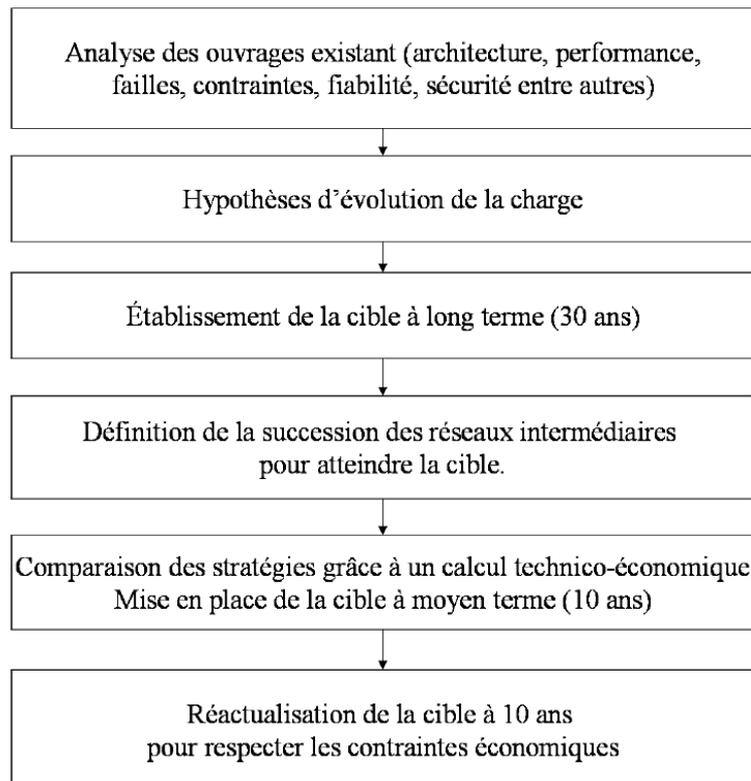


Figure III-4 : Procédure de mise en place des schémas directeurs[20]

I.3.4. Calcul technico-économique pour le choix final d'une stratégie:

Le Figure sus-dessus indique qu'un calcul technico-économique permet de comparer puis de choisir les différentes solutions envisagées. Ce calcul doit donc prendre en compte l'évolution des charges à alimenter, les différents coûts (investissement, pertes), le niveau de qualité souhaitée et enfin, les contraintes environnementales (choix du matériel et zone d'implantation). Afin de prendre en compte la fluctuation de la monnaie, le calcul technico-économique utilise le principe de l'actualisation. Le taux d'actualisation est une valeur i fixée qui traduit le fait que N euros aujourd'hui vaudront $N \times (1+i)^t$ dans t années. Autrement dit si à l'année t , une entreprise dépense $D(t)$ euros alors aujourd'hui cela revient à $D(t)/(1+i)^t$.

Le taux d'actualisation était fixé à 8 % [DGE 2003].

On définit ainsi le coût actualisé à prendre en compte dans une étude technicoéconomique. Soit $C(t)$ pour $t = 1, \dots, n$, l'ensemble des coûts d'une entreprise. Alors le coût actualisé est défini par la formule suivante :

$$C_{act} = \sum_{n=0}^N \frac{C(t)}{(1+i)^n}$$

I.3.5. Exemple d'application : étude de raccordement d'un client HTA:

On veut connecter un client HTA à un poste source HTB/HTA par une liaison souterraine. Le but est de choisir le câble qui minimise l'investissement et le coût actualisé des pertes sur la durée de vie de l'ouvrage qui est de 40 ans. Cette charge est modélisée par une courbe de charge comme indiquée sur la Figure suivante.

On peut estimer la consommation du client en considérant qu'il fonctionne à puissance maximale pendant une durée H . Des valeurs typiques de H sont de 4000 h en urbain et 3200 h en rural. Ces chiffres reposant sur des historiques donnent un équivalent des pertes correct[Source ERDF].

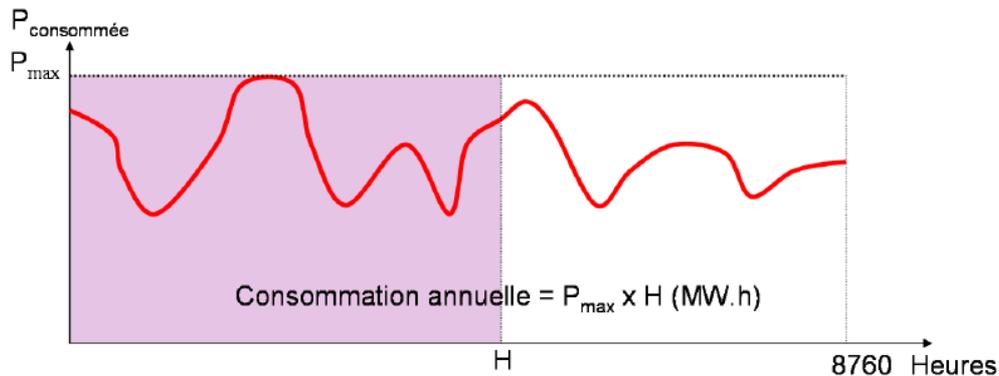


Figure III-5 : Approximation de la consommation annuelle d'un client

L'ensemble des données électriques et économiques est résumé dans le Tableau suivant:

Données électriques		Données économiques	
Tension d'alimentation U (kV)	20	Taux d'actualisation	8%
Puissance consommée à la pointe P_{max} (MW)	5	Taux de croissance annuelle de la charge	0,50%
Durée d'utilisation à la P_{max} H (h)	4000	Coût d'une tranchée (k€/km)	15,2
Facteur de puissance $\cos(\phi)$		Coût de deux tranchées (k€/km)	

Tableau III-2 : Données électriques et économiques

Les valeurs normalisées des câbles sont données dans le Tableau suivant:

CABLES SOUTERRAIN HTA					
Type	Section (mm ²)	Résistance (ohm/km)	Réactance (ohm/km)	Intensité maximale admissible(A)	Coût (k€/km)
AL	95	0,320	0,1	230	12,8
AL	150	0,206	0,1	300	14,8
AL	240	0,125	0,1	405	20,1
CU	240	0,075	0,1	505	30,1

Réalisation de tranchée pour 1 câble (k€/km)	15,2
Réalisation de tranchée pour 2 câbles (k€/km)	18,4

Tableau III-3: Câbles normalisés utilisés [Source ERDF]

I.3.5.1. Choix de la solution la plus économique

Le câble choisi doit respecter la contrainte de courant admissible à l'horizon choisi (40 ans) avec des hypothèses d'évolution de la charge. Le résultat obtenu garantira la tenue du conducteur mais ne sera pas forcément l'optimum technico-économique. Un calcul de coût actualisé prenant en compte l'investissement initial et les pertes cumulées permettra alors, dans un second temps de choisir le bon type de conducteur. Le choix final respectera donc les contraintes techniques et minimisera le coût actualisé des pertes[21].

Pour dimensionner le conducteur, il faut déterminer la puissance qui sera consommée à l'horizon choisi. On suppose que les charges évoluent de manière constante de t% par an sur N années. La puissance consommée à l'année N est :

$$P_{\max}(N) = P_{\max}(0) \times (1+t)^N$$

Le lien entre la puissance maximale consommée, $P(N)_{\max}$, et l'intensité, $I(N)_{\max}$, qui transite dans les conducteurs est :

$$P_{\max}(N) = U \times I_{\max}(N) \times \sqrt{3} \times \cos(\phi)$$

U = tension (kV)

cos(φ) =facteur de puissance de la charge

On obtient donc :

$$I_{\max}(N) = \frac{P_{\max}(N)}{U \times \sqrt{3} \times \cos(\phi)}$$

On peut ainsi déterminer le type de conducteur et sa section minimale. Dans notre exemple,

$$I_{\max}(N) = \frac{5 \times 10^6}{20 \times 10^3 \times \sqrt{3} \times 0,9} = 160,37A.$$

Ainsi dans cet exemple tous les types de câbles conviennent car leur courant maximal admissible est supérieur. Il serait alors logique de prendre le moins cher c'est-à-dire le 95 mm². Un calcul de coût actualisé permet de vérifier si cette stratégie est la meilleure à long terme.

Le coût actualisé sur N années du réseau pour différents types de conducteurs permet de déterminer la section économique du câble à utiliser tout en tenant compte de la section minimale imposée par la contrainte de courant maximal. Cette méthode de calcul prend en compte l'investissement initial (coût de la fourniture du conducteur) ainsi que celui des pertes par effet Joule. L'expression du coût actualisé est donc :

$$C_{act} = I + \sum_{n=0}^N \frac{C \times P(n)}{(1+i)^n}$$

C_{act} = coût actualisé en k€

I = investissement à l'année 0 en k€

C = coût d'un kW de pertes à la pointe en k€

P(n) = pertes à la pointe à l'année n en kW

i = taux d'actualisation en %

L'expression des pertes est donnée par la formule suivante :

$$P(n) = 3 \times R \times I(n)^2 \text{ avec } I(n) = \frac{S(n)}{\sqrt{3} \times U} \text{ d'où } P(n) = \frac{R \times S(n)^2}{U^2}.$$

Par ailleurs, d'après le paragraphe précédent :

$$S(n) = S(0) \times (1+t)^n, \text{ } S(0) \text{ étant la charge à l'année 0.}$$

$$\text{Ainsi, } P(n) = \frac{R \times S(0)^2 \times (1+t)^{2n}}{U^2} \text{ d'où } C_{act} = I + C \times \frac{RS_0^2}{U^2} \sum_{n=0}^N \left(\frac{(1+t)^2}{1+i} \right)^n.$$

On pose $X = \frac{(1+t)^2}{1+i}$ alors $X \leq 1$ et $\sum_{n=0}^N X^n$ est une suite géométrique de raison X. Ainsi

l'expression du coût actualisé est :

$$C_{act} = I + C \times \frac{RS_0^2}{U^2} \times \frac{1 - X^{N+1}}{1 - X}$$

Le coût actualisé C_{act} est donc calculé pour les 4 types de câbles présentés dans le Tableau sus-dessus, dans le cas où l'on met un seul câble et dans le cas où l'on en met deux ; ceci permet d'augmenter le courant maximal admissible. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau suivant.

	Coût actualisé pour 1 câble (k€)	Coût actualisé pour 2 câbles (k€)
95² AL	185,10	152,55
150² AL	143,11	137,56
240² AL	121,03	142,42
240² AL	120,86	172,33

Tableau III-4 : Coût actualisé des différentes solutions possibles

Le calcul de coût actualisé indique qu'à long terme la solution de mettre un câble de section 240 mm² est plus économique que celle de mettre un câble à 95 mm².

III.4. Conclusion

la planification a pour but d'étudier chaque solution potentielle à un problème technique donné de façon à trouver le meilleur compromis technico-économique. Ces problèmes peuvent être des problèmes court terme (comme le raccordement d'un client ou des opérations de maintenance) ou des problèmes long terme (restructuration du réseau, création d'un nouveau poste source HTB/HTA).

Dans la planification traditionnelle, le paramètre production décentralisée n'est pas pris en compte. Ainsi, il est possible qu'une insertion massive de ces productions ait un impact sur le bon fonctionnement du réseau de distribution et donc sur la manière dont il est planifié.

- [1] D4210 Réseaux de distribution Structure et Planification par Philippe CARRIVE
- [2] D 4240 Exploitation des réseaux de distribution : systèmes informatiques par Marc LECOQ et Robert MICHON.
- [3] D 4070 réseaux de transport et d'interconnexion de l'énergie électrique, développement et planification. Par François MESLIER et Henri PERSOZ.
- [4] Planification des réseaux électriques", Edition EDF, collection EYROLS
- [5] Règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité et règles de conduite du système électrique, par Ministère de l'énergie et des mines, 2008.
- [6] T. Gönen., Power Distribution, Book chapter in Electrical Engineering Handbook, Elsevier Academic Press, London, England, 2004.
- [7] G. Andersson., Modelling and Analysis of Electric Power Systems, Lecture Notes Swiss Federal Institute of Technology Zürich 2008.
- [8] T. Wildi., Electrotechnique, McGraw Hill 3rd Edition. 2000
- [9] G.F. MOORE, «Évolution des disjoncteurs des réseaux de transport» Revue Générale de l'Électricité, septembre 1971.
- [10] M. LAMI, « Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique », Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [11] S. THEOLEYRE, « Les Techniques de Coupure en MT », Cahier technique N°193, Schneider Electric.
- [12] PATRICK JACOB, « Distribution de l'énergie », réseaux de distribution, version 1, avril 2014
- [13] B. ENACHEANU, «Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution,» Grenoble, 2007.
- [14] SONELGAZ, Guide Technique, les réseaux torsadé 1993.
- [15] Daniel Donati . « Planification des réseaux et optimisation économique des sections d'âme de câbles électriques de puissance». Publications RAVEL octobre 1994.
- [16] Sonelgaz, Manuel d'utilisation de programme C.A.R.A.T, Février 1995.
- [17] SourceForge.net OpenDSS, <http://sourceforge.net/projects/electricdss/> consulté en juillet 2011.
- [18] Eaton.com cyme, www.eaton.com/cyme janvier 2015
- [19] Bouaraguia Abdelmoudjid et Benhamada Abdelmounaim , «L'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution», Mémoire de master en réseaux électrique , □□ Université kasdi merbah OUARGLA 2016.
- [20] BENCHADI Siham et KHIARI Sylia, « Planification de réseau électrique de la nouvelle ville Ighzer Azarif », Mémoire de master en réseau électrique, université Abderahmane MIRA Bejaia 2017.
- [21] P. Abadie, « Journal officiel de la république française, arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de transport d'une installation de production d'énergie électrique » ,

Symbole	Mot clé
	Ligne ou câble triphasé
	La terre
	Arrivée HTA
	Départ HTA ou BT
	Court-circuit
	Disjoncteur
	Interrupteur fusible
	Transformateur de puissance
	Fusible
	Transformateur de courant
	Transformateur de tension (potentiel)