



n°169

**la conception des
réseaux
industriels en
haute tension**

Georges THOMASSET

**Diplômé ingénieur de l'Institut
d'Electrotechnique de Grenoble
(IEG) en 1971.**

**Depuis, il a réalisé des études de
conception de réseaux industriels
complexes au sein de la Direction
Technique dans la Société
Merlin Gerin.**

**Après avoir dirigé le bureau d'études
«distribution publique Moyenne
Tension et installations
hydroélectriques» il est, depuis
1984, responsable du service
technique de l'unité industrie du
département de réalisation
d'ensembles.**

lexique

flicker : fluctuations périodiques de luminance d'une source lumineuse, ou «papillotement».

HTA et HTB : domaines de tension définis par le décret français du 14 novembre 1988.

Remarque :

Les niveaux de tensions font l'objet de différents classements selon les décrets, les normes, et autres spécifications particulières telles celles de certains distributeurs d'énergie, ainsi en ce qui concerne les tensions alternatives supérieures à 1 000 V :

■ le décret français du 14 novembre 1988 définit deux domaines de tension :

HTA = $1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$,

HTB = $U > 50 \text{ kV}$.

■ le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) dans sa circulaire du 27 juillet 1992 précise :

MT = $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$,

HT = $U > 35 \text{ kV}$.

■ la publication CEI 71 précise des gammes de tensions les plus élevées pour le matériel :

gamme A = $1 \text{ kV} < U < 52 \text{ kV}$,

gamme B = $52 \text{ kV} \leq U < 300 \text{ kV}$,

gamme C = $U \geq 300 \text{ kV}$.

Une révision est prévue, elle retient seulement deux gammes :

gamme I = $1 \text{ kV} < U \leq 245 \text{ kV}$,

gamme II = $U \geq 245 \text{ kV}$.

■ le distributeur national d'énergie en France, EDF, utilise maintenant le classement du décret cité ci-dessus.

plan de protection d'un réseau :

organisation globale des protections électriques regroupant : le système de protection retenu, le choix des appareils et de leurs réglages.

récepteurs "à temps zéro" :

récepteurs pour lesquels aucune absence d'alimentation n'est tolérée.

réseau privé : réseau électrique alimentant un ou plusieurs sites d'utilisation (usines) appartenant généralement à un même propriétaire.

réseau public: réseau électrique appartenant à un distributeur national ou local d'énergie et desservant plusieurs consommateurs indépendants.

stabilité dynamique d'un réseau :

faculté qu'a un réseau, comportant plusieurs machines synchrones, de reprendre un fonctionnement normal à la suite d'une perturbation brutale ayant entraîné une modification provisoire (cas d'un court-circuit) ou définitive (ouverture d'une ligne) de sa configuration.

structure d'un réseau : plan d'ensemble d'un réseau, souvent représenté sous la forme d'un schéma unifilaire, qui précise la disposition relative (interconnexions, séparations de circuits,...) des différentes sources et des utilisations.

usine : regroupement (en un lieu) de plusieurs utilisations d'énergie.

annexes

annexe 1 : extension d'un réseau industriel existant	hypothèses	p. 19
	calcul approché de la réactance de limitation	p. 19
annexe 2 : moyens informatiques utilisés pour les études de réseaux	logiciels de calculs	p. 20
	système expert d'évaluation de la qualité de conception d'un réseau électrique	p. 20
annexe 3 : principe général de la compensation		p. 20
annexe 4 : choix du schéma des liaisons à la terre pour un réseau industriel HT		p. 21
annexe 5 : chute de tension dans un réseau		p. 22
annexe 6 : les étapes de conception d'un réseau industriel		p. 22
annexe 7 : bibliographie		p. 24

la conception des réseaux industriels en haute tension

sommaire

1. besoins et principales contraintes à satisfaire	les besoins à satisfaire	p. 4
	les contraintes principales	p. 5
2. conception des réseaux industriels - principales règles	bilan de puissance, coefficients d'utilisation et de simultanéité	p. 7
	choix des tensions	p. 7
	compensation de l'énergie réactive	p. 7
	sources de sécurité et de remplacement	p. 7
	production autonome d'énergie électrique	p. 8
	fractionnement des sources	p. 8
	schéma général électrique	p. 8
	3. validation et optimisation technico-économique	choix du schéma des liaisons à la terre (régime de neutre)
définition des canalisations électriques		p. 9
étude de la coordination de l'isolement		p. 9
définition d'un système de protection		p. 9
calcul des intensités des courants de court-circuit		p. 10
calcul des variations de tension en régimes normal et perturbé		p. 11
choix du mode de démarrage des moteurs		p. 11
stabilité dynamique des réseaux		p. 12
synthèse		p. 13
4. choix de la structure et exploitation optimale des réseaux		structures types des réseaux
	exemple concret d'une structure	p. 16
	choix des équipements	p. 16
	exploitation optimale	p. 16
5. conclusion		p. 18
annexes	voir page ci-contre	

Soumis à une concurrence toujours plus âpre, les industriels doivent pratiquer une gestion très rigoureuse et avoir une disponibilité importante de leur outil de production.

Les réseaux électriques livrent l'énergie nécessaire à l'outil de production. La continuité d'alimentation des récepteurs électriques est recherchée dès la conception du réseau, et en particulier lors des choix préliminaires du schéma unifilaire.

La réduction des coûts de réalisation et d'exploitation d'une installation électrique, avec un fonctionnement sûr et sans défaillance, sont des conditions essentielles de rentabilité. Cette optimisation technico-économique dépend d'une analyse préalable, détaillée et globale, à savoir :

- des besoins et contraintes spécifiques au type d'industrie envisagée,
- de l'intégration des limites et contraintes du réseau de distribution public,
- des normes et usages locaux,
- des spécificités du personnel utilisateur, exploitant et de maintenance.

La présente étude se limite aux études de conception des installations industrielles Haute Tension -HTA et HTB- de forte puissance ayant comme caractéristiques principales :

- de puissance installée de l'ordre de 10 MVA,
- avec une production autonome d'énergie électrique (éventuelle),
- alimentées à partir d'un réseau national de transport ou de distribution (≥ 20 kV),
- comportant une distribution privée en Moyenne Tension.

1. besoins et principales contraintes à satisfaire

Les réseaux électriques industriels doivent assurer, aux coûts optimaux d'investissement, d'exploitation et de pertes de production, l'alimentation de tous les récepteurs de l'usine en tenant compte :

■ des besoins à satisfaire :

- la sécurité des personnes,
- la sécurité des biens,
- la continuité d'alimentation,
- la facilité d'exploitation du réseau,
- le coût minimal de l'installation,
- l'optimisation de l'énergie électrique (coût / qualité),
- les évolutions et extensions futures du réseau,

■ la rénovation du réseau ;

■ des contraintes imposées liées :

- au processus industriel,
- au processus électrique,
- au distributeur d'énergie,
- au climat et à la géographie du site,
- aux normes, prescriptions et usages locaux.

Il est évident que tous les besoins ne pourront pas être satisfaits de façon optimale : le concepteur doit rechercher le meilleur compromis.

les besoins à satisfaire

La sécurité des personnes

Même si des normes ou règles n'existent pas dans tous les pays, il convient de respecter certaines notions évidentes :

- interdiction d'accéder aux pièces mises sous tension (protection contre les contacts directs),
- système de protection contre l'élévation du potentiel des masses métalliques (protection contre les contacts indirects),
- interdiction des manœuvres de sectionneur de ligne en charge,
- interdiction de mise à la terre sous tension,
- élimination rapide des défauts.

La sécurité des biens

Les installations électriques ne doivent pas être soumises à des contraintes qu'elles ne pourraient pas supporter. Le choix des matériels et équipements est donc capital. Deux grandeurs

électriques sont à prendre en compte pour éviter l'incendie et limiter les effets destructeurs :

- les surintensités (court-circuit et surcharge),
- les surtensions.

Les solutions retenues doivent assurer au minimum :

- l'élimination rapide du défaut, et la continuité d'alimentation des parties saines du réseau (sélectivité),
- la fourniture des informations sur la nature du défaut initial, pour une intervention efficace.

La continuité d'alimentation des récepteurs

La continuité d'alimentation des récepteurs est nécessaire pour des raisons de :

- sécurité des personnes, exemple : éclairage ;
- maintien de l'outil de production, exemple : tréfilerie de verre ;
- productivité ;
- confort d'exploitation, exemple : procédure simplifiée de redémarrage d'une machine, d'un atelier.

Selon leurs impératifs de fonctionnement, les récepteurs se répartissent en trois familles :

- les récepteurs "ordinaires",
- les récepteurs "essentiels",
- les récepteurs "à temps zéro" pour lesquels aucune absence d'alimentation n'est tolérée.

La facilité d'exploitation du réseau

Afin de mener à bien leurs tâches avec sûreté et fiabilité, les exploitants du réseau doivent avoir à leur disposition :

- un réseau facile à conduire afin d'agir avec certitude en cas d'incident ou de manœuvre ;
- des appareils et équipements d'un dimensionnement suffisant, à faible entretien et facilement réparables (maintenabilité) ;
- des moyens de contrôle-commande performants facilitant la conduite du réseau par la centralisation en temps réel et en un lieu unique de toutes les informations relatives à l'état du "process électrique", en régime normal et perturbé.

Le coût minimal de l'installation électrique.

Le coût minimal de l'installation électrique n'est pas nécessairement la recherche du coût minimal initial mais la somme de trois coûts :

- le coût de l'investissement initial,
- les coûts d'exploitation et de maintenance,
- les coûts de pertes de production liés à la conception et au plan de protection (système de protection retenu, choix des appareils et des réglages) du réseau.

L'optimisation de l'énergie électrique

Lorsqu'une usine comporte des générateurs d'énergie électrique, il est nécessaire de gérer au mieux l'énergie fournie par le distributeur et l'énergie produite localement.

Un système de contrôle-commande peut optimiser le coût de l'énergie consommée dans l'usine en fonction :

- du contrat souscrit avec le distributeur (tarification selon l'instant, heure, jour et saison) ;
- de la disponibilité des générateurs de l'usine ;
- des impératifs du processus industriel.

Les évolutions et extensions futures du réseau

Il y a lieu d'apprécier avec le plus grand soin, lors de la conception d'un réseau industriels, les évolutions futures des usines, surtout si des extensions sont prévisibles.

Les éventuelles et futures modifications sont à prendre en compte :

- dans le dimensionnement des organes principaux d'alimentation (câbles, transformateurs, appareils de coupure),
- dans la conception du schéma de distribution,
- et dans le calcul des surfaces réservées aux locaux électriques. Cette anticipation conduit à une meilleure flexibilité de la gestion de l'énergie.

La rénovation des réseaux

Les consommations d'énergie électrique augmentent avec les extensions nécessaires pour les nouvelles fabrications et les nouvelles

machines toujours plus puissantes. Des rénovations et/ou des restructurations de réseaux sont alors obligatoires.

Une étude de rénovation d'un réseau doit être menée avec plus d'attention qu'une étude d'une nouvelle installation car d'autres contraintes existent, et notamment :

- tenues électrodynamique et diélectrique insuffisantes de certains appareils ou équipements existants ;
- capacité à alimenter de gros récepteurs (courants de démarrage, stabilité dynamique,...) ;
- surface et hauteur des locaux électriques existants non modifiables ;
- situation géographique des équipements et des récepteurs imposée.

Exemple d'une rénovation avec adjonction d'un nouveau transformateur : l'installation d'une réactance triphasée entre l'ancienne installation et le nouveau transformateur permet de ne pas trop augmenter l'intensité du courant de court-circuit et donc de conserver les équipements existants (cf. annexe 1).

La qualité des études

Les études de conception et de détails doivent être menées avec méthode et rigueur. Ainsi l'obtention de la certification ISO 9001, conduit à mettre en place des procédures décrivant les étapes essentielles des études de conception et de détail dans le but de les maîtriser et de satisfaire au mieux les besoins du client.

Le Département de Réalisations d'Ensembles de la Société Merlin Gerin a obtenu la certification ISO 9001 en 1992.

les contraintes principales

Contraintes liées au processus industriel

Outre le besoin d'une forte continuité d'alimentation nécessaire à certains processus industriels, ces mêmes processus imposent aussi des contraintes :

- l'alimentation et surtout le démarrage des très gros moteurs entraînant des broyeurs, concasseurs, ventilateurs, pompes, bandes transporteurs (cause notamment de chute de tension importante au démarrage) ;
- l'alimentation des fours à arc dont l'arc souvent instable provoque des

chutes de tension non équilibrées, brèves mais répétées (ayant pour conséquence le flicker), et peut produire des harmoniques ;

■ l'alimentation des dispositifs électroniques de forte puissance (redresseurs, thyristors, ...) qui génèrent sur le réseau des déformations importantes de l'onde de tension (harmoniques) et dégradent le facteur de puissance ; c'est le cas pour des chaînes d'électrolyse, des fours électriques à courant continu, et des moteurs à vitesse variable.

De plus, certains processus industriels polluent leur environnement : ils produisent des substances (poussières, gaz) parfois corrosives pouvant bloquer les mécanismes ou réduire les performances des appareils électriques (ex : tenue diélectrique) ou encore provoquer des explosions en présence d'arc électrique.

Contraintes liées au processus électrique

Au cours de l'étude il faut tenir compte des diverses conditions "électrotechniques" auxquelles doit satisfaire tout réseau électrique en particulier :

- limitation de l'intensité des courants de court-circuit et de leur durée,
- démarrage ou redémarrage des gros moteurs sans chute de tension excessive,
- stabilité des alternateurs à la suite d'un incident.

Contraintes imposées par le réseau public de distribution d'énergie électrique

■ puissance de court-circuit
La valeur de la puissance de court-circuit du réseau amont alimentant le réseau privé est un élément décisif quant au choix :

- de la structure du réseau privé de distribution,
- de la puissance maximale des récepteurs,
- de certains récepteurs sensibles aux chutes de tension.
- schéma des liaisons à la terre (régime du neutre) du réseau public
Il est souvent conservé pour le réseau privé, mais parfois non compatible avec certains récepteurs. Il faut alors créer un réseau particulier avec :

- un type de protection électrique contre les défauts phase/terre,
- un mode particulier d'exploitation du réseau (recherche et/ou élimination du défaut par les agents d'exploitation dans le cas du régime de neutre isolé).

■ micro coupures ou baisses importantes fugitives de tensions mono ou polyphasées.

La présence de tels phénomènes peut entraîner des perturbations, voire des arrêts de production et des destructions de machines. Ainsi elle peut provoquer :

- des erreurs de fonctionnement et/ou des pertes d'informations des systèmes informatiques de process industriels (calculateurs, automates industriels), de gestion ou de calculs scientifiques ;
- la destruction mécanique d'un moteur, de son accouplement et/ou de la machine entraînée. Cela arrive lors d'une micro-coupure (réalimentation d'un moteur encore en mouvement), en effet le couplage peut se réaliser en opposition de phase entre la tension du réseau et la tension résiduelle restituée par le moteur, le courant absorbé par le moteur est alors très important, de 4 à 15 fois le courant nominal, et engendre des efforts électrodynamiques excessifs.

■ les surtensions d'origine externe, en particulier les coups de foudre (cf. Cahier Technique n°168).

■ valeur et qualité de la tension d'alimentation :

- la valeur de la tension d'alimentation impose en partie l'organisation des tensions du réseau privé. En effet, si l'alimentation est réalisée en Haute Tension, il peut être intéressant de conserver cette valeur de tension pour la distribution principale d'une usine ;
- la qualité de la tension d'alimentation. Différentes variations de tension peuvent gêner voir empêcher le bon fonctionnement des équipements de production. Le tableau de la figure 1 présente ces défauts, leurs causes et conséquences ainsi que les principaux remèdes.

Remarques :

En terme de qualité de l'alimentation, il faut que les variations de la fréquence soient acceptables $\pm 2\%$ et que les taux d'harmoniques de tension soient inférieurs à 3 %.

variations de la tension	quelques %	5 à 25 %	5 à 25 %	100 %
durée	1/100 à 1 s	0,5 à 20 s	20 s à 1 heure	0,1 à 0,3 s ou de 10 à 30 s
périodicité	OUI	NON	NON	NON
causes	présence de four électrique à arc	<ul style="list-style-type: none"> ■ démarrage des gros moteurs ■ défaut mono ou polyphasé 	absence de régulation de la tension aux postes source	système de réenclenchement rapide ou/et lent des lignes HT
conséquences	variation de l'éclairage à incandescence (Flicker)	<ul style="list-style-type: none"> ■ risque d'instabilité du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ■ surcharge des moteurs ■ risque important d'instabilité du réseau 	suspension momentanée de l'alimentation de tous les récepteurs
principaux remèdes	employer des compensateurs statiques d'énergie réactive	<ul style="list-style-type: none"> ■ adapter le mode de démarrage ■ accroître la rapidité du plan de protection 	équiper les transformateurs de régulateurs en charge	prévoir des disjoncteur-shunt

fig. 1 : les variations de tension, leurs causes, leurs conséquences et les principaux remèdes.

Pour apprécier la qualité de l'énergie électrique fournie et si nécessaire l'augmenter, un grand distributeur national européen, a installé plus de 2000 appareils enregistreurs sur l'alimentation de gros sites industriels. Ces appareils mesurent :

- les tensions et intensités efficaces,
- les puissances actives et réactives,
- les coupures brèves et longues,
- les creux de tension,
- les tensions et intensités harmoniques,
- le déséquilibre de tension.

Ils détectent aussi les signaux des télécommandes de 175 et 188 Hz.

Contraintes climatiques et géographiques

Pour définir au mieux les caractéristiques des équipements et des appareils, selon les types d'installations, il convient de connaître :

- les températures moyennes et maximales journalières,
- le taux d'humidité à la température maximale,
- la vitesse maximale des vents,
- la présence de givre, de glace, de vents de sable,
- l'environnement (atmosphère corrosive ou risque d'explosion),
- l'altitude,

- le niveau kéraunique de la région (fréquence des coups de foudre),
- les difficultés d'accès (pour le transport des matériels, mais aussi pour la maintenance).

Respect des normes et usages locaux

Sur ce point il faut particulièrement connaître :

- les normes d'appareillage et d'installation nationales et/ou internationales,
- les réglementations et prescriptions particulières au complexe industriel,
- les usages locaux.

2. conception des réseaux industriels principales règles

L'objet de ce chapitre est d'expliquer comment la conception d'un réseau industriel prend en compte l'ensemble des obligations (besoins et contraintes) décrites au chapitre précédent.

Les usines étant conçues pour fonctionner d'une manière continue, au stade de l'étude toute interruption de l'alimentation en énergie électrique doit donc être évaluée et ses conséquences examinées, afin de déterminer les mesures à prendre.

La méthode proposée dans ce chapitre comporte deux phases :

- 1- la recherche de l'adéquation technique entre les besoins et les contraintes (voir chapitre II),
- 2- l'optimisation technico-économique par la maîtrise de certains calculs et les concepts présentés ci-après.

L'annexe 2 liste, sans être exhaustive, les principaux logiciels de calcul utilisés par les ingénieurs spécialistes d'études de réseaux.

bilan de puissance, coefficients d'utilisation et de simultanéité

C'est la première étape essentielle de l'étude de la conception d'un réseau. Elle doit cerner et localiser géographiquement les valeurs des puissances.

Bilan de puissance

Il faut :

- distinguer les puissances actives, réactives et apparentes ;
- grouper les puissances par zones géographiques (3 à 8 zones) suivant l'étendue du site ;
- identifier par zone les récepteurs "ordinaires" - "essentiels" - "à temps zéro".

Coefficients d'utilisation et de simultanéité (cf. fig. 2)

choix des tensions

Le choix des tensions est déterminé par la fonction à réaliser : transport,

distribution ou utilisation. Ainsi, en HT, la tension de distribution n'est pas nécessairement identique à la tension d'utilisation : par exemple, dans une usine la tension de 20 kV peut être une valeur optimale pour la distribution, eu égard aux puissances et aux distances des ateliers par rapport au poste principal, et cela bien que la puissance de ses dix plus gros moteurs impose une tension d'utilisation de 6,6 kV.

compensation de l'énergie réactive

Le distributeur local d'énergie impose généralement au point de livraison du client une valeur minimale du facteur de puissance ($\cos \varphi$).

Pour satisfaire cette exigence, une compensation de l'énergie réactive est souvent nécessaire, elle peut être réalisée soit :

- au niveau de la sous station (ou du tableau principal) : compensation **globale** ;
- au niveau des récepteurs : compensation **répartie**.

Le principe général de compensation avec des condensateurs est présenté en annexe 3.

Remarque : une forte compensation avec des batteries de condensateurs fixes peut entraîner des surtensions. Un cas particulier est le phénomène d'auto-excitation des machines asynchrones : les condensateurs associés à un moteur asynchrone (compensation répartie) peuvent donner lieu à des surtensions très importantes lors d'une rupture de la

tension d'alimentation. Ce phénomène est susceptible de se produire pour une compensation supérieure à 90 % du courant magnétisant, courant peu différent du courant à vide du moteur.

sources de sécurité et de remplacement

L'installation de source de sécurité se fait pour des raisons de protection des personnes (normes et textes législatifs), par exemple pour le balisage des voies d'évacuation. L'installation de source de remplacement est décidée pour maintenir en service l'outil de production ou pour disposer d'une plus grande souplesse d'exploitation.

production autonome d'énergie électrique

Une usine peut être dotée de moyens autonomes de production d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs à "temps zéro", pour des raisons tarifaires, ou lorsque le procédé de fabrication de l'usine rend disponible de l'énergie (thermique ou mécanique) par exemple sous forme de vapeur. Si le réseau public a une puissance de court-circuit et une qualité de tension et de fréquence suffisantes, il est préférable de faire fonctionner en parallèle les sources autonomes et le réseau public, car ce dernier aide à stabiliser le comportement des alternateurs de l'usine (tension et vitesse). Dans ces cas d'exploitation,

	moteurs	éclairage chauffage	prise de courant
coefficient d'utilisation	0,75	1	(**)
coefficient de simultanéité	0,70 (*)	1	0,1 à 0,3

* Dépend du process

** Dépend de leur destination

fig. 2 : ordre de grandeur des coefficients d'utilisation et de simultanéité.

un système de répartition des puissances actives et réactives entre les différents alternateurs et le réseau public est à prévoir.

Lors d'incidents électriques graves sur le réseau privé, ou sur le réseau public à proximité de l'usine, une instabilité peut se produire. Il peut être nécessaire de procéder, dans un délai extrêmement court (environ 0,2 secondes), à une séparation du réseau public (îlotage des circuits alimentés par les alternateurs) pour ne pas risquer l'arrêt total des installations. Cette séparation s'accompagne, en général, d'un délestage des récepteurs non essentiels du réseau privé, ceci afin d'éviter sa surcharge.

fractionnement des sources

Certains récepteurs provoquent des perturbations importantes sur le réseau de distribution privé. Le fractionnement des sources (cf. fig. 3) permet d'isoler ces récepteurs polluants et offre en plus deux avantages :

- avoir une meilleure sélectivité entre les protections, ce qui accroît la continuité d'alimentation des autres récepteurs ;

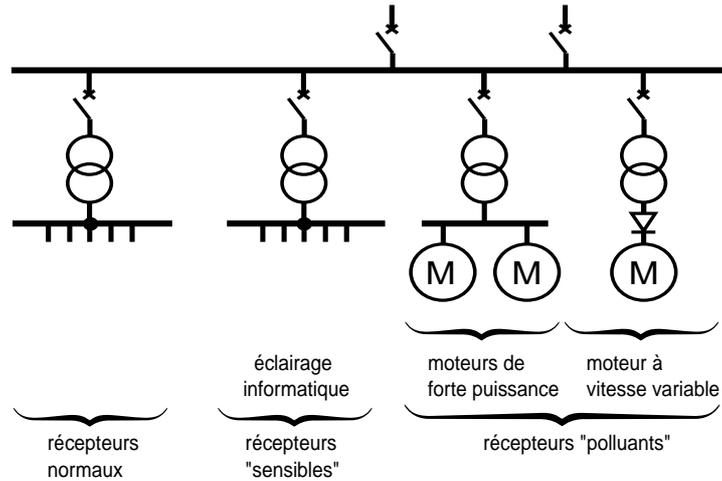


fig. 3 : le fractionnement des sources et un moyen de séparer les récepteurs « polluants » des autres récepteurs.

- permettre l'adaptation du schéma des liaisons du réseau à la terre (régime de neutre) aux utilisations.

schéma général électrique

A partir des différents éléments précédemment décrits dans ce chapitre, le concepteur de réseau établit une pré-structure qu'il affine en

fonction des contraintes du site industriel pour obtenir le "schéma unifilaire général de principe" de la distribution électrique de l'usine : c'est le point de départ de l'optimisation technico-économique du réseau. Le chapitre suivant présente simplement les différents choix possibles et les calculs nécessaires à la recherche de la solution optimale.

3. validation et optimisation technico-économique

choix du schéma des liaisons à la terre (régime de neutre)

Les normes et règlements imposent des protections contre les contacts directs et indirects pour toute installation électrique. En général les dispositifs de protection assurent une coupure automatique de l'alimentation (au premier ou au deuxième défaut phase terre selon le schéma défaut liaisons à la terre retenu). Il existe aussi des protections particulières adaptées à certaines situations spécifiques. Un schéma des liaisons à la terre des réseaux en Haute Tension, peut être choisi en fonction des critères présentés dans l'annexe 4. Mais, très souvent, il est intéressant de faire cohabiter dans un même réseau industriel différents schémas, chacun d'eux pouvant avoir un avantage prépondérant.

définition des canalisations électriques

Les canalisations électriques sont une part importante de l'investissement de l'installation électrique. Il est donc important, pour des raisons de sécurité et de coût, de :

- choisir au mieux le bon type de canalisations (câble),
- et de calculer au plus juste sa section minimale, mais en tenant bien compte des courants de court-circuit et de démarrage, des chutes de tensions, des pertes, ...

étude de la coordination de l'isolement

La coordination de l'isolement permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection des personnes et des matériels contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques, que ces surtensions aient pour origine le réseau ou la foudre. Trois types de surtensions peuvent provoquer un claquage et donc un

défaut d'isolement avec ou non une destruction de matériel :

- surtensions à fréquence industrielle (50 à 500 Hz),
- surtensions de manœuvre,
- surtensions atmosphériques (coup de foudre).

La coordination de l'isolement participe à l'obtention d'une plus grande disponibilité de l'énergie électrique. Sa maîtrise nécessite :

- de connaître le niveau des surtensions pouvant exister sur le réseau ;
- de définir un degré de performance recherché ou plus explicitement un taux de défaillance acceptable de l'isolement ;
- d'installer des dispositifs de protection tout à la fois adaptés aux composants du réseau (niveau d'isolement) et aux types de surtensions ;
- de choisir les divers composants du réseau à partir de leur niveau de tenue aux surtensions qui doit satisfaire aux contraintes précédemment définies.

Le Cahier Technique n° 151 décrit les perturbations de tension, les moyens de les limiter ainsi que les dispositions normatives pour permettre une distribution sûre et optimisée de l'énergie électrique, cela grâce à la coordination de l'isolement.

définition d'un système de protection

Lorsqu'un défaut apparaît sur un réseau électrique, plusieurs organes de protection situés dans différentes zones du réseau peuvent détecter simultanément cette anomalie. Leur déclenchement sélectif vise à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affecté par le défaut et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines de ce réseau. Le concepteur doit avant tout choisir un **système** de protection qui lui permet de définir les unités de protection les mieux adaptés. Il doit en outre définir un **plan** de déclenchement qui consiste à déterminer les réglages des relais en courant et en

temporisation afin d'obtenir la bonne sélectivité du déclenchement.

Différentes techniques de sélectivité sont habituellement mises en œuvre, elles exploitent ou associent différentes données et variables que sont le courant, le temps, des informations logiques, les dispositions géographiques,...

Sélectivité par le courant ou ampèremétrique.

Utilisée (en Basse Tension) lorsque l'intensité des courants de court-circuit diminue fortement avec la distance séparant la source du point de court-circuit considéré ou entre l'amont et l'aval d'un transformateur.

Sélectivité par le temps ou chronométrique

Utilisée en Basse Tension et très souvent en Haute Tension. Les déclenchements des appareils de protection (disjoncteurs) sont d'autant plus différés que les appareils sont proches de la source. Pour s'affranchir des régimes transitoires des courants, la durée minimale au point le plus éloigné de la source (immédiatement en amont de l'utilisation) est de 0,2 s voire 0,1 s si le réglage en courant est haut, avec une durée maximale de 1 s à l'origine du réseau privé. Les retards peuvent être à temps constant ou à temps dépendants de la valeur du courant de court-circuit.

Sélectivité par émission d'informations logiques, ou sélectivité logique

Elle est assurée par un ordre «d'attente logique» d'une durée limitée, émis par la première unité de protection située juste en amont du défaut et devant couper le circuit, vers les autres unités de protection situées plus en amont. Cette technique mise au point et brevetée par Merlin Gerin est détaillée dans le Cahier Technique n° 2. Le retard au déclenchement est faible et constant quelle que soit la position du défaut dans le réseau, ce qui favorise la stabilité dynamique du réseau et minimise les effets destructeurs d'un défaut ainsi que les contraintes thermiques.

Sélectivité à l'aide de protection directionnelle ou différentielle

Cette sélectivité permet une protection spécifique d'une portion ou d'un élément déterminé du réseau.

Exemples : transformateurs, câbles en parallèle, réseau bouclé, etc.

Sélectivité à l'aide de protection de distance

Elle est conçue à partir d'un « découpage » du réseau en zones. Les unités de protection localisent dans quelle zone est situé le défaut par le calcul de l'impédance du circuit considéré.

Cette technique est peu utilisée sauf si le réseau privé HT est très étendu.

Un exemple d'un système de protection utilisant plusieurs techniques de sélectivité est décrit par la figure 4.

Nota : dans ce paragraphe, les critères de choix des systèmes protection, des relais et les valeurs de réglage des protections ne sont pas abordés. De nombreux ouvrages traitent ces sujets, par exemple les Cahiers Techniques n°2 et 158.

calcul des intensités des courants de court-circuit

La connaissance des différentes valeurs des intensités des courants de court-circuit est nécessaire dans la recherche de l'optimum technico-économique pour déterminer :

- les valeurs de pouvoir de fermeture et de coupure, fonction des I_{cc} maximales crête et efficace ;
- les tenues aux efforts électrodynamiques des équipements et appareils électriques, fonction des I_{cc} maximales crête ;
- les réglages dans les études de sélectivité des déclenchements des protections, fonctions des I_{cc} efficaces maximales et minimales).

Le Cahier Technique n° 158, après un rappel des phénomènes physiques à prendre en compte fait le point sur les méthodes de calcul prévues par les normes.

En présence de machines tournantes (alternateurs ou moteurs) l'établissement d'un courant de court-circuit peut être décomposé en trois temps ou « régimes » :

- régime subtransitoire,
- régime transitoire,
- régime permanent.

Les régimes subtransitoires et transitoires sont liés à l'extinction du flux emmagasiné dans les machines

tournantes synchrones ou asynchrones.

Dans ces deux régimes il faut aborder la notion de composante asymétrique appelée aussi composante continue dont l'amortissement dépend du

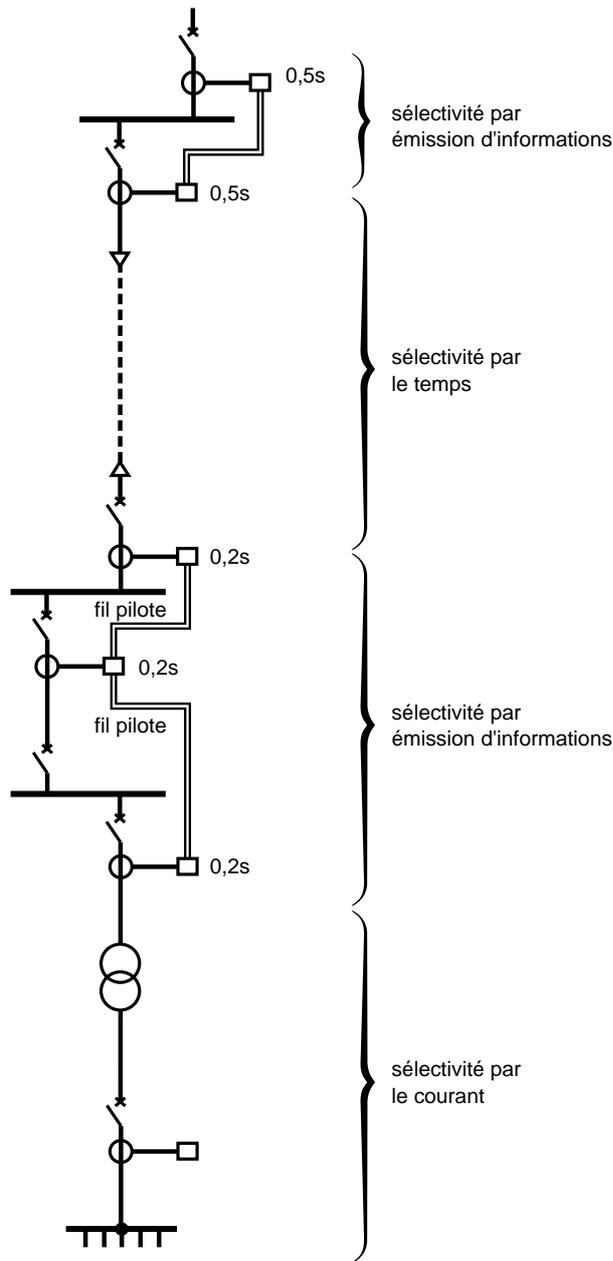


fig. 4 : système de protection utilisant plusieurs techniques de sélectivité, ampèremétrique, chronométrique et logique.

rapport R/X du réseau amont et de l'instant du défaut par rapport à la phase de la tension.

Enfin il convient de tenir compte de la contribution des moteurs à l'intensité du courant de court-circuit. En effet, lors d'un court-circuit triphasé, les machines asynchrones ne sont plus alimentées par le réseau et le flux magnétique de ces machines ne peut pas disparaître brutalement.

L'extinction de ce flux donne naissance à un courant subtransitoire puis transitoire qui augmente la valeur de l'intensité du courant de court-circuit du réseau.

La valeur totale de l'intensité du courant de court-circuit est alors la somme vectorielle de deux courants de court-circuit : celui de la source et celui des machines.

calcul des variations de tension en régimes normal et perturbé

En régime normal

Le calcul des variations de tension en régime normal est une étape de contrôle qui permet de vérifier les tensions tout au long du réseau.

Si les valeurs des tensions sont trop faibles, le concepteur vérifie que :

- les flux de puissance active et réactive sont normaux,
- les canalisations électriques sont bien dimensionnées,
- les puissances des transformateurs sont suffisantes,
- le principe de compensation de l'énergie réactive est judicieux,
- la structure du réseau retenue est bonne.

En régime perturbé

Le calcul des variations de tension en régime perturbé est nécessaire pour vérifier si les phénomènes ci-après ne conduisent pas à des chutes ou des élévations de tension excessives :

- démarrage d'un gros moteur (cf. fig. 5),
- fonctionnement dégradé du réseau (2 transformateurs en exploitation au lieu des 3 prévus pour la marche normale, par exemple),
- exploitation des réseaux à vide, avec ou sans compensation de l'énergie réactive.

L'annexe 5 indique l'expression et présente le diagramme vectoriel de la chute de tension dans un réseau.

choix du mode de démarrage des moteurs

Le mode de démarrage retenu (étoile-triangle, auto-transformateur, résistances ou réactances statoriques,...), doit évidemment permettre de disposer d'un couple d'accélération -Ca- suffisant (en général $Ca > 0,15 Cn$), mais aussi ne provoquer que des chutes de tension acceptables (< 15 %).

Rappel : l'équation qui régit l'état d'équilibre du moteur avec la mécanique qu'il entraîne est :

$$C'm - Cr = J \frac{d\omega}{dt}$$

$C'm$ = couple du moteur sous tension réelle d'alimentation (U_r),
 Cr = couple résistant de la mécanique entraînée,
 J = inertie de toutes les masses entraînées,
 $d\omega/dt$ = accélération angulaire,

$$C'm = C_m \cdot \left(\frac{U_r}{U_n}\right)^2$$

C_m = couple du moteur sous tension nominale (U_n).

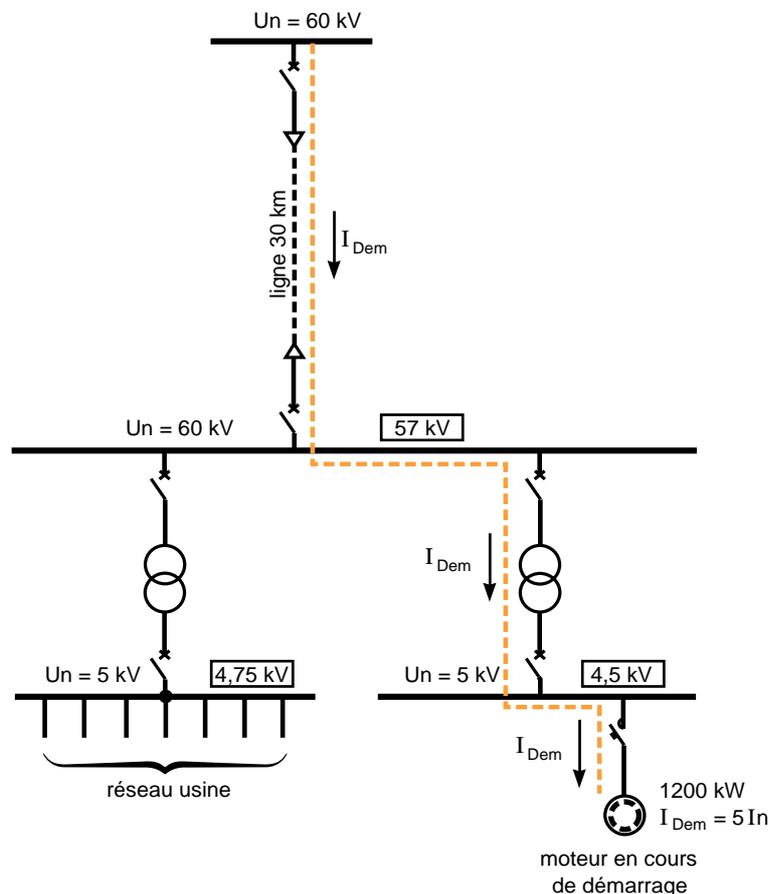


fig. 5 : exemple, pour l'installation d'un moteur de 1 200 kW alimenté par une ligne 60 kV de 30 km de longueur, de détermination de la valeur des variations de tension lors de son démarrage. A noter que la séparation de l'alimentation du «réseau usine» et du moteur a permis de n'avoir que 250 V de chute de tension sur le «réseau usine».

xx kV = tension lors du démarrage du moteur

$$Ca = C'm - Cr$$

Ca = couple d'accélération.

La courbe représentant Ca en fonction de la vitesse est donnée par la figure 6 ci-après.

Le tableau de la figure 7 montre les modes de démarrages les plus usités (pour plus de détails consulter le Cahier Technique n°165).

stabilité dynamique des réseaux

En régime non perturbé, l'ensemble des machines tournantes (moteurs et alternateurs) faisant partie de l'installation forme un système stable avec le réseau public d'alimentation. Cet équilibre peut être affecté par un incident sur l'un des réseaux (public ou privé) tel que : fluctuation importante de charges, modification du nombre de transformateurs, de lignes ou de sources d'alimentation, défaut polyphasé, etc.

Il se produit donc soit une instabilité passagère dans le cas d'un réseau bien étudié, soit une rupture de stabilité

si le phénomène perturbateur est très grave ou si le réseau a une faible capacité de reprise (puissance de court-circuit trop faible par exemple).

Comportement des moteurs asynchrones lors d'un défaut triphasé

Voici à titre d'exemple l'étude du comportement des moteurs asynchrones lors d'un défaut triphasé (cf. fig. 8).

Après élimination du défaut,

■ soit les moteurs ont des couples supérieurs aux couples résistants : ils peuvent réaccélérer et retrouver leur état stable ;

■ soit les moteurs ont des couples inférieurs aux couples résistants : ils poursuivent alors leur ralentissement en absorbant des courants importants qui sont détectés par les protections des moteurs et/ou du réseau, lesquelles provoquent le déclenchement de leur disjoncteur associé.

La reprise des moteurs, donc la stabilité dynamique du réseau, est favorisée par :

■ un plan de délestage adapté (déclenchement des moteurs ordinaires et non essentiels en cas de défauts graves) ;

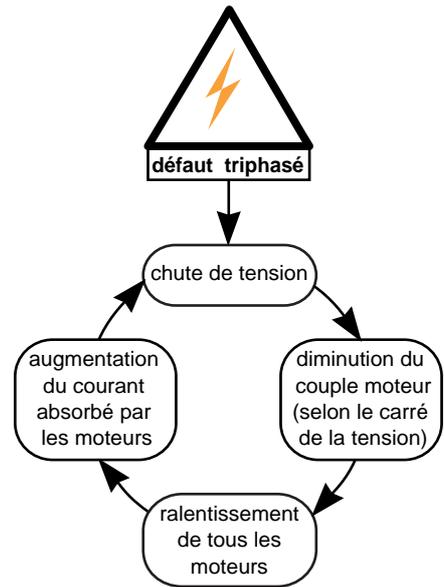
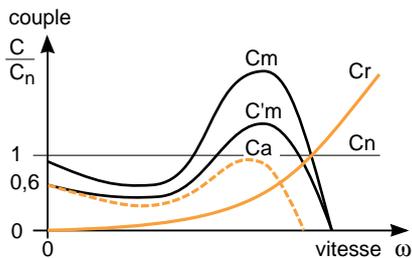


fig. 8 : comportement des moteurs asynchrones lors d'un défaut triphasé.



C'm = couple du moteur sous tension réelle d'alimentation (Ur),

Cr = couple résistant de la mécanique entraînée,

Cm = couple du moteur sous tension nominale (Un),

Ca = couple d'accélération.

fig. 6 : représentation des différents couples d'un moteur selon sa vitesse, avec une baisse de tension de l'ordre de 15 % (d'où C'm ≈ 0,7 Cm) et un couple résistant Cr ≈ 0 au démarrage.

A noter qu'une telle baisse de tension ne permettrait pas le lancement de ce moteur avec un Cr > 0,6.Cn au démarrage, car alors Cr > C'm.

besoins de l'application	caractéristiques de l'application	mode de démarrage	avantages inconvenients
process permanent ou quasi-permanent démarrage ≤ 1/jour	machines nécessitant un fort couplage de démarrage	direct	simplicité, investissement réduit. au démarrage : ■ couple important, ■ appel de courant important, ■ fortes contraintes mécaniques.
démarrages fréquents > 1/jour	moteurs à faible appel de courant ou de faible puissance	direct	
pompes, ventilateurs, compresseurs, démarrages fréquents	machines démarrant sous faible couple	statorique par réactance	réduction et de l'appel de courant au démarrage (ajustage possible).
optimisation des caractéristiques de démarrage	lorsque l'intensité au démarrage doit être réduite tout en conservant le couple nécessaire au démarrage	statorique par auto-transformateur	optimisation du couple (réduit) et de l'appel de courant au démarrage (ajustage possible).
optimisation des caractéristiques de démarrage à fort couple	démarrages les plus difficiles	rotorique	faible appel de courant et fort couple de démarrage.

fig. 7 : modes de démarrage les plus couramment usités.

- un réseau puissant (alternateurs correctement régulés et faible chute de tension) ;
- des systèmes de protection rapides qui diminuent la durée de ralentissement des moteurs (sélectivité logique par exemple) ;
- une structure du réseau adaptée avec :
 - une séparation et un regroupement sur des circuits distincts des récepteurs ordinaires et non essentiels d'une part, des récepteurs essentiels et à temps zéro d'autre part, qui facilitent le délestage,
 - des liaisons d'impédance minimale pour les récepteurs essentiels et à temps zéro pour limiter les chutes de tension.

La durée du retour à la vitesse normale des moteurs est fonction :

- de leur couple accélérateur, donc de la chute de tension,
- de l'inertie des masses tournantes.

Des logiciels de calcul permettent de simuler le comportement dynamique d'un réseau électrique et ainsi faciliter les choix. En particulier dans la détermination des procédures de séparation des sources (îlotages), des plans de délestage des charges non essentielles, des systèmes de protection à retenir (sélectivité logique pour obtenir des durées très courtes de déclenchement). L'ensemble de ces dispositions contribue au maintien de la stabilité dynamique du réseau lors d'une perturbation.

En résumé :

Si la perturbation est faible (court-circuit biphasé éloigné de l'utilisation), la stabilité est rétablie par l'action des régulateurs de vitesse et de tension. Lorsque le risque d'instabilité est important, il faut prévoir une protection qui, dans un délai très court (de 0,2 à 0,3 s), élimine le défaut et/ou un dispositif qui fractionne le réseau pour le soulager (délestage) afin de ne pas risquer l'arrêt total de l'installation (cf. fig. 9).

synthèse

Toute la réflexion décrite dans ce chapitre est résumée sous la forme d'un logigramme dans l'annexe 6.

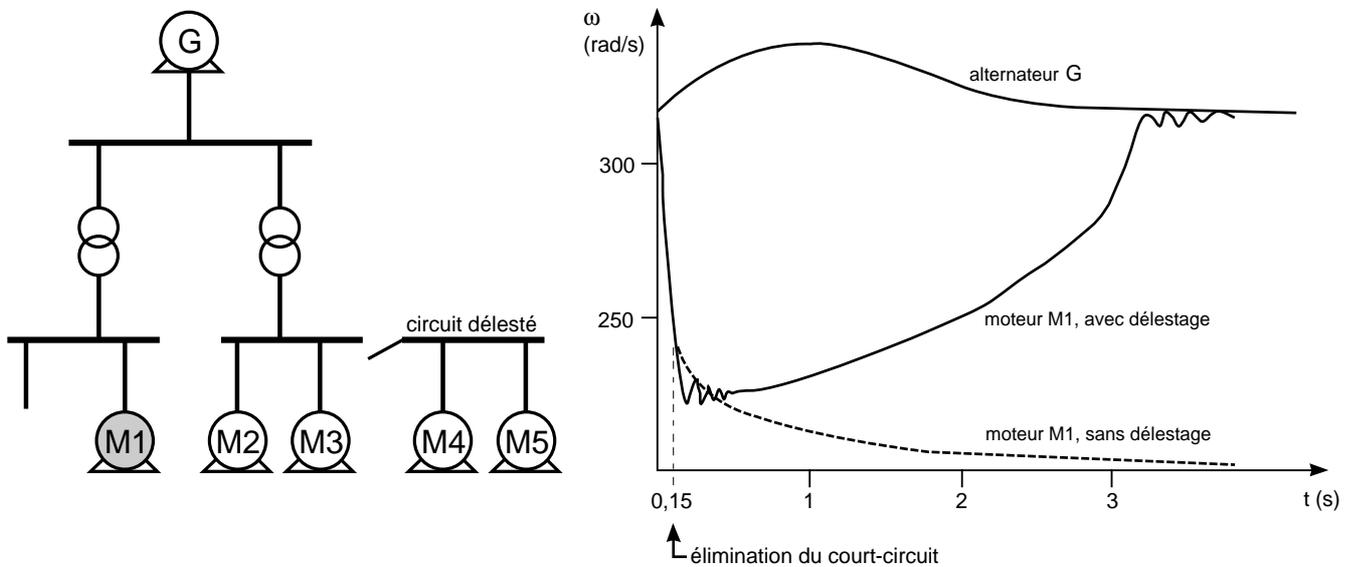


fig. 9 : présentation du comportement dynamique d'un réseau avec et sans délestage.

4. choix de la structure et exploitation optimale des réseaux

Différentes structures de réseau sont possibles, les plus courantes sont présentées dans ce chapitre avec leurs principaux domaines d'emploi. Le choix d'une structure de réseau, toujours déterminant sur le plan de la disponibilité de l'énergie est souvent difficile. Comparer rapidement, pour différentes structures, l'indisponibilité de la tension en un point particulier du réseau s'avère être la méthode la plus rationnelle, et l'emploi d'un système expert très intéressant (cf. annexe 2).

structures types des réseaux

Boucle ouverte ou fermée dite « en coupure d'artère »

(cf. fig. 10)

Préconisée pour les réseaux très étendus, avec des extensions futures importantes. Son exploitation en boucle ouverte est recommandée.

Radial doubles dite « en double dérivation » (manuelle ou automatique)

(cf. fig. 11)

Préconisée pour les réseaux très étendus avec des extensions futures limitées et nécessitant une bonne continuité d'alimentation.

Radial dite « en simple alimentation » ou « en antenne »

(cf. fig. 12 page ci-contre)

Préconisée lorsque les exigences de continuité d'alimentation sont faibles. Elle est très souvent retenue pour les réseaux des cimenteries.

Double alimentation

(cf. fig. 13 page ci-contre)

Préconisée lorsqu'une bonne continuité d'alimentation est demandée ou lorsque les équipes d'exploitation et de maintenance sont peu nombreuses. Elle est très souvent retenue dans les domaines de la sidérurgie et de la pétrochimie.

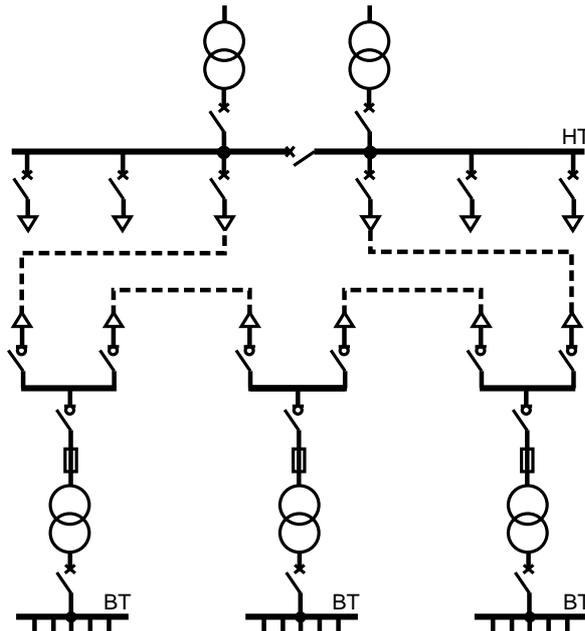


fig. 10 : schéma d'un réseau en boucle.

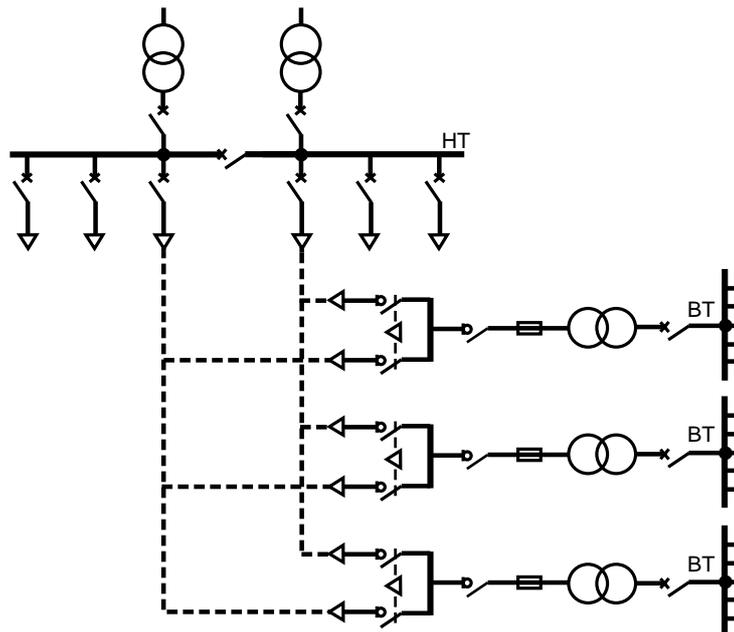


fig. 11 : schéma d'un réseau en double dérivation.

Double jeux de barres

(cf. fig. 14)

Préconisée lorsqu'une très grande continuité d'alimentation est demandée ou lorsqu'il y a de très fortes variations

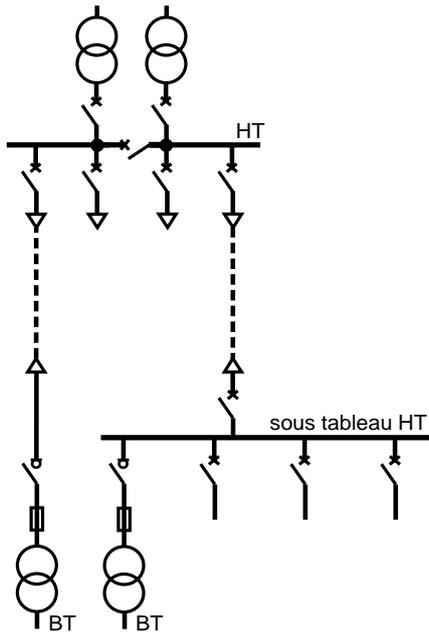


fig. 12 : schéma d'un réseau en simple alimentation.

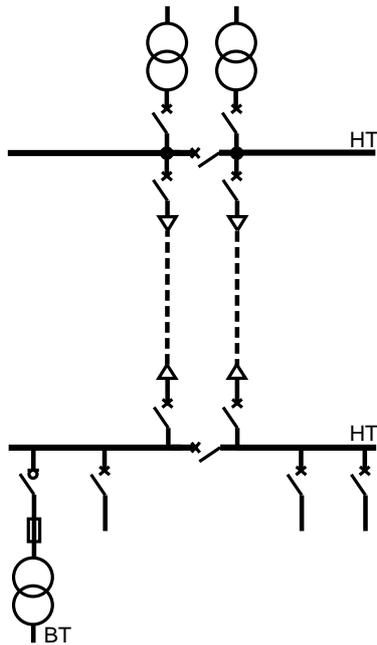


fig. 13 : schéma d'un réseau en double alimentation.

de charges : les charges pouvant être réparties sur l'un ou l'autre des jeux de barres, sans interruption d'alimentation.

Avec groupes de production d'énergie

(cf. fig. 15)

C'est la structure la plus simple mais très souvent rencontrée.

Avec source de remplacement et délestage

(cf. fig. 16)

C'est le cas typique d'un réseau industriel où une très grande continuité d'alimentation est demandée avec une seule alimentation du distributeur public.

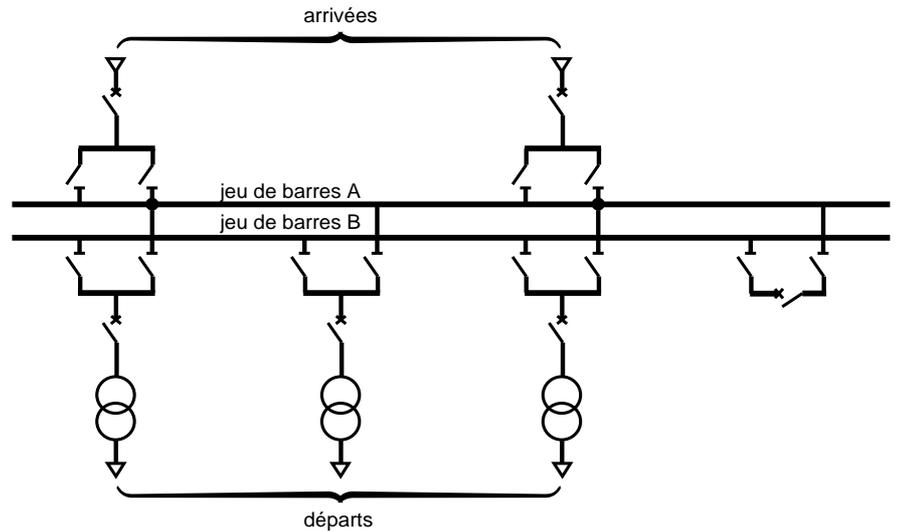


fig. 14 : schéma d'un réseau en double jeux de barres.

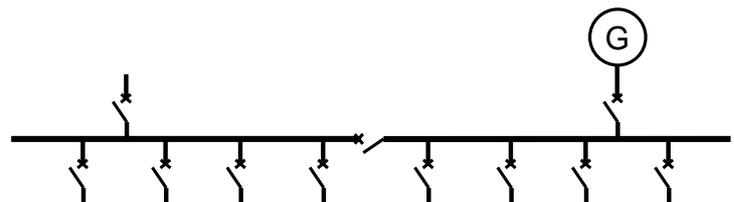


fig. 15 : schéma d'un réseau avec un groupe de production d'énergie.

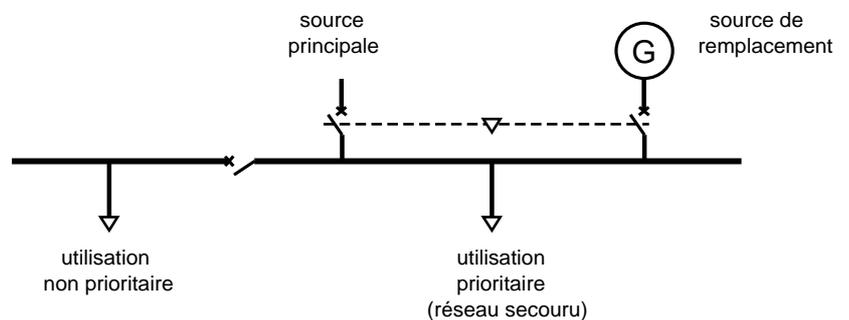


fig. 16 : schéma d'un réseau avec une source de remplacement et délestage.

exemple concret d'une structure

Le schéma de la figure 17 a été étudié et réalisé pour une mine polymétallique au Maroc. Il regroupe différentes structures de réseaux abordées précédemment ; ainsi, l'alimentation des différents ateliers est réalisée par une boucle, ou une double antenne, ou une source principale et une source de remplacement.

choix des équipements

Quelle que soit la structure choisie, les équipements prévus doivent satisfaire :

- aux normes en vigueur ;
- aux caractéristiques du réseau :
 - tensions, courants nominaux,
 - courant de court-circuit (pouvoir de fermeture, pouvoir de coupure, tenue électrodynamique et thermique) ;
- aux fonctions souhaitées (coupure sur défaut, coupure en service normal, commande fréquente, isolement des circuits,...) ;
- aux exigences de continuité d'alimentation (appareil fixe, déconnectable, débouchable) ;
- aux qualifications des agents d'exploitation et de maintenance (présence de verrouillages, d'asservissement électriques plus ou moins complets, technique de coupure avec ou sans entretien) ;
- aux exigences de la maintenance et des extensions éventuelles (réserve, modularité,...).

Nota : A ce stade de l'étude l'ensemble des caractéristiques du réseau sont le résultat de calculs souvent effectués à l'aide de logiciels de calcul scientifique.

exploitation optimale

Par exploitation optimale d'une distribution électrique, il faut comprendre la recherche :

- d'une meilleure continuité d'alimentation,
- d'un coût minimal de l'énergie consommée,
- d'une optimisation des moyens d'exploitation et de maintenance contribuant à la maîtrise de fonctionnement du réseau, ceci en régimes établi et transitoire, et en présence d'un défaut.

La solution est dans la mise en œuvre d'un système de Gestion Technique de

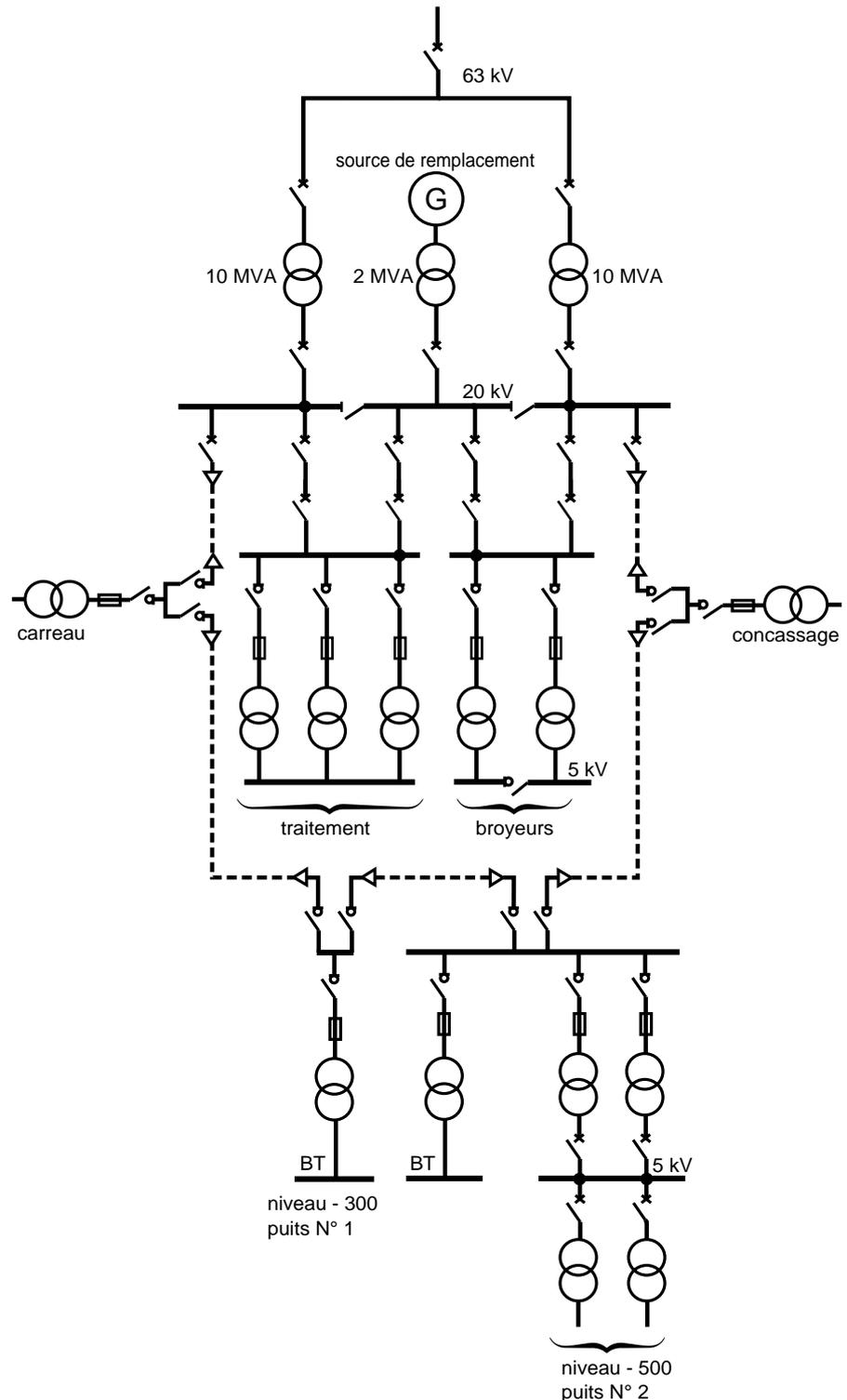


fig. 17 : structure du réseau électrique d'une mine marocaine (Merlin Gerin).

la distribution Electrique -GTE- pour l'ensemble du réseau.

Les systèmes de GTE actuellement proposés par les constructeurs, tel Merlin Gerin, exploitent toutes les performances des microprocesseurs. Ainsi ces composants, intégrés dans les centrales de gestion locale et centralisée comme dans les appareils de protection et de contrôle-commande installés sur les lieux mêmes de la consommation, sont à l'origine du concept de «l'intelligence décentralisée». L'expression «intelligence décentralisée» signifie que, à leur niveau, les centrales et les appareils remplissent leur mission de façon autonome (sans intervention humaine), et ne sollicitent le niveau «supérieur» qu'en cas d'anomalie. Par le superviseur, le gestionnaire ou

exploitant du réseau est toujours informé des changements.

Ces propos permettent de comprendre toute l'importance qu'il y a à bien définir l'architecture du réseau.

Description d'un système de GTE

(cf. fig. 18)

Un système de GTE est organisé selon quatre niveaux :

- niveau 0 : capteurs (de position, de grandeurs électriques, ...) et actionneurs (déclencheur, bobine,...) ;
- niveau 1 : unités de protection et de contrôle-commande, par exemple d'une cellule HT ;
- niveau 2 : conduite locale, par exemple poste HT/BT d'une usine ou tableau BT d'un atelier ;
- niveau 3 : téléconduite de l'ensemble du réseau privé.

Tous ces matériels et particulièrement ceux des niveaux 1 à 3 sont reliés par des bus (réseaux par lesquels transitent les informations).

Les missions des systèmes de GTE

■ gérer l'approvisionnement et la consommation de l'énergie en fonction :

- de la puissance souscrite,
- de la tarification du distributeur,
- des disponibilités de la centrale de production privée,
- des impératifs des processus industriels.

■ maintenir la continuité d'alimentation en réalisant :

- la protection rapide et sélective (système de sélectivité logique par exemple),
- la permutation automatique d'alimentation,

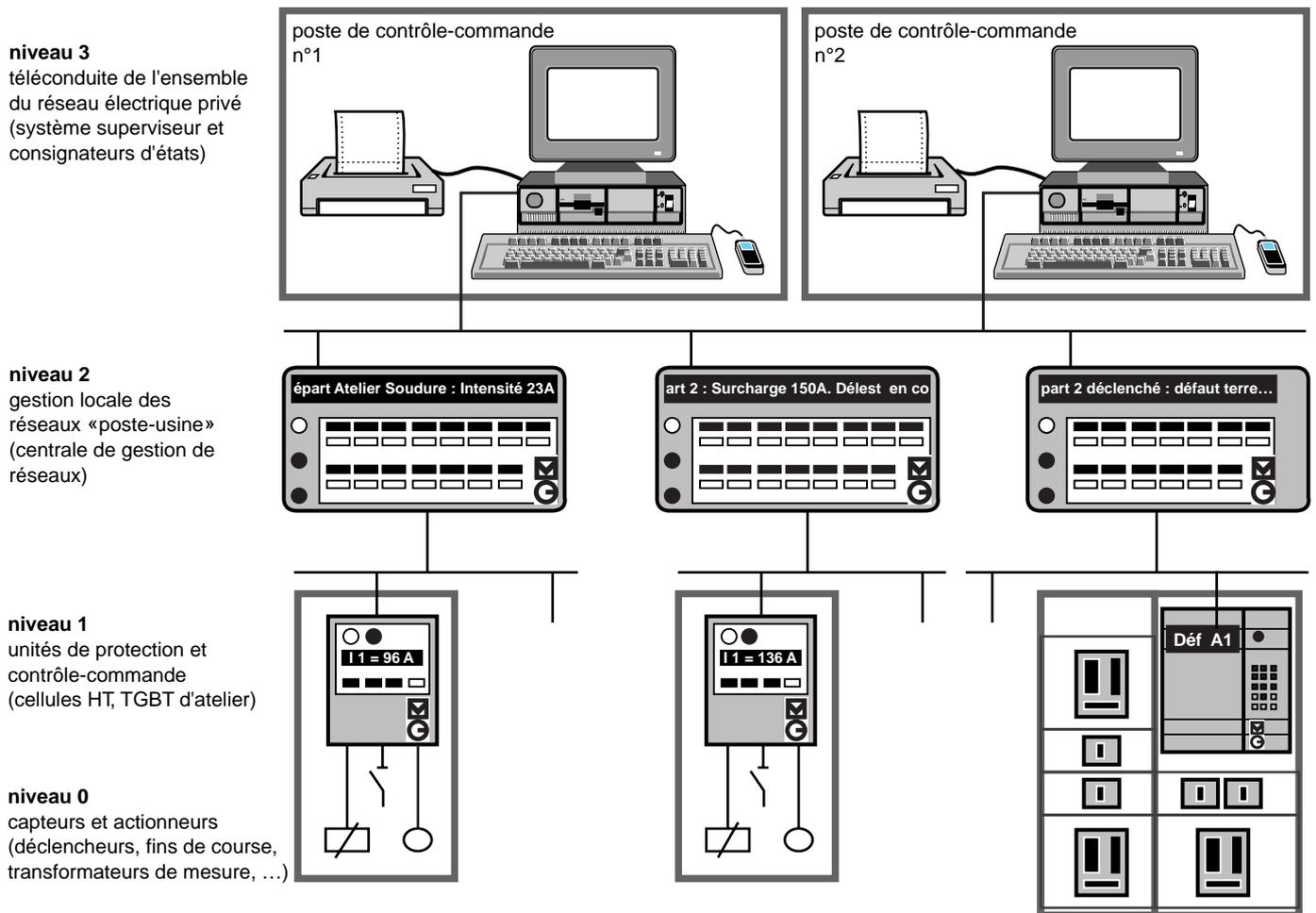


fig. 18 : exemple d'architecture d'un système de Gestion Technique de la distribution Electrique.

- un délestage/relestage performant et paramétrable depuis l'interface homme/machine avec la définition des critères de délestage (plan de délestage/relestage),
- le redémarrage séquentiel des ateliers,
- la fonction réglage de la tension, du $\cos \varphi$, etc....
- la sauvegarde des récepteurs essentiels lors d'une rupture d'alimentation du distributeur ou des alternateurs locaux de production.
- permettre un dialogue homme - machine :
 - visualisation des différents états du réseau et de ses équipements par des synoptiques animés en temps réel (unifilaires, schémas de détails, courbes, etc....),
 - télécommande des appareils de manoeuvre,
 - consignation des états et des mesures,
 - enregistrement chronologique des défauts et alarmes (10 ms),
 - archivage des événements,

- comptage, statistiques,
 - historique.
- Toutes ces informations permettent notamment d'organiser la maintenance préventive.
- élaborer des procédures «Guide Opérateur», qui, par exemple :
 - interdisent certains démarrages de moteurs en fonction de la puissance disponible de la centrale de production, de l'heure, ou du degré de priorité des moteurs,
 - interdisent certains modes d'alimentation des tableaux Haute Tension (bouclage de sources),
 - proposent le schéma de secours le mieux adapté face à un défaut grave d'un départ principal ou d'un générateur,
 - proposent des messages d'exploitation et des opérations de maintenance (électriques, mécaniques, etc.).

Avantages d'un système de GTE

L'évolution des systèmes de protection et de contrôle-commande numériques du niveau 1 d'une part, et

l'augmentation rapide du rapport performances/coût des matériels et logiciels du niveau 2 d'autre part, permettent aux industriels de bénéficier d'avantages techniques et économiques, en particulier :

- une sûreté de fonctionnement maîtrisée,
 - une plus large gamme de fonctions accessibles, notamment des fonctions de consignation d'état, de maintenance préventive et de conduite,
 - une mise en œuvre facilitée et une exploitation plus efficace.
- La richesse des fonctions offertes par ces systèmes, les possibilités nouvelles d'auto-contrôle voire d'auto-diagnostic et de surveillance ainsi que la convivialité des interfaces de dialogue avec l'opérateur, rendent naturellement plus efficace et plus intéressant le rôle de l'exploitant. Ainsi, il est capable de mieux apprécier le fonctionnement de son réseau et d'optimiser, outre la conduite, la maintenance et le renouvellement de ses équipements électriques.

5. conclusion

Une conception de réseau électrique bien maîtrisée permet d'assurer, au moindre coût et dans les meilleures conditions d'exploitation, un fonctionnement optimal en régime permanent et en régime perturbé du réseau.

Le meilleur coût n'est pas nécessairement celui qui correspond à un investissement initial minimal, mais plutôt de concevoir le réseau électrique

qui s'avère le plus économique compte tenu de l'investissement initial, des coûts d'exploitation et des pertes de production.

Les meilleures conditions d'exploitation permettent d'obtenir une continuité d'alimentation des récepteurs compatibles avec les exigences des installations, ceci pour obtenir une productivité et une sécurité maximale des personnes et des biens.

Les nouvelles générations d'appareils et d'équipements électriques sont conçues pour dialoguer, au travers de bus de communication numériques, avec un ou plusieurs postes de conduite. Et c'est l'ensemble de deux réseaux, réseau d'énergie et réseau d'informations, d'un coût d'investissement acceptable, qui permet la satisfaction optimale des besoins des utilisateurs.

annexe 1 : extension d'un réseau industriel existant

L'extension d'un réseau industriel existant avec l'ajout d'un transformateur devant pouvoir être raccordé en parallèle sur le transformateur existant présente l'inconvénient d'accroître l'intensité des courants de court-circuit, et ainsi de devoir augmenter :

- les pouvoirs de coupure et de fermeture des appareils en place,
- la tenue aux efforts électrodynamiques de l'ancienne installation.

La mise en place d'une réactance triphasée entre l'ancienne et la nouvelle installation supprime ces difficultés (cf. fig. 19).

hypothèses

- l'intensité du courant de court-circuit de l'installation existante : 17 kA (I_{cc1}),
- l'intensité du courant de court-circuit sur le jeu de barres existant doit être limité à 21 kA (I_{cc2}),
- $X_{Tr} = 0,63 \Omega$.

calcul approché de la réactance de limitation

(les résistances sont négligées)

Le courant traversant la réactance doit être égal en première approximation (I_{cc1} et I_{cc2} en phase) à :

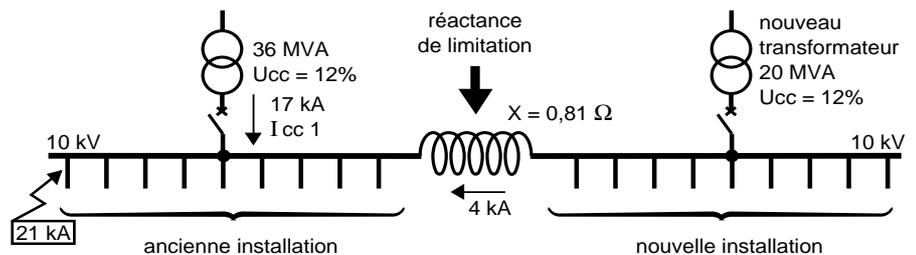


fig. 19 : extension d'un réseau industriel existant avec ajout d'un transformateur complémentaire.

$$21 - 17 = 4 \text{ kA} = I_{ccL}$$

I_{ccL} = Intensité limitée par la réactance

$$= \frac{V}{X}$$

X = valeur de la réactance totale (transformateur 20 MVA et réactance de limitation)

$$X = \frac{V}{I_{ccL}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 4000} = 1,44 \Omega$$

$$X = X_{réact} + X_{Tr}$$

$$X_{Tr} = 0,63$$

$$X_{réact} = 1,44 - 0,63$$

$$X_{réact} = 0,81 \Omega$$

annexe 2 : moyens informatiques utilisés pour les études de réseaux

Voici une liste des principaux logiciels utilisés dans les différents services de la société Merlin Gerin chargés d'étudier et/ou de concevoir des réseaux électriques.

logiciels de calculs

- répartitions des puissances,
- intensité des courants de court-circuit,
- chutes de tension,
- stabilité dynamique d'un réseau,
- courants et tensions harmoniques,

- surtensions de foudre et de manœuvre,
- enclenchement de transformateur et de condensateur,
- indisponibilité d'une alimentation électrique.

système expert d'évaluation de la qualité de conception d'un réseau électrique

Un système expert dénommé ADELIA a été développé et est exploité par

Merlin Gerin. Il permet de comparer rapidement pour différents schémas, l'indisponibilité de la tension en un point particulier du réseau.

Il présente l'avantage de requérir moins de calculs que la méthode des graphes de Markov, et d'autre part de fournir à la fois des renseignements qualitatifs (graphe des combinaisons d'évènements conduisant à la défaillance du système), et des résultats quantitatifs (calculs de l'indisponibilité du réseau).

annexe 3 : principe général de la compensation

Le principe de compensation avec des condensateurs peut être représenté par les deux figures ci-après.

■ la figure 20 présente la composition vectorielle des différents courants et pour un courant actif donné, la réduction du courant total dans les conducteurs.

I_a = courant actif consommé

I_{t1} = courant total avant compensation

I_{r1} = courant réactif fourni au travers du transformateur avant compensation

I_{t2} = courant total après compensation

I_{rc} = courant réactif fourni par le condensateur

I_{r2} = courant réactif fourni par le transformateur après compensation

($I_{r2} = I_{r1} - I_{rc}$)

■ la figure 21 illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur.

Le courant total fourni par le réseau I_{t2} est réduit, le rendement de l'installation se trouve

donc amélioré puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant.

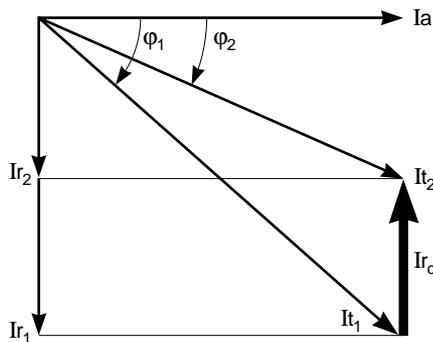


fig. 20 : composition vectorielle des différents courants, et l'effet de la compensation.

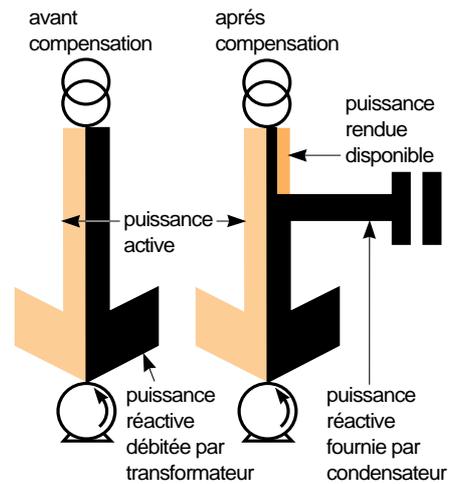


fig. 21 : diagramme traduisant l'échange d'énergie dans le circuit d'alimentation d'un récepteur et montrant l'intérêt de la compensation.

annexe 4 : choix du schéma des liaisons à la terre pour un réseau industriel HT

Le choix d'un schéma des liaisons à la terre (régime de neutre) pour un réseau industriel en Haute Tension fait intervenir les critères suivants :

- la politique générale,
- la législation en vigueur,
- les contraintes liées au réseau,
- les contraintes liées à l'exploitation du réseau,

- les contraintes liées à la nature des récepteurs,
- etc...

Cinq schémas peuvent être envisagés :

- neutre « direct » à la terre,
- neutre mis à la terre par une réactance,
- neutre mis à la terre par une réactance accordée,

- neutre mis à la terre par une résistance,
- neutre isolé.

Chacun d'eux présentent des avantages et des inconvénients qu'il convient de bien connaître avant d'arrêter son choix, ils sont regroupés dans le tableau suivant (cf. fig. 22).

schéma de liaison du neutre	avantages	inconvénients	en pratique
direct à la terre	<ul style="list-style-type: none"> ■ facilite la détection des défauts à la terre et la sélectivité des protections, ■ limite les surtensions 	provoque des courants élevés de défaut à la terre (dangereux pour le personnel avec risques de dégats matériels importants)	pas utilisé
mis à la terre par une réactance	limite les courants des défauts à la terre	<ul style="list-style-type: none"> ■ nécessite des protections plus complexes que la liaison directe à la terre, ■ peut provoquer des surtensions sévères selon les configurations de l'installation 	applicable sans précaution particulière que si l'impédance de limitation est faible par rapport à la résistance homopolaire du circuit
mis à la terre par une réactance accordée (bobine de Petersen)	favorise l'auto-extinction du courant des défauts à la terre	nécessite des protections complexes (dispositifs directionnels difficiles à mettre en œuvre)	<ul style="list-style-type: none"> ■ parfois employé dans les pays de l'Est ■ pas utilisé en France
mis à la terre par une résistance	<ul style="list-style-type: none"> ■ limite les courants des défauts à la terre, ■ facilite leur détection et la sélectivité des protections, ■ limite les surtensions 		le plus intéressant pour une distribution industrielle : il réunit tous les avantages
isolé de la terre	limite les courants des défauts à la terre	<ul style="list-style-type: none"> ■ risques de surtensions ■ nécessite l'emploi de matériel sur-isolés (tension composée entre phase et terre lors d'un défaut franc à la terre), ■ protections souhaitables contre ces surtensions, ■ surveillance de l'isolement obligatoire (législation française), ■ sélectivité complexe entre les protections de défaut à la terre 	le non déclenchement au premier défaut à la terre nécessite : <ul style="list-style-type: none"> ■ l'obtention d'une dérogation (législation française) ■ que la capacité entre les conducteurs actifs du réseau et la terre n'entraîne pas un courant de défaut à la terre dangereux pour le personnel et les machines.

fig. 22 : avantages et inconvénients des différents schémas de liaison à la terre possibles pour un réseau industriel HT.

annexe 5 : chute de tension dans un réseau (expression mathématique et diagramme vectoriel)

La chute de tension dans un réseau peut se calculer par l'expression :
 $\Delta V = R.I.\cos \varphi + X.I.\sin \varphi$
 Le schéma électrique et le diagramme vectoriel correspondant à cette équation sont donnés par la figure 23.

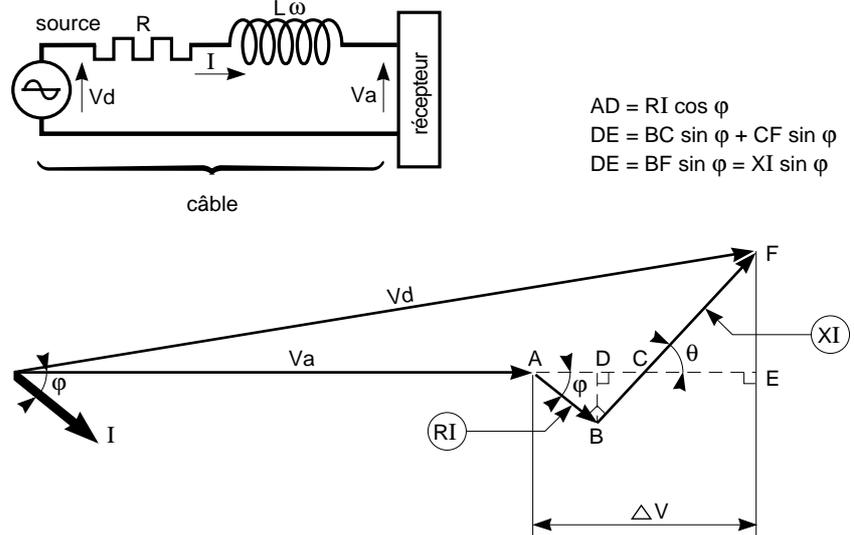


fig. 23 : diagramme vectoriel de la chute de tension dans un réseau.

annexe 6 : les étapes de conception d'un réseau industriel

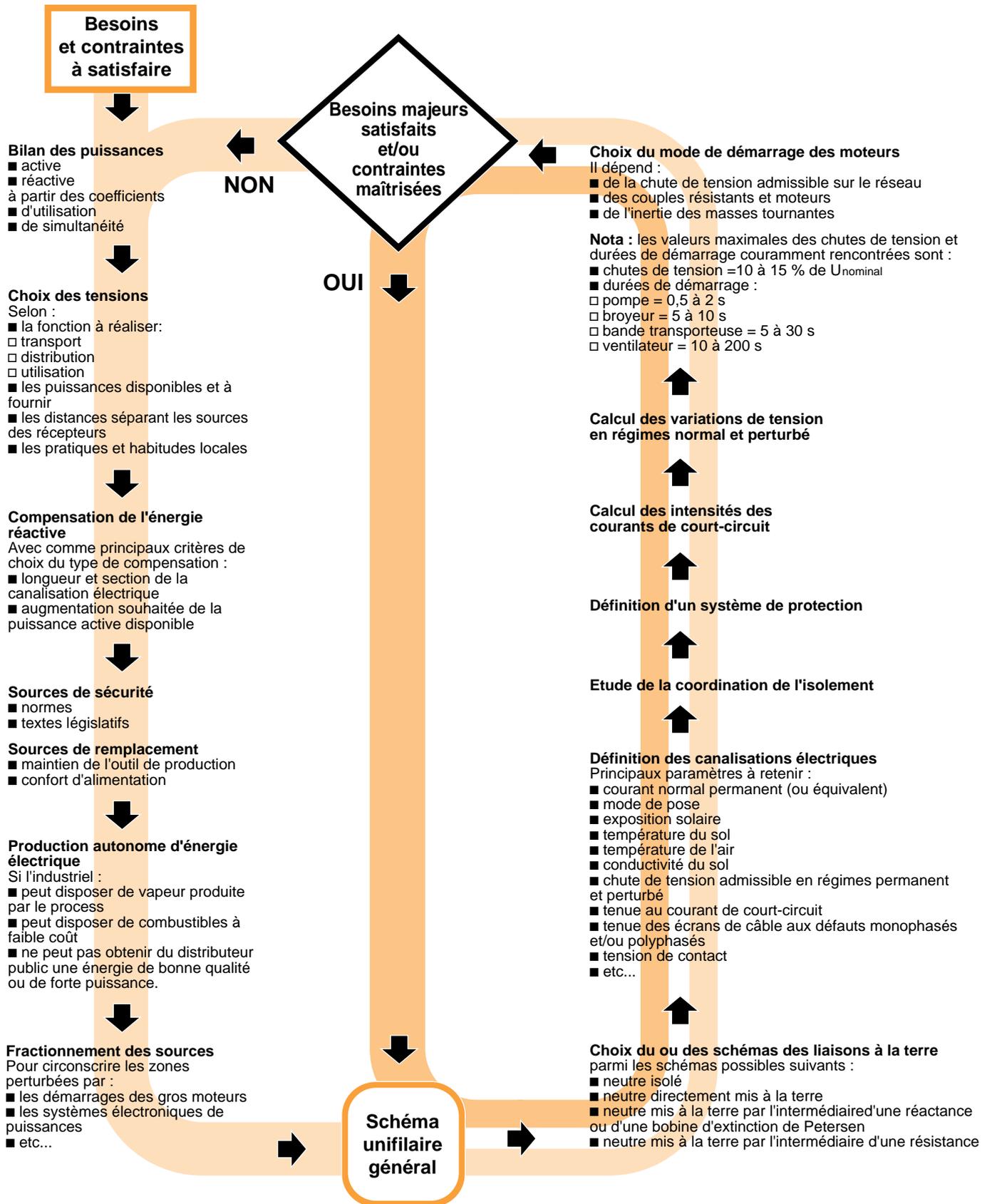
Ce logigramme comporte deux boucles :

- la première, d'analyse et de choix, part des « Besoins et contraintes à satisfaire » et conduit à l'organisation

d'une structure de réseau dans un « Schéma unifilaire général »,

- la seconde vise l'optimisation de cette structure.

- boucle d'analyse et de choix conduisant à l'organisation d'une structure
- boucle d'optimisation de cette structure



annexe 7 : bibliographie

Cahiers Techniques Merlin Gerin

■ Protection des réseaux par le système de sélectivité logique, Cahier Technique n° 2
F. SAUTRIAU

■ Mise à la terre du neutre dans un réseaux industriel haute tension, Cahier Technique n° 62
F. SAUTRIAU

■ Gestion de l'énergie dans les processus industriels, Cahier Technique n° 133
C.G. POUZOLS

■ Surtensions et coordination de l'isolement, Cahier Technique n° 151
D. FULCHIRON

■ Calcul des courants de court-circuit, Cahier Technique n° 158
R. CALVAS, B. DE METZ NOBLAT, A. DUCLUZAUX, et G. THOMASSET

■ La foudre et les installations électriques HT, Cahier Technique n° 168
B. DE METZ NOBLAT

Publications diverses

■ Les surtensions lors de l'élimination de courts-circuits sur les réseaux dont le neutre est mis à la terre par une réactance.

Bulletin de la Société Française des Electriciens, 8e série, Tome 1, n°4 (avril 1960)
LE VERRE