

STS Electrotechnique

Sciences et Techniques Industrielles

2020/2021

Lycée du Dauphiné
Bd Remy Roure BP 1113
Romans sur Isère Cedex 13

D. COURT
didier.court@ac-grenoble.fr
<http://courtd2.free.fr/>

Complément Moodle : <https://moodle.ac-grenoble.fr/>

Présentation ...

Ce document rassemble l'essentiel des cours distribués et abordés en première année de BTS Electrotechnique dans le cadre de Sciences et Techniques Industrielles en lien avec le référentiel 2020.

Certains de ces cours ont été adaptés de documents rédigés par M. Catallon.

Il est organisé en chapitres regroupés en 3 parties :

Distribution ;	(chap. 11 à 19)
Automatismes ;	(chap. 21 à 29)
Fonction d'usage ;	(chap. 31 à 36)

Distribution		Automatismes		Fonction d'usage	
11	<i>Fourniture</i>	21	<i>Système auto</i>	31	<i>Commande fonctionnelle</i>
12	<i>Distribution HTA</i>	22	<i>Logique</i>	32	<i>Conversion</i>
13	<i>Distribution BT</i>	23	<i>Information num.</i>	33	<i>Variation</i>
14	<i>Tarifcation.</i>	24	<i>Acquisition</i>	34	<i>Qualité du courant</i>
15	<i>Qualités</i>	25	<i>Détection</i>	35	<i>Sécurité</i>
16	<i>Protection Ik</i>	26	<i>Capteur num.</i>	36	<i>Schématisation</i>
17	<i>Protection Foudre</i>	27	<i>Grafcet</i>		
18	<i>Protection personnes</i>	28	<i>GDMMA</i>		
19	<i>Risque électrique</i>	29	<i>Algorithmique</i>		

La partie « professionnelle » fait l'objet d'un second fascicule utilisé lors de la formation de deuxième année axée autour de l'organisation de chantier et du projet de fin d'année.

Ces cours sont complétés par des cours d'archive disponibles sur le site [OSO](http://OSO.courtd2.free.fr) à l'adresse suivante : [courtd2.free.fr](http://OSO.courtd2.free.fr). Ces cours d'archive ne sont plus directement au programme actuellement mais peuvent présenter un intérêt pour les plus curieux ...

La compréhension des cours se fait au travers d'applications à faire en classe ou en dehors et à rédiger dans le cahier d'application. Il est possible de trouver des éléments de correction sur le site précédent dans la rubrique « applications » afin de ne pas rédiger des études fausses ...

Ce document s'accompagne d'activités accessibles sur l'espace d'e-formation de l'académie de Grenoble pour les étudiants du lycée ou en accès anonyme¹.

La mise en œuvre des cours est enfin illustrée dans les séances de travaux pratiques indispensables !!

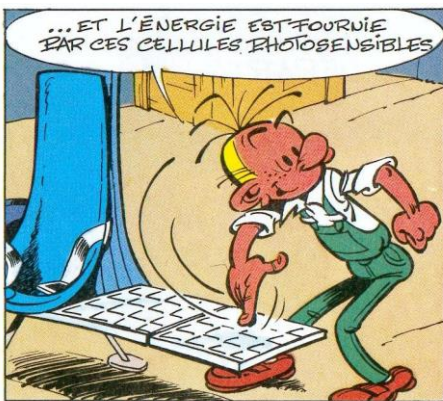
Bonne lecture et bonne formation à tous,

M. COURT D.

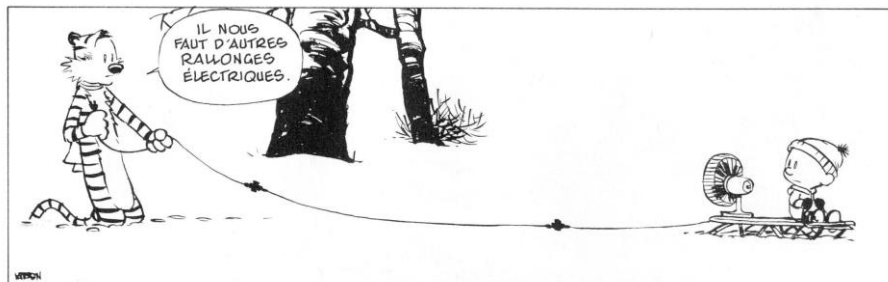
¹ Avec un mot de passe ...

Chapitre 11

Fourniture de l'Énergie



(Notes)



(Notes)

1 Introduction.

1.1 Remarques.

Les principales grandeurs utilisées dans ce document sont l'énergie et la puissance ...
 L'énergie correspond à une consommation pendant un certain temps¹ => kWh et multiples ...
 La puissance correspond à une capacité ou à un besoin à un moment donné => kW et multiples ...

Pour info, les principales unités² utilisées sont :

le kWh, le MWh = 1 000 kWh, le GWh = 1 000 000 kWh, (=10⁶ kWh)
 ou le TWh = 1 000 000 000 kWh ... (=10⁹ kWh)

1.2 Présentation des problèmes.

1.2.1 Effet de serre.



Animation swf sur le site OSO

La plus grande partie de l'énergie envoyée par le soleil traverse l'atmosphère et réchauffe la surface de la terre.

Celle-ci en réfléchit une partie sous forme d'infrarouges vers l'espace.

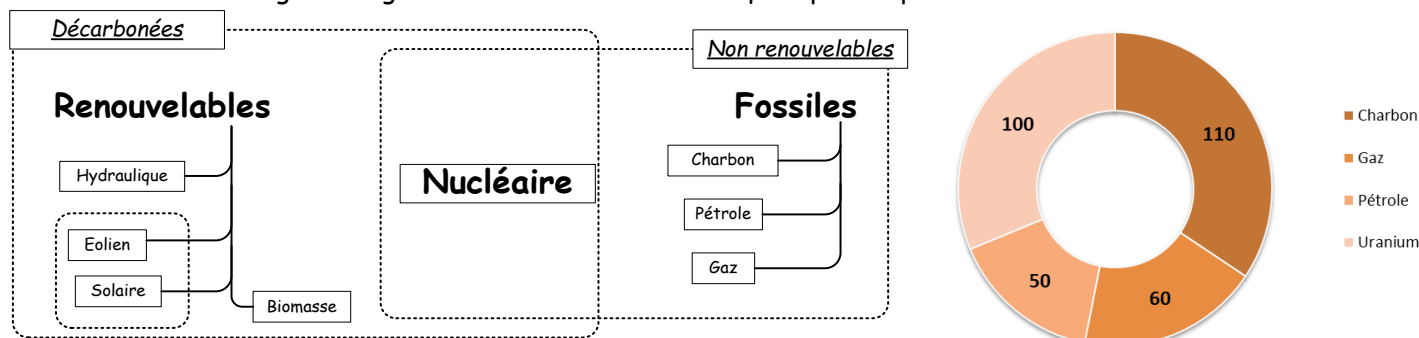
Cette énergie est alors piégée par les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère (H₂O, CO₂, CH₄ etc ...).

Ces gaz permettent de conserver une partie de la chaleur. Sans eux, la température moyenne de la terre serait de -18°C au lieu de 15°C.

Mais si la concentration des gaz à effet de serre est trop modifiée, ce fonctionnement est perturbé. En cas d'élévation, trop de chaleur reste sur terre et la température de la terre augmente ...

1.2.2 Renouvelabilité.

Les sources d'énergie sont grosso modo au nombre de 7 qu'on peut répartir comme suit :



Les ressources non renouvelables représentées selon EDF (avec une estimation de leur durée de vie ...) montrent que nous n'avons plus beaucoup de réserves ... Uranium compris ...

Il faut cependant noter que :

- 1) gaz et pétrole vont disparaître dans un avenir proche ...
- 2) charbon un peu moins mais son exploitation est très polluante et favorise l'effet de serre ...
- 3) pour le pétrole les facteurs économiques rendent son estimation plus fluctuante.

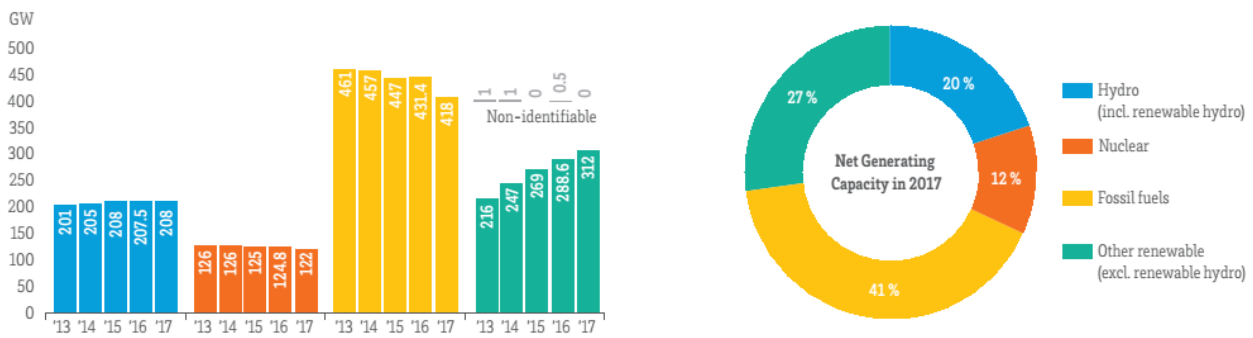
¹ Par exemple, un projecteur halogène de puissance 1000 W fonctionnant pendant 5 heures absorbe 5000 Wh.

² On trouve aussi les unités suivantes : la Tep (tonne équivalent pétrole) 1 Tep = 11628 kWh
 ou le BTU (British Thermal Unit) 1 BTU = 0,3 Wh.

1.3 Contexte européen.

1.3.1 Répartition par source (en puissance de production).

Figure 4: ENTSO-E net generating capacity from 2013 to 2017



1.3.2 Répartition par pays (en puissance de production).

NET GENERATING CAPACITY ON DECEMBER 31st (IN MW)

Year: 2015

(Database: 07.07.2016)

This data may not be used without mentioning the source: 'Data provided by ENTSO-E'

country	hydro	nuclear	renewable	of which wind	of which solar	of which biomass	fossil_fuels	others
DE	9610	10793	89314	43429	38411	6915	78746	0
DK	7	0	6373	5082	781	510	7540	2
ES	20336	7573	30716	23003	6967	747	46974	588
FR	25421	63130	18206	10312	6191	1703	22553	0
GB	3866	8981	9880	8503	0	1377	47914	0
IT	22150	0	32330	8750	19100	3700	69700	0
NL	38	486	5468	3641	1429	398	25572	674
PT	6146	0	5868	4826	429	613	6519	0
Total	188362	121218	247225	134565	84730	25068	434247	3259

<https://www.entsoe.eu/db-query/miscellaneous/net-generating-capacity>

Plusieurs points sont remarquables :

L'importance du thermique conventionnel essentiellement en raison des parts de l'Allemagne et de l'Italie.

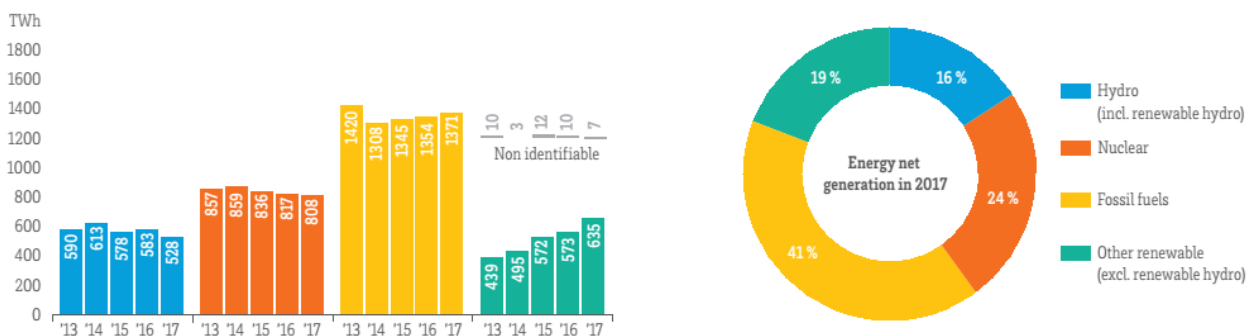
L'importance du nucléaire en France (plus de 50 % de l'Union).

L'utilisation géographique de l'hydraulique en montagne (France, Italie, Espagne).

L'importance du renouvelable (Vent/Soleil) au Danemark.

1.3.3 Energies.

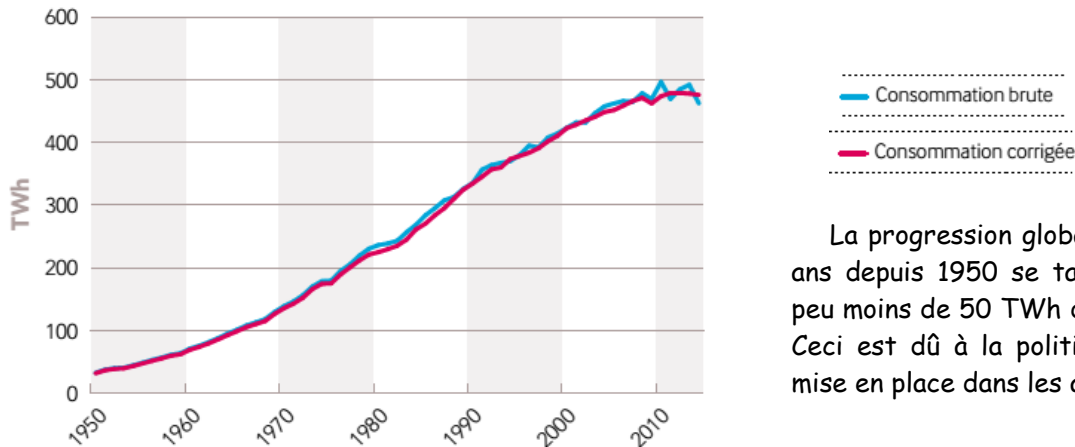
Figure 5: ENTSO-E net generation from 2013 to 2017



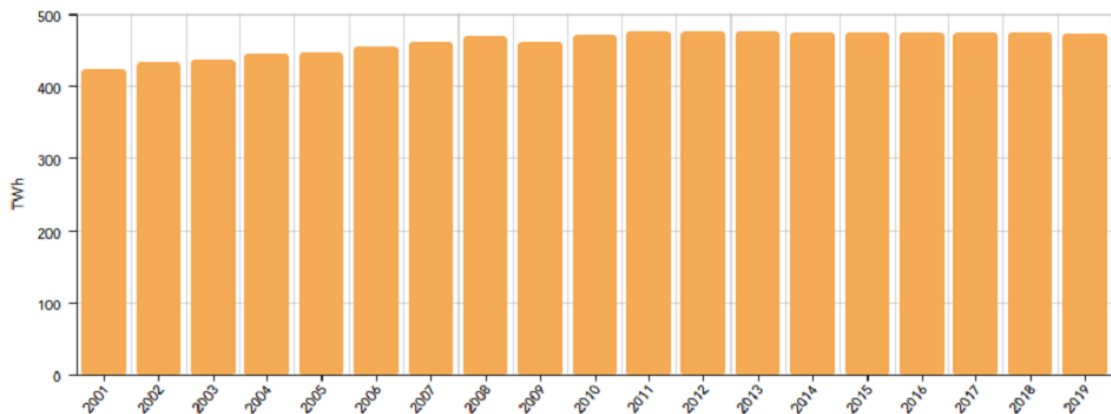
1.4 Contexte français.

Les documents proposés viennent du site du gestionnaire du réseau de transport français : RTE.

1.4.1 Consommation d'énergie électrique (2014).

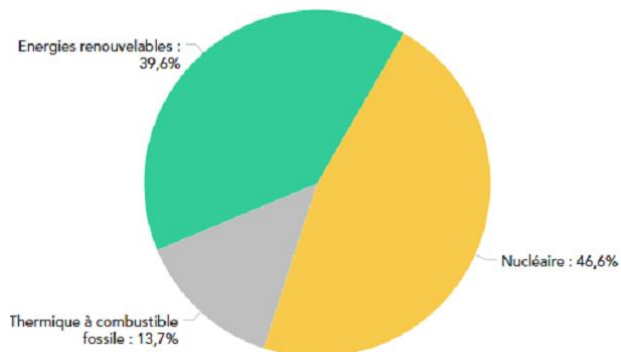


La progression globalement constante sur 60 ans depuis 1950 se tasse depuis 2010 avec un peu moins de 50 TWh de consommation annuelle. Ceci est dû à la politique d'économie d'énergie mise en place dans les années 2000.



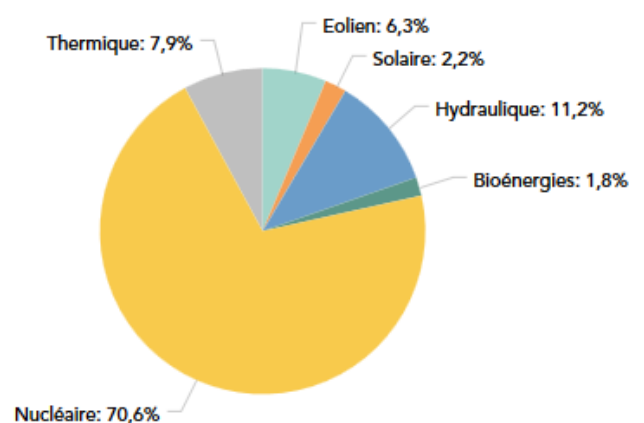
1.4.2 Répartition par « sources » (2019).

Puissance installée en 2019



135 GW

Consommation en 2019



473 TWh

Plusieurs points sont à remarquer :

L'équilibre apparent entre renouvelable et nucléaire en terme de puissance installée ...

La sur utilisation des centrales nucléaires qui produisent 3 fois plus que le renouvelable ...

2 Architectures.

2.1 Réseau de transport classique.

2.1.1 Principe du transport.

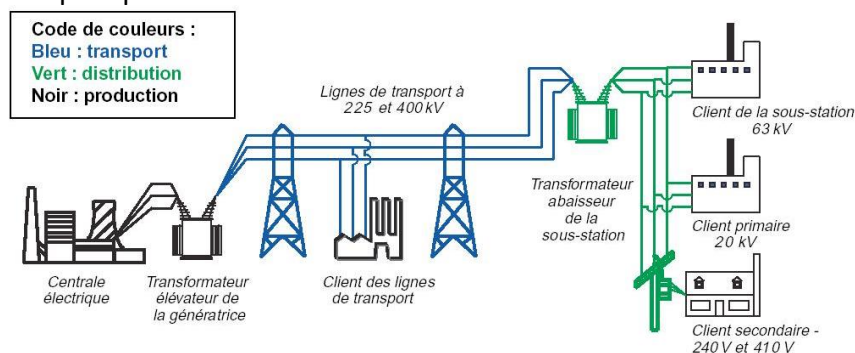
Une étude sommaire montre que les pertes par effet joule dans un conducteur augmentent en fonction du carré de l'intensité du courant y circulant (pour information, ces pertes représentent 2,5 % de l'énergie totale transportée en France soit 15 TWh ...). A énergie transportée constante, si on augmente la tension, on diminue ces pertes ($p=k/U^2$). En revanche cette augmentation de la tension est limitée par les difficultés d'isolement qui surviennent.

Il faut de plus noter que les niveaux des puissances en jeu entraîneraient des sections démesurées si le transport s'effectuait en basse tension !!

Le transport se fait donc en HTB (>50 kV en alternatif) voir ci-dessous la répartition de 2011.

Par construction, la production s'effectue en basse tension (problème d'isolement des conducteurs des machines tournantes). L'utilisation, distribution comprise, s'effectue en basse tension (pour la même raison appliquée aux récepteurs). Entre les deux se situe l'étage du **transport de l'énergie électrique**.

Le changement de niveau de tension n'étant pas facilement réalisable en continu, la tension utilisée est donc le plus souvent alternative, de fréquence 50 Hz en France et dans la majorité de l'Europe³. L'élément clef du transport est donc le transformateur qui permet d'élever la tension d'un coté (accès au réseau de transport) et de la diminuer de l'autre pour parvenir aux utilisateurs terminaux.



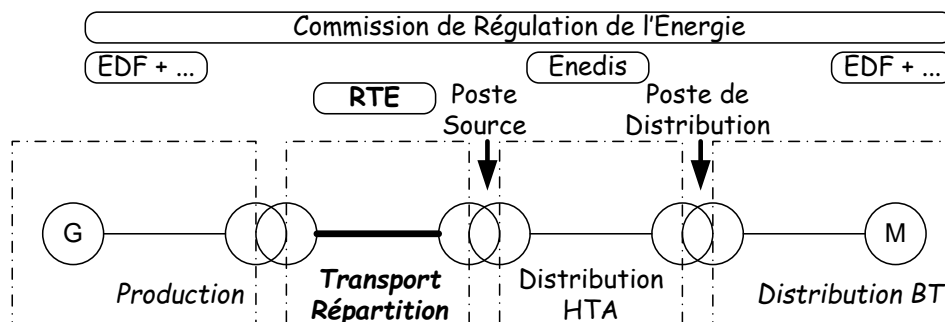
2.1.2 Acteurs français.

Après avoir étudié les principes de bases de la production d'énergie électrique, on va passer à son acheminement jusqu'au consommateur final.

On distingue deux types de réseau : le réseau de transport et le réseau de distribution, l'objet de ce document est une première approche de l'organisation du **réseau de transport**.

Le réseau de transport assure plusieurs fonctions :

- il **rassemble** toutes les énergies électriques produites sur le territoire,
- il **répartit** ces énergies en fonction des besoins des régions
- il assure la **sécurité** de l'ensemble et assure l'**interconnexion** avec les **pays voisins** !!



L'organisation du transport de l'énergie électrique est confiée en Europe à des GRT (**Gestionnaires de Réseaux de Transport**) ou TSO (**Transmission System Operators**). En France, depuis le 1^{er} septembre 2005

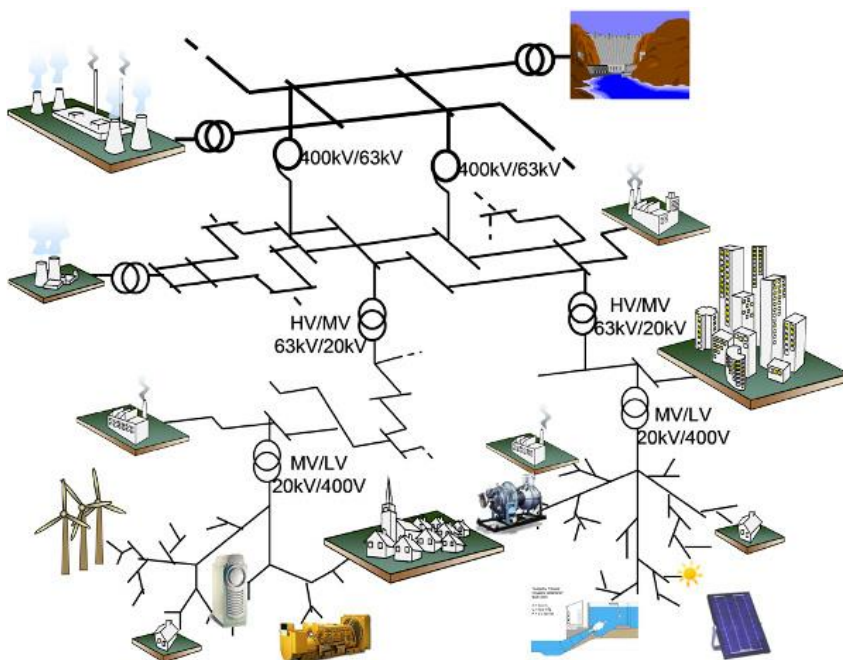
³ 60 Hz aux US, 50 et 60 au Japon !

RTE est le gestionnaire qui a pour mission d'**exploiter**, d'**entretenir** et de **développer** le réseau français de transport d'électricité.

2.1.3 Structure.

En fait, à grande échelle, le réseau est maillé (structure en boucle) et stratifié. C'est-à-dire qu'il est composé de couches de tension différentes

<http://encyclopedie-energie.org/>



2.1.4 Conducteurs ...

Contrairement à ce qui est vu en basse tension, la section d'un conducteur n'est pas directement liée au courant y circulant ... D'autres paramètres entrent en jeu comme : le poids, la géométrie, la dilatation, les conditions climatiques etc ...

Les matériaux constituant l'âme des conducteurs sont le cuivre ou des alliages d'aluminium. Ils ont une section utile (celle où circule réellement le courant électrique⁴) limitée à environ 450 mm². Les sections valent de 500, 950 ou 1600 mm² rarement plus et l'adaptation au courant se fait en multipliant le nombre de conducteurs par phase.

Liaisons aériennes/souterraines/Avenir/Continues ?? Voir cours d'archive sur courtd2.free.fr

2.2 Interconnexion européenne.

2.2.1 Présentation.

L'ENTSOE (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*), est une association européenne qui organise les réseaux de transport de l'énergie électrique entre 34 pays voir ci-dessous. Elle fait un bilan deux fois par an des mouvements des énergies électriques entre les partenaires.

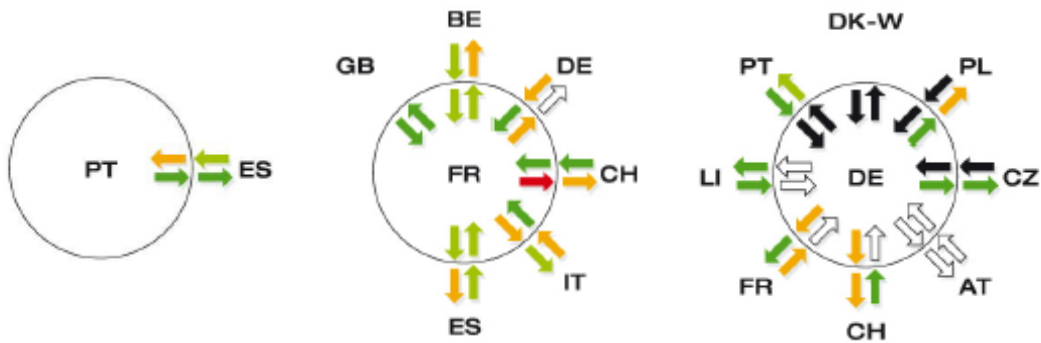
2.2.2 Structure.

La plupart des pays européens ont un seul gestionnaire mais quelques pays en ont plusieurs (l'Allemagne en a six, la Suisse, cinq, le Danemark en a deux ainsi que l'Autriche).

Certains pays sont isolés dans leurs connexions au reste de l'union (Portugal, Espagne ou les Pays-bas ...), alors que d'autres ont une position plus centrale (France, Suisse, Allemagne).

La coordination de la plupart de ces gestionnaires au niveau européen est assurée par l'ENTSOE (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*).

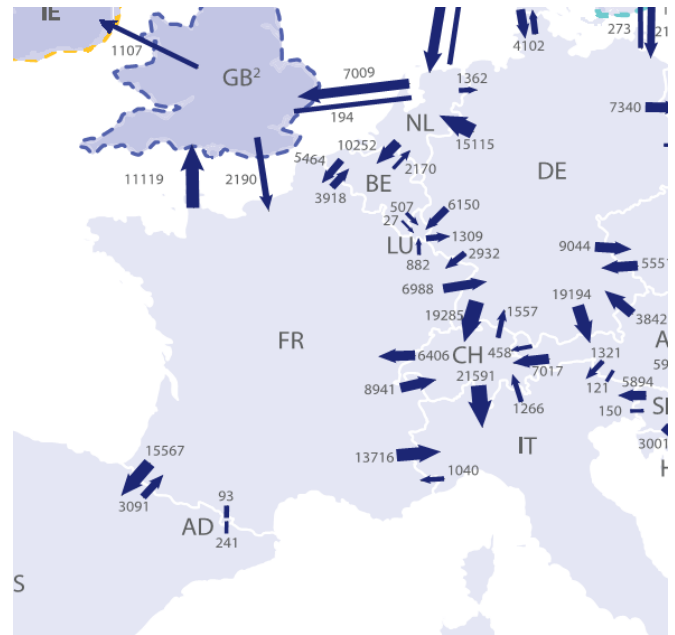
⁴ Voir l'effet de peau en sciences appliquées.



2.2.3 Echanges.

Un exemple des échanges énergétiques mensuels est fourni en annexe, on peut y remarquer que tous les membres de l'union participent aux échanges et que parfois même ces échanges sont bilatéraux !

Certains pays sont essentiellement importateurs comme l'Italie alors que d'autres exportent massivement comme la France. D'autres, comme l'Autriche pourrait se suffire à eux même puisque le solde exportateur représente moins d'1% de sa consommation.

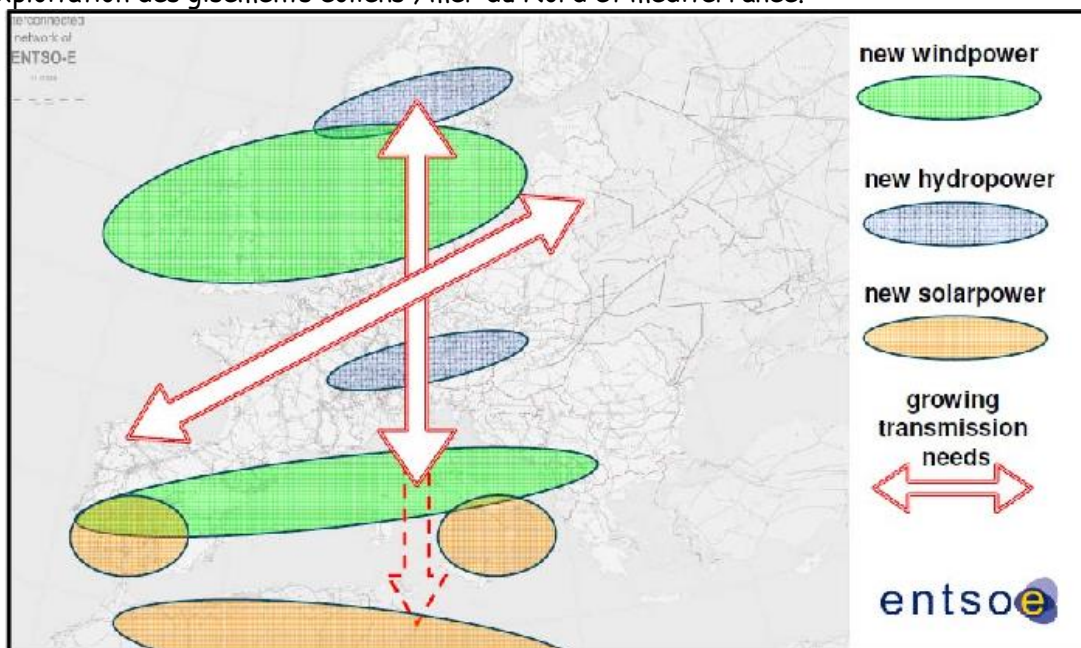


ENTSOE Powerfacts-2019

2.2.4 Développement-Extensions.

Les extensions à l'étude sont de 3 types :

- Boucle solaire méditerranéenne Espagne et Grèce.
- Développement des potentiels hydrauliques en Europe centrale et du nord.
- Exploitation des gisements éoliens ; mer du Nord et méditerranée.

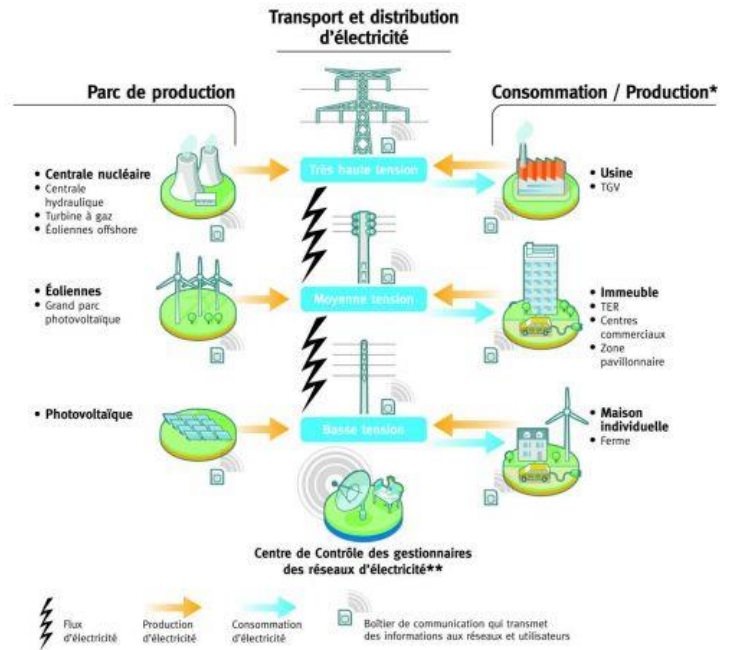


2.3 Smart Grid.

Les réseaux intelligents ou « smart grids » sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies informatiques, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs. En collectant des informations sur l'état du réseau, les smart grids contribuent à une adéquation entre production, distribution et consommation.

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation.

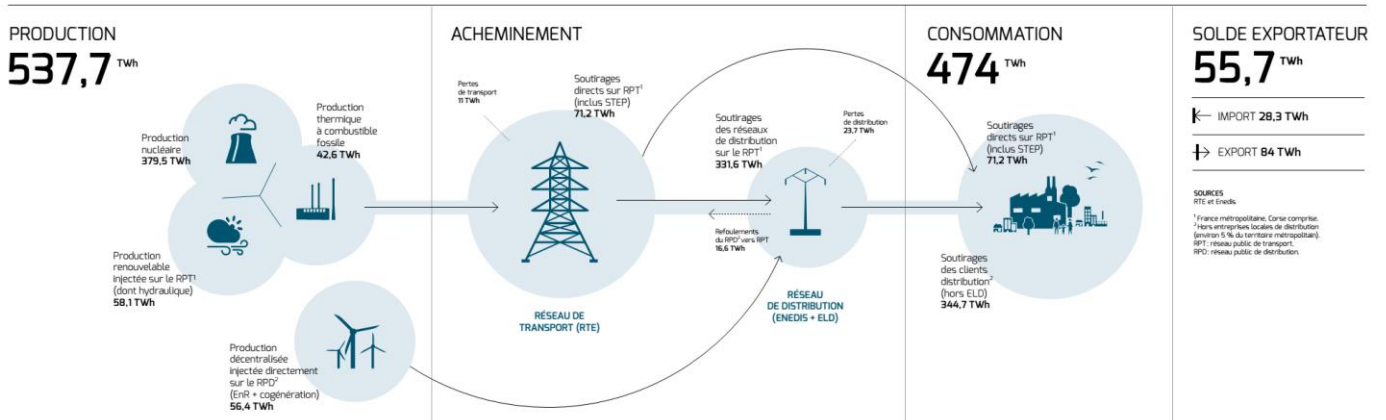
<https://www.connaissancedesenergies.org>



On parle aussi de micro grid (engie) :

On appelle microgrids ou micro-réseaux intelligents, des réseaux électriques conçus pour fonctionner à échelle locale. De petite taille, ils ont pour objectif de fournir un approvisionnement électrique fiable à un petit nombre de consommateurs. L'avantage ? Une meilleure résistance face aux imprévus ou aux dommages subis sur le réseau d'approvisionnement principal. En cas d'événement climatique par exemple, les coupures ou pannes à l'échelle d'un bâtiment ou d'un éco-quartier peuvent ainsi être évitées.

Plus communicants, plus interactifs et plus intelligents, ils permettent notamment de consommer selon les besoins, de piloter l'énergie en temps réel voire même de la stocker.



2.4 Cogénération.

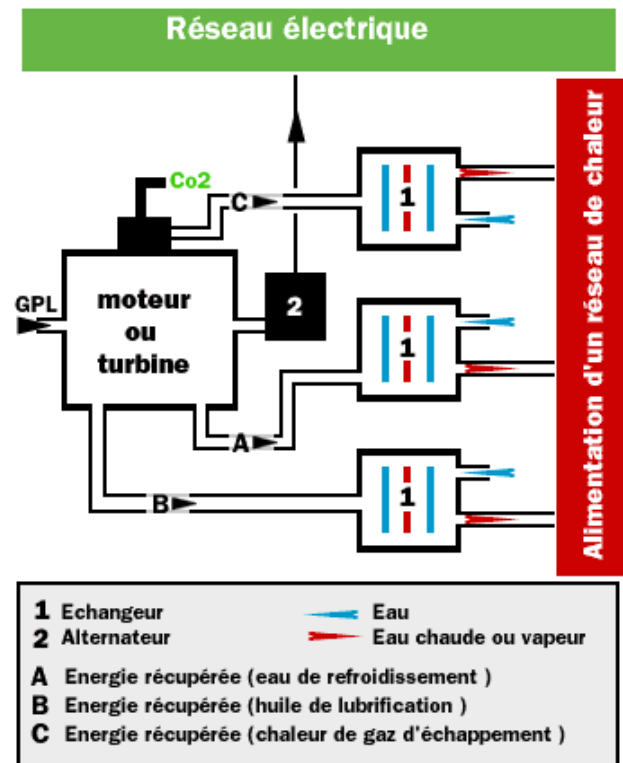
2.4.1 Définition.

La définition donnée par l'ADEME⁵ est : «production combinée chaleur/force qui recouvre un ensemble de techniques de production délivrant de façon simultanée de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique, cette dernière étant le plus souvent utilisée pour produire de l'électricité par couplage à un alternateur». L'énergie primaire utilisée peut être le fuel, le gaz, le charbon, le bois ou les déchets ménagers.

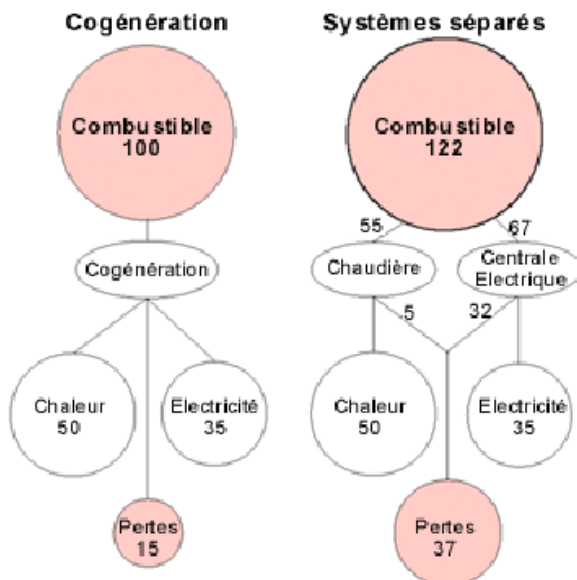
En d'autres termes, au lieu de rejeter la chaleur de la vapeur produite pour faire tourner un alternateur, on la récupère. Ce faisant, on améliore grandement le rendement de la centrale. Alors que pour une centrale thermique celui-ci vaut 50 %, avec la cogénération, on peut espérer 80 %.

Comme l'investissement de départ est conséquent et que l'amortissement n'a lieu qu'au bout de 5 à 10 ans, les états ont mis en place un système de rachat obligatoire de l'énergie et des aides à l'investissement.

Les secteurs particulièrement intéressés par cette technique sont les gros utilisateurs d'eau chaude, de vapeur ou d'air chaud.



2.4.2 Exemple d'application : ISERGIE (Grenoble).



Rendement de la centrale : 70 à 75% (contre 30 à 40% pour une centrale classique)

Puissance installée : 30 MW électriques et 33 MW thermiques

Production : 100 GWh d'électricité soit environ 12.5% de l'électricité distribuée par GEG et 95 GWh de chaleur soit environ 13% de la chaleur distribuée par la Compagnie de Chauffage de Grenoble.

⁵ ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, établissement public ...

3 Stockages.

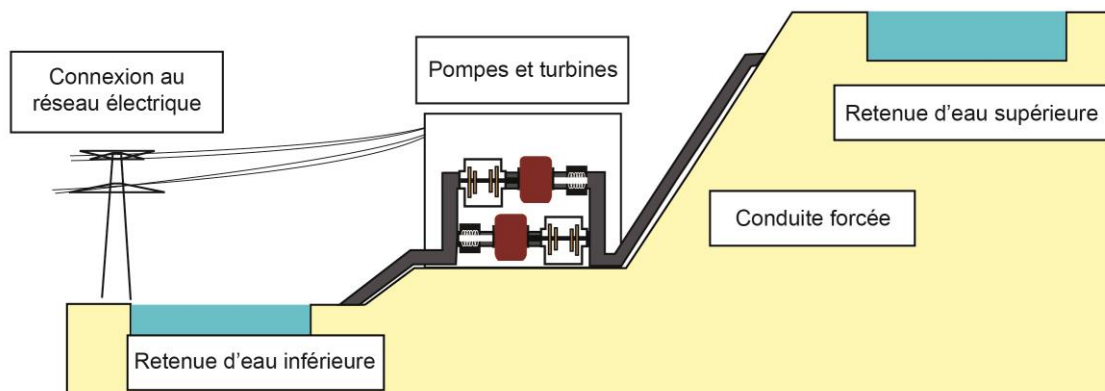
3.1 Pilotabilité/Stockage.

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=stockage&action=imprimer>

L'énergie électrique ne se stocke pas en tant que telle, il faut la convertir en une autre énergie ...

3.2 Pompage⁶.

3.2.1 Principe.



<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/comment-ca-marche-les-step>

Les STEP (Stations de Transfert de l'Énergie par Pompage) sont anciennes et leur technologie a fait ses preuves. Le principe consiste à utiliser de l'énergie électrique disponible (en heure creuse ou intermittente) pour constituer un stock d'énergie potentielle en pompant de l'eau d'un réservoir inférieur dans un réservoir supérieur. Ce stock peut ensuite être utilisé à la demande pour fournir de l'énergie électrique en retournant dans le réservoir de départ ...

3.2.2 Caractéristiques.

Le temps de réaction est très court, de l'ordre de la dizaine de minute.

La puissance disponible dépend de la hauteur de chute et du débit disponible comme pour une centrale hydraulique classique.

En revanche, l'énergie disponible dépend de la taille du réservoir supérieur de même que le temps de décharge qui est de l'ordre de la journée.

En France ce sont 5 GW qui sont installés et il y a un potentiel de 6 GW supplémentaires. L'énergie produite représente en 2017 18% de l'énergie hydraulique totale.

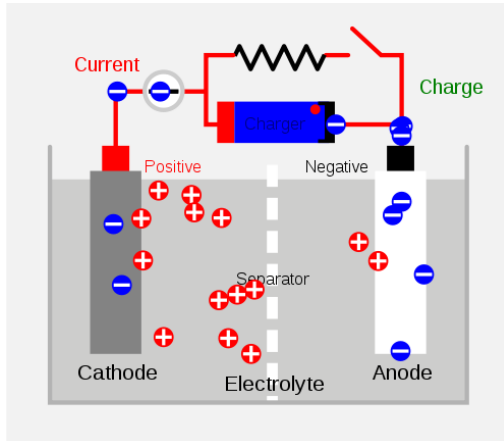
3.2.3 Extensions.

Il existe des STEP en bord de mer.

⁶ Voir : <https://www.encyclopedie-energie.org/les-stations-de-pompage-step/>

3.3 Stockage chimique.

3.3.1 Principe de fonctionnement.



Document wikipédia

Remarque : la capacité d'une batterie traduit la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète, pendant une durée donnée et donc pour un régime de courant de décharge donné.

On parle alors d'autonomie T_d de la batterie, celle-ci est liée à la capacité C_{td} et au courant de décharge I_{td} par la formule suivante : $T_d = C_{td}/I_{td}$.

Ainsi, une batterie de capacité $C_{20}=100$ Ah peut fournir 5 A pendant 20 h.

Il est cependant faux de dire qu'elle peut fournir 20 A pendant 5 h comme le montre le tableau suivant⁷ :

Temps de décharge (h)	20	10	8	4	1
Courant (A)	5	9	10	16	55

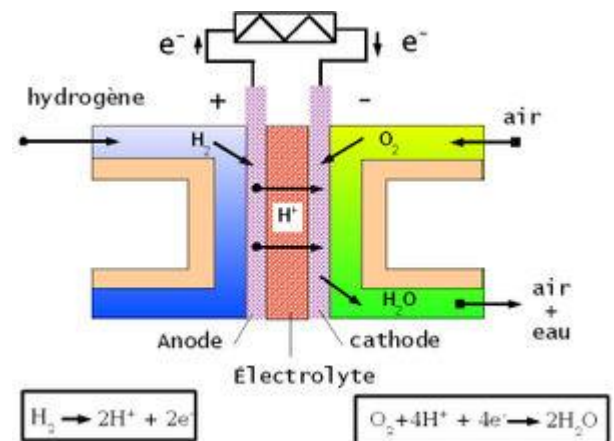
3.3.2 Energies « innovantes » : les piles à combustible.

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau.

Tandis que l'électrolyse décompose l'eau en hydrogène et en oxygène sous l'action d'un courant électrique, la pile à combustible recombine l'hydrogène et l'oxygène en créant un courant électrique.

Le déchet principal est de l'eau => propre !!

En revanche, l'hydrogène est difficile à stocker ...



Cependant « la conversion d'électricité en gaz (en anglais : power to gas, P2G ou PtG) est un procédé de transformation de l'énergie électrique en énergie chimique. La principale application de ce procédé est la valorisation de l'électricité excédentaire (quand la production dépasse les capacités de flexibilité du système électrique) sous une forme stockable à moyen et long terme ».

Wikipédia.

⁷ Loi de Peukert ...

3.4 Gaz comprimé.

3.4.1 Principe.

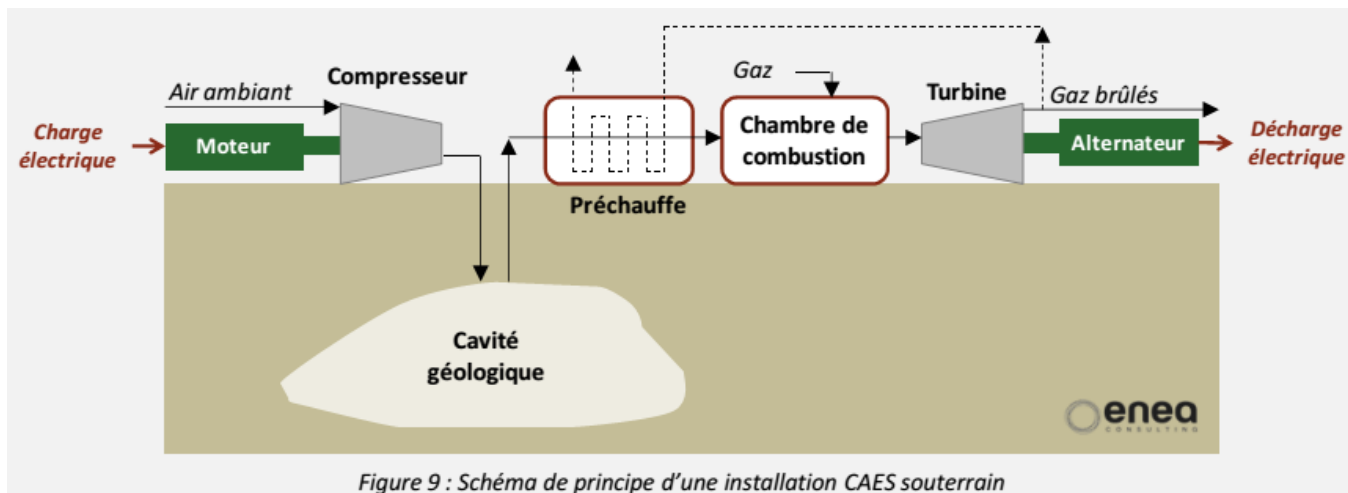


Figure 9 : Schéma de principe d'une installation CAES souterrain

3.4.2 Caractéristiques.

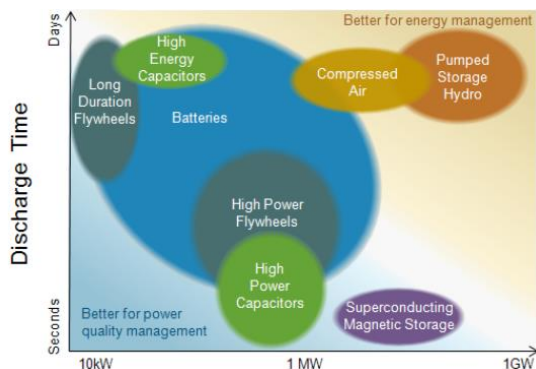
Les centrales de stockage actuellement en service permettent de fournir de 100 à 300 MW pendant 3 à 30 heures, ce qui correspond à une énergie disponible de l'ordre du GWh ...

3.5 Autres.

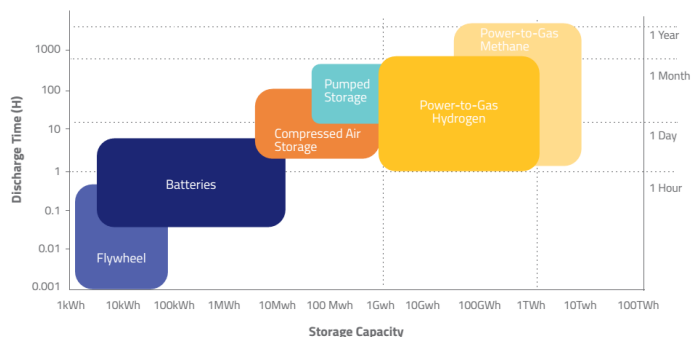
D'autres procédés sont à l'étude qui transforment l'énergie solaire en chaleur qui peut être stockée (dans des fluides caloporteurs) et restituée ultérieurement lorsque le soleil n'est plus présent ...

3.6 Bilan.

3.6.1 Actuel.



3.6.2 Prévisions 2050 ...



4 Annexes : Moyens de production.

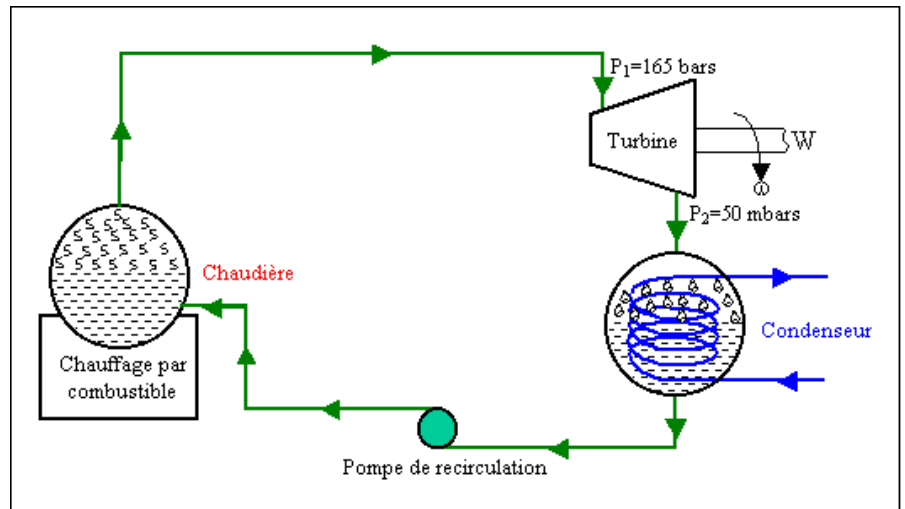
4.1 Centrales à flamme.

4.1.1 Principe.

De l'eau liquide est chauffée grâce à un combustible pour passer à l'état de vapeur sous pression.

Cette vapeur entraîne une **turbine** (transformation en énergie mécanique) sur l'arbre de laquelle est accouplé un **alternateur** (transformation en énergie électrique).

Un condenseur (circuit de refroidissement) liquéfie la vapeur d'eau et le cycle recommence.



4.1.2 Points clefs.

Il faut un combustible (**énergie primaire**) pour faire fonctionner la machine. Les principaux combustibles sont le gaz naturel, le pétrole et le charbon : trois combustibles fossiles **non renouvelables** à grande échelle.

Le chauffage par combustible produit du CO_2 qui est un gaz à effet de serre et qui donc est en partie responsable du réchauffement de la planète.

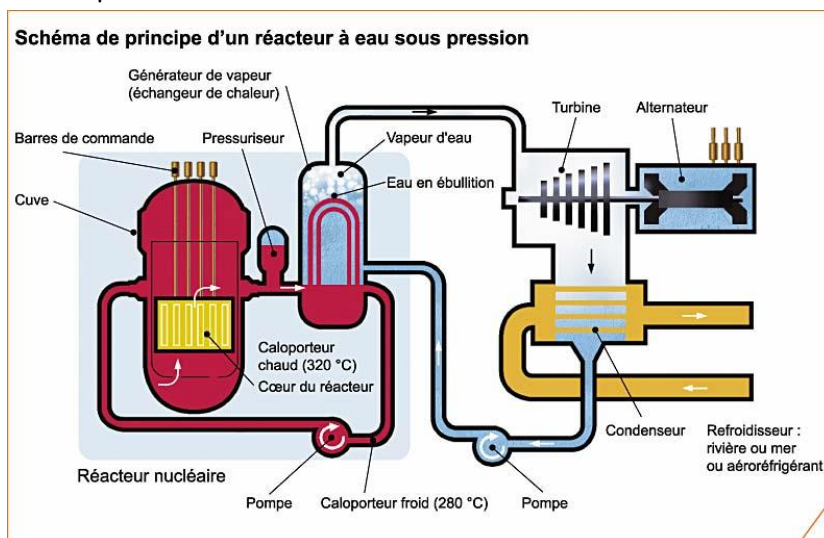
Comme beaucoup de chaleur est perdue au niveau du condenseur, le **rendement**⁸ d'un tel système est faible, inférieur à 40 % ! (Voir le paragraphe sur [la cogénération](#)).

4.1.3 Avenir.

Dans les pays en voie de développement ces centrales ont l'avantage d'avoir fait leurs preuves, et de ne pas exiger de savoir-faire particulier. L'aspect pollution n'y semble pas déterminant.

4.2 Thermonucléaire.

4.2.1 Principes.



La différence réside dans la chaudière (ou générateur de vapeur).

Une réaction nucléaire est entretenue dans le cœur du réacteur qui permet de chauffer un liquide caloporteur⁹ lequel va chauffer l'eau de la chaudière.

Il y a donc un deuxième circuit, mais plus de combustion à flamme

4.2.2 Points clefs.

Le rendement classique d'une centrale nucléaire vaut 30 à 35 %.

En terme d'effet de serre ces centrales sont neutres puisque qu'elles ne produisent que très peu de CO_2 .

En revanche, la filière nucléaire produit des déchets radioactifs qu'il faut traiter car ils sont très dangereux. De plus le démantèlement des centrales en fin de vie pose un problème.

⁸ Le rendement est le rapport de la puissance fournie ou utile P_u sur la puissance absorbée P_{abs} : $\eta = P_u/P_{abs}$

⁹ Caloporteur : qui transporte la chaleur.

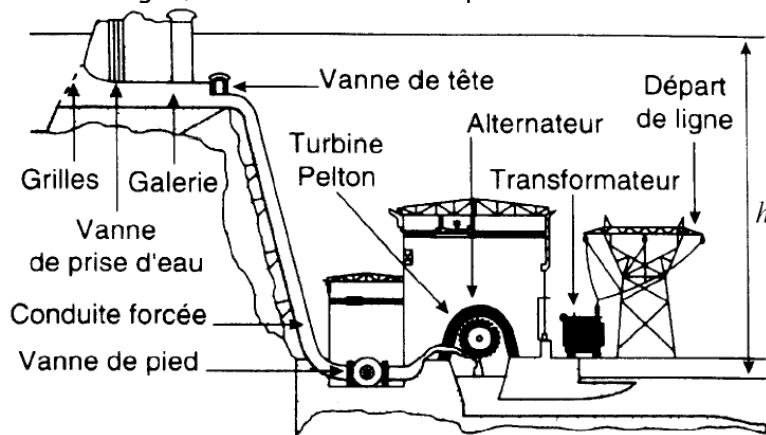
4.3 Hydraulique.

4.3.1 Présentation.

Sans entrer dans les détails, il existe plusieurs types de centrale hydraulique selon le relief du site.

De manière générale, l'énergie potentielle de l'eau entraîne une **turbine** en rotation sur laquelle est accouplé un **alternateur** chargé de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Un transformateur élévateur permet ensuite de se raccorder au réseau de transport.

L'énergie potentielle d'une masse M d'eau se déplaçant d'une hauteur h vaut : $E_p = M.g.h$
avec $g=9,81$ l'accélération de la pesanteur.



La puissance P de cette chute d'eau est donnée par la formule suivante $P=E_p/t=$ donc :

$$P=Q.g.h$$

avec $Q=M/t$ le débit en m^3/s et P en kW.

Exemple de centrale de haute chute

Selon le relief « géographique », donc la hauteur, on parle alors de centrale de haute ($h>300m$), moyenne ($30m<h<300m$) ou basse ($h<30m$) chute.

4.3.2 Comparaison.

Les centrales de haute chute permettent de faire du stockage grâce à des cycles de pompage/turbinage.

Constituée de deux bassins de retenue d'eau (inférieur et supérieur), la centrale produit de l'électricité par turbinage aux heures de forte consommation (pleines) et re-stocke cette eau aux heures de faible consommation (creuses) par pompage.

De fait, les centrales au fil de l'eau fonctionnent constamment alors que les autres ont un rôle régulateur.

4.3.3 Exemples.

Centrales :	Nom/rivière	Débit (m^3/s)	Hauteur (m)	Groupe tournant ...
Haute chute	?	?	?	?
Moyenne chute	Serre Ponson Durance	300	120	4 * 90 MVA
Basse chute	Donzère Rhône	1500	22	6 * 50 MVA
Max	3 gorges Yang tze	< 10 000	180	26 * 710 MVA

4.3.4 Micro-centrales.

Voir les essais effectués sur la micro-centrale du laboratoire.

4.4 Eolien.

<http://www.windpower.org/en/> très bonne synthèse dans ce domaine !!!

4.4.1 Principe utilisé.

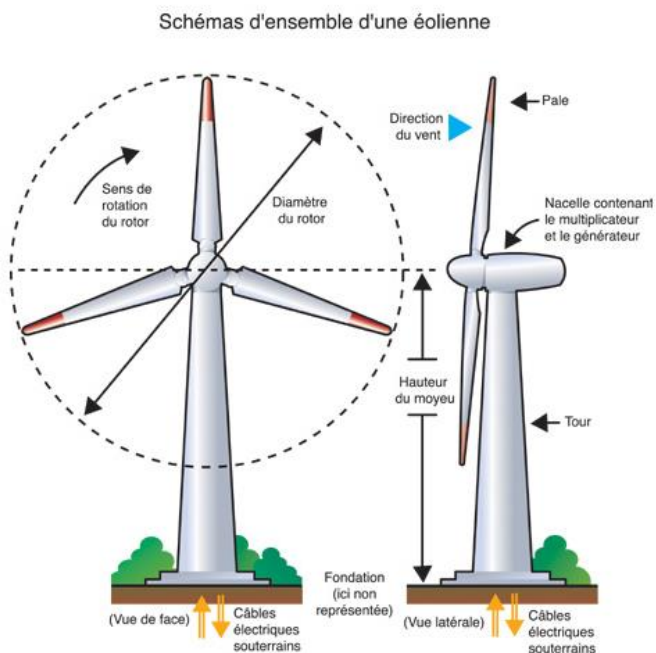
L'énergie primaire utilisée est l'énergie cinétique du vent. Celle-ci sert à actionner les pales d'un rotor récupérant de l'énergie mécanique en rotation.

Sur ce rotor est accouplée une génératrice qui délivre de l'énergie électrique. Elle est utilisée telle qu'elle ou est raccordée au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur.

La puissance disponible (jusqu'à 8 MW) est proportionnelle¹⁰ :

- au cube de la vitesse du vent (d'où la hauteur des masts),
- à la surface balayée (d'où la taille des pales !).

Sans entrer dans les détails, les génératrices sont asynchrones, pour le petit éolien isolé ou synchrone pour le gros éolien raccordé au réseau.



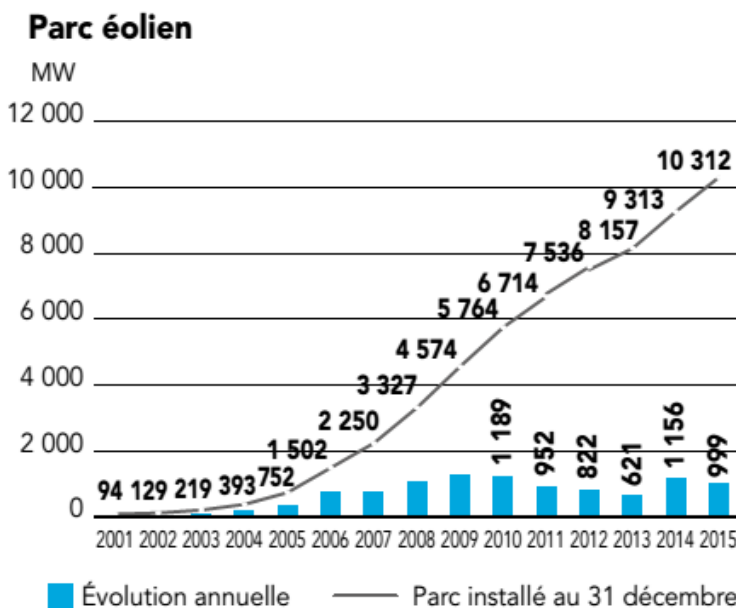
Document : planete-energie.com

4.4.2 Avenir.

On distingue en fonction de la taille ou de la puissance des appareils le petit et le grand éolien. En dessous de 30 à 100 kW il s'agit de petit éolien et cela concerne généralement l'électrification d'un site isolé (consommation locale : bateau, île ...), au-delà on regroupe plusieurs machines, on parle alors de ferme éolienne et il s'agit alors de raccordement au réseau et donc revente.

Document RTE

Cette progression de la puissance installée ne doit pas faire oublier la réalité ci-dessous :



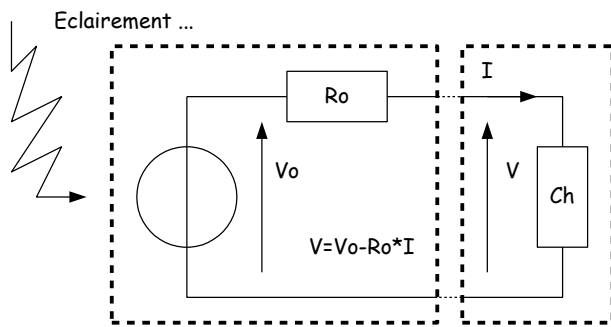
Type	Conso. 2015
Hydrau.	58,7 TWh
Eolien	21,1 TWh

Sachant que la grosse part des EnR en France est hydraulique et que la saturation dans ce domaine est quasiment atteinte (>90%), une des extensions possibles est bien dans l'éolien.

¹⁰ Formule de BETZ : $P=0,37*S*V^3$

4.5 Solaire photovoltaïque.

4.5.1 Principe utilisé.



Découverte en 1954, la photosensibilité du silicium a permis la conception de cellules fournissant une tension fonction de l'éclairement¹¹.

Des capteurs au silicium transforment l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

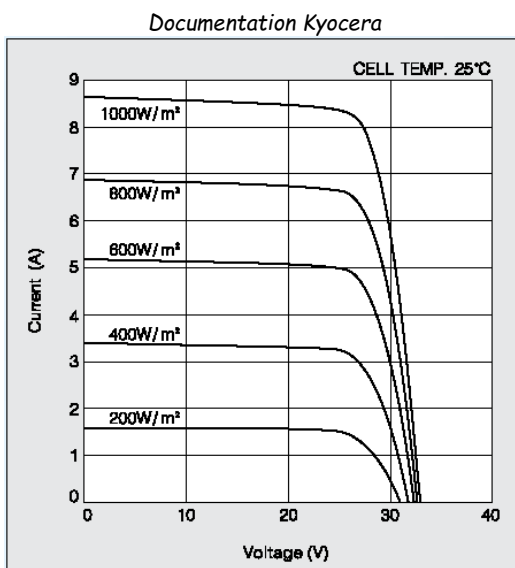
Une cellule est donc un générateur de tension à vide V_0 qui délivre un courant I si on branche une charge à ses bornes.

En associant plusieurs capteurs en série on forme des éléments aux bornes desquels on obtient une tension continue fonction de l'éclairement. Il suffit alors de mettre plusieurs éléments en parallèle pour augmenter le courant disponible.

Cette association en « panneaux » fournit donc de l'énergie sous forme continue, on parle en fait de **Wc** ou **Watt Crête** pour la puissance disponible sous un éclairement optimal.

(Voir application correspondante sur le dimensionnement d'un site raccordé dans la Drôme).

4.5.2 Caractéristiques.



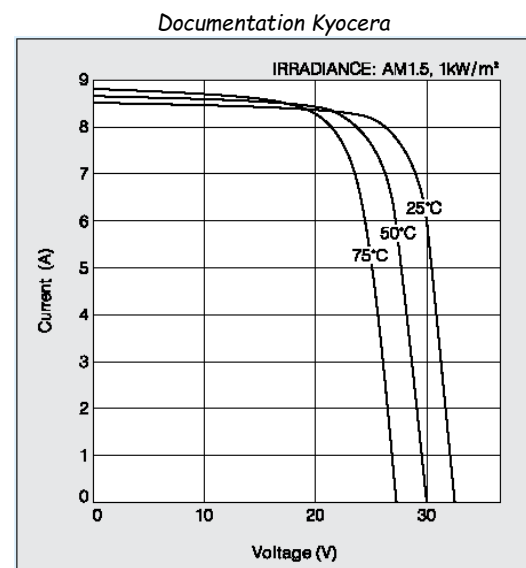
La courant disponible est directement proportionnel à l'éclairement (ou irradiançe) en W/m^2 .

On distingue deux types d'installation photovoltaïque selon qu'elles sont ou non raccordées au réseau de distribution.

4.5.3 Production isolée.

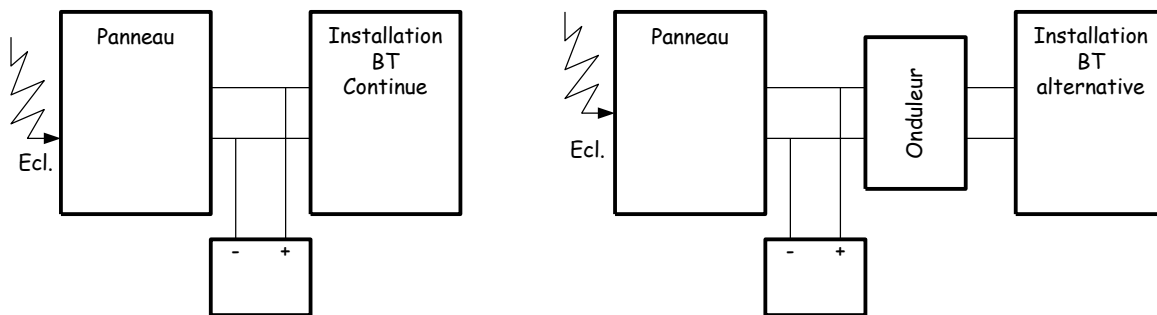
Voir séance d'essais consacrée à ce thème.

Les deux structures principales sont les suivantes :

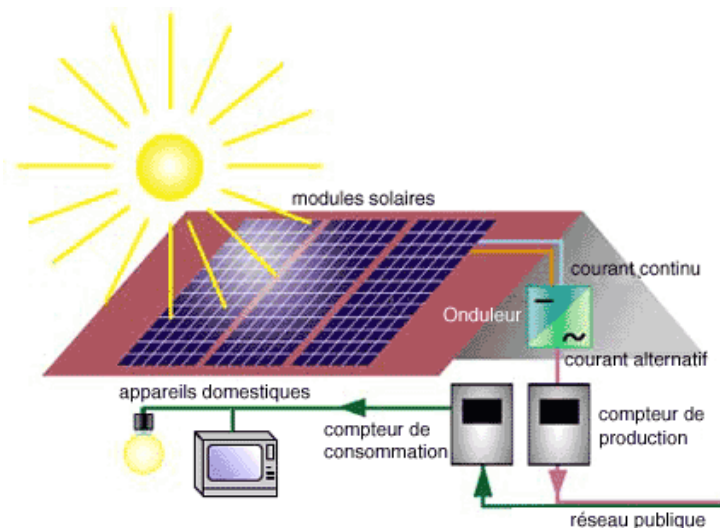


La tension fournie par un panneau chute avec l'élévation de la température ...

¹¹ On parle aussi de l'irradiançe qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface. L'unité est donc le W/m^2 .



4.5.4 Raccordement au réseau.



Documentation Solstis

Le schéma de principe d'un raccordement au réseau est donné ci-contre.

Il faut impérativement utiliser un onduleur pour pouvoir se raccorder sur le réseau monophasé ou triphasé classiques.

On remarque l'installation de 2 compteurs afin de différencier l'énergie consommée de l'énergie produite.

Pour aider au développement de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque, l'achat de l'énergie injectée sur le réseau se fait à un tarif préférentiel !

4.5.5 Etat des lieux du solaire raccordé 2015.

Il faut différencier la puissance installée et l'énergie produite ...

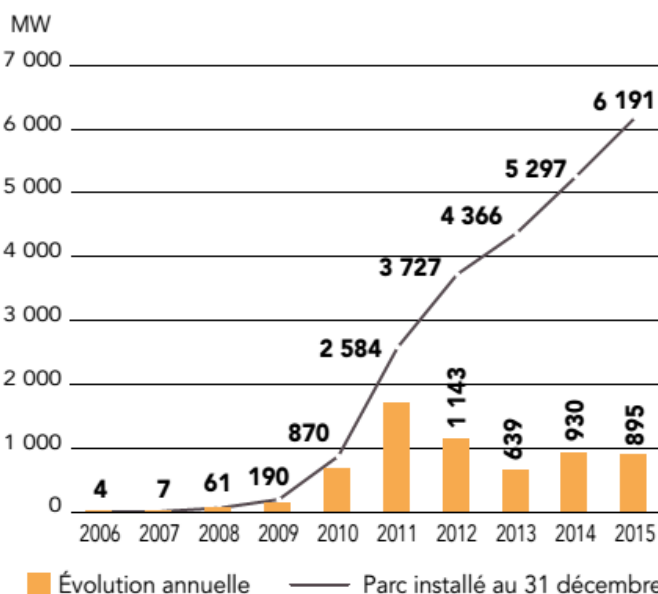
La puissance installée est en progression et atteint plus de 6 GW fin 2015 pour une énergie produite de 7,4 TWh ce qui correspondrait à un facteur d'utilisation de 14 % qu'on peut considérer comme faible ...

Le nombre d'installations est en constante augmentation, ce qui va demander des installateurs « au courant » et des techniciens pour en assurer la maintenance ...

38 % du marché s'effectue en région Rhône-Alpes ...

Les panneaux solaires sont donnés pour une puissance valable à 80 % pendant 20 ans si bien entretenus ... En revanche l'onduleur est prévu pour durer environs 5

Parc solaire



Document RTE

5 Conclusions.

5.1 Bilan applicatif des énergies.

5.1.1 Synthèse.

Type	Avantage	Inconvénient	Application
Nucléaire	Indépendance du pays pas d'effet de serre	Déchets radioactifs ...	Gros de la consommation interne nationale.
Fossiles Gaz, charbon, fioul ...	Finalement peu cher	CO ² et non renouvelable	
Hydraulique	Propre, renouvelable pas d'effet de serre	Pas d'extension possible en France (90%)	Régulation de la production.
Eolien		Investissement lourd mais aidé	Site adapté
Solaire raccordé		Durée de vie des cellules (20 ans)	Site ensoleillé avec stockage sur le réseau
Solaire isolé			Site ensoleillé éloigné du réseau.
Pile à combustible	Déchet = H ² O !	Très cher Stockage lourd	Embarquée ou portable.

5.1.2 Bilan carbone

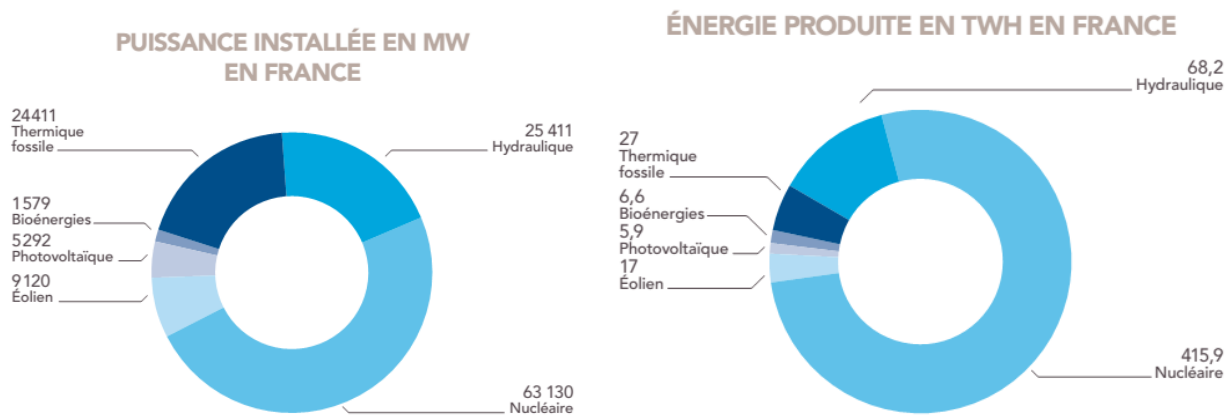
Mode de production	Hydraulique	Nucléaire	Eolien	Photovoltaïque	Gaz naturel	Fuel	Charbon
CO₂ (g/kWh)	4	6	3 à 22	60 à 150	883	891	978

Source : Etude ACV – DRD

Ces valeurs s'expliquent facilement par le fait que certaines sources sont émettrices de CO₂ comme par exemple les énergies fossiles (**Gaz naturel, Fuel, et charbon**). Les différences de rejets entre eux sont dues à la différence de rendement de leur combustion ainsi qu'aux différentes manières de produire les éléments et de les transporter.

Il a été pointé du doigt le fait qu'un [panneau solaire photovoltaïque](#) provenant de Chine émettait 180 % de dioxyde de carbone de plus qu'un panneau français. Il en va de même pour les éoliennes.

5.2 Comparatif Puissance Energie ...



source RTE 2014

Notes ;

Distribution HTA



(Notes)

1 Introduction.

1.1 Généralités.

Avant tout, nous tenons à remercier les différents élèves qui en faisant leurs stages chez E.D.F. nous ont ramené les renseignements qui nous ont permis d'organiser ce document à destination des élèves de S.T.S. électrotechnique.

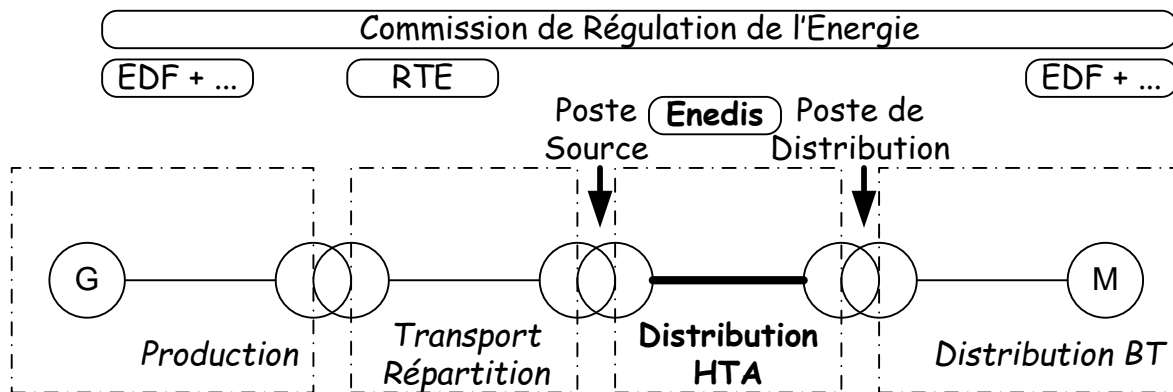
Un remerciement particulier à M. Palka (P2001) et M. Baraille (P2005).

L'étude de la distribution HTA, qu'il s'agisse de la conception, de l'exploitation ou de la maintenance, est complexe et relève bien souvent de compétences dépassant le cadre des savoirs classiques d'un technicien en électrotechnique. Nous avons donc décidé de limiter l'étendue de ce document à l'organisation d'un poste de transformation HTA/BT. Avec deux points particuliers :

les principes d'alimentation HTA,
le transformateur abaisseur.

Ce document est accompagné du dossier rédigé en TP qui illustre sur un exemple les principes de la distribution HTA issue des postes sources ...

1.2 Rappel.



Les termes employés ci-dessus ne sont pas « normalisés » ils servent juste à clarifier les notions utilisées dans ce document. Il a environs en 2014 2200 **postes sources** ...

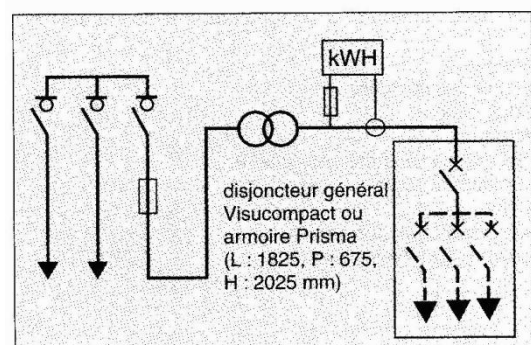
A titre indicatif, en 2015, les clients concernés par les différents niveaux de tension sont approximativement les suivants :

HTA	:	770 000	postes (dont lycée du Dauphiné)
BT	:	35 000 000	clients.

1.2.1 Fonctions.

Un poste de distribution (ou de transformation) doit remplir plusieurs fonctions à savoir :

arrivée et départs de l'énergie,
protection du transformateur HTA/BT,
commutations,
annexes : mesure,
comptage,
contrôle,
liaisons et connexions diverses ...

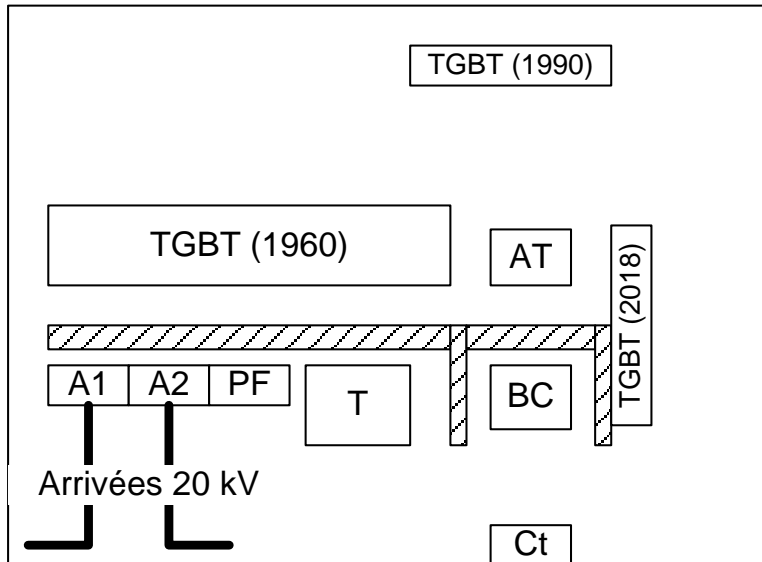


1.2.2 Localisation géographique.

(voir le dossier rédigé en TP concernant le bassin Romano-Péageois et ses 2 postes source).

1.2.3 Localisation physique : exemple du Dauphiné.

(voir le diaporama sur le site COURTD2.free.fr).



A1/A2 : Arrivées HTA,

T : Transformateur HTA/BT,

Ct : Compteur, (en basse tension).

BC : Batterie de condensateurs,

TGBT : TGBT 410 V,
(1990 et 2018)

AT : Auto-transformateur BT/BT.

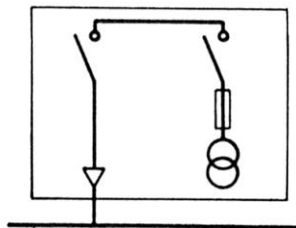
Ancien TGBT: 127/230 V,
(1960)

2 Arrivées 20 kV.

2.1 Structures des alimentations HTA. (Voir TP).

Comme il a été vu en TP, la structure des postes sources est essentiellement radiale sans arborescence.

2.1.1 Antenne (ou simple dérivation).



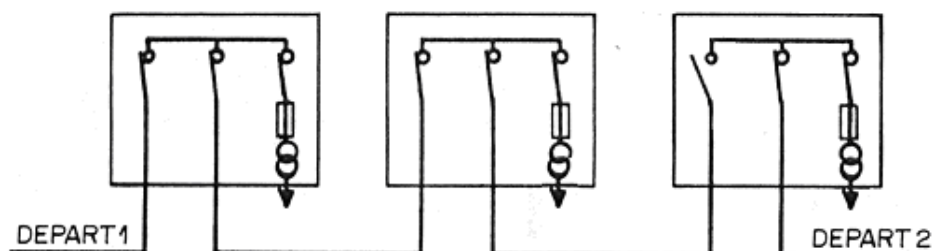
Doc EDF :

Le poste est alimenté par une dérivation simple du réseau HTA. Cette solution est essentiellement utilisée en bout de réseau aérien.

L'inconvénient réside dans l'absence de continuité de service en cas de problème amont ...

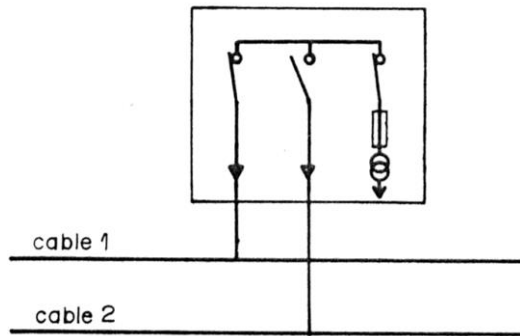
2.1.2 Rupture (ou coupure) d'artère.

Les postes alimentés de cette manière sont traversés par la ligne HTA (Artère). En cas de défaut sur l'artère, les départs BT continuent à être alimentés par fermeture des interrupteurs adéquats. La continuité de service est donc améliorée par rapport à l'alimentation en antenne.



Doc. EDF :

2.1.3 Double dérivation.



Doc. EDF :

Le poste est raccordé à deux câbles d'alimentation (un en service et un en réserve).

En cas de problème, le basculement automatique s'effectue en quelques secondes assurant ainsi une relative continuité de service.

Les deux interrupteurs ne peuvent pas être fermés simultanément, il faut un verrouillage mécanique entre les deux.

(Voir **Stade de France** en fin de chapitre).

2.1.4 Cellules.

Doc. Alstom :

Fonction	Arrivée ou départ par interrupteur.	Départ-protection par association interrupteur-fusibles.	Alimentation en double dérivation ou normal-secours.	Départ-protection par combiné interrupteur-fusibles.	Gaine de liaison - Remontée barres ou - Arrivée directe.
Schéma					
Désignation	IS	PF	DD et NS	PFA	L ou LST

2.1.5 Description fonctionnelle :

Arrivées, départs,
 Protections inter à fusibles, disjoncteur etc ...
 Mesures : courants, tensions, comptage ...
 Adaptation matérielle : haut/bas, JdB, extension Etc, etc ...

2.1.6 Caractéristiques électriques.

Afin de choisir les différentes cellules permettant d'organiser un poste de transformation HTA/BT, il faut définir les critères suivants, et choisir des matériels ayant des caractéristiques telles que :

Critères :	Caractéristiques :
Tension de service (ou d'emplois U_e)	< Tension assignée U_n .
Courant de ligne (ou d'emplois I_e)	< Courant assigné I_n .
Tenue aux court-circuit	> Courant de court-circuit Max (I_{kmax}).

La détermination des protections : calibres ou réglages est le résultat d'études complexes qui dépassent le cadre de ce document. Quelques méthodes de détermination seront cependant vues sous forme de T.D. (avant-projet 2001 par exemple).

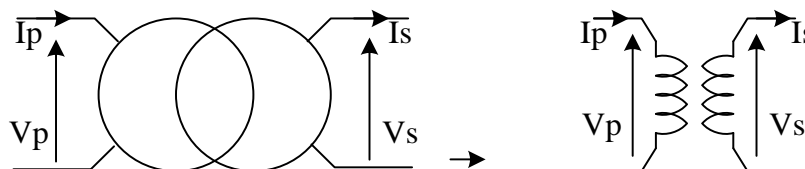
3 Transformateur abaisseur.

3.1 Fonctionnement.

3.1.1 Schéma équivalent.

Un transformateur est un appareil qui permet de modifier la valeur efficace d'une tension sinusoïdale sans en changer la fréquence ni la forme.

Un transformateur monophasé se représente de la manière suivante :



3.1.2 Equations de base.

On définit le rapport de transformation m comme suit :

$$m = \frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

Si sa puissance apparente vaut S en VA alors on a en monophasé :

$$S = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

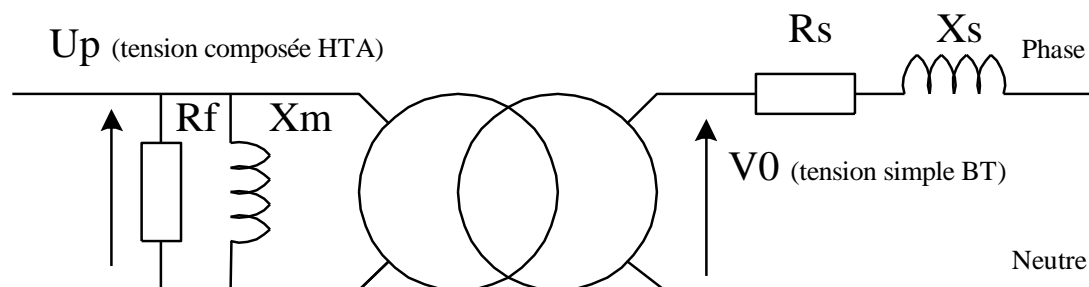
en triphasé :

$$S = 3 \cdot V_p \cdot I_p = 3 \cdot V_s \cdot I_s = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s$$

3.1.3 Imperfections.

Cette partie est la conclusion technologique du cours sur la modélisation des transformateurs vu en Sciences Appliquées et validé en séance d'essai de système.

Le schéma suivant modélise un transformateur de distribution. Il s'agit d'un modèle équivalent monophasé qui traduit fidèlement le comportement électrique d'un transformateur triphasé.



L'échauffement du transformateur se décompose en deux parties :

Les pertes joules qui dépendent du courant qui circule dans le transformateur. On modélise cet échauffement par la résistance R_s placée en série au secondaire du transformateur. On a alors :

$$P_j = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

avec I_s le courant en ligne au secondaire ...

Les pertes fer qui dépendent du temps de branchement du transformateur (même en fonctionnement à vide). On modélise cet échauffement par une résistance R_f placée en parallèle sur le primaire. On a alors :

$$P_f = 3 \cdot \frac{U_p^2}{R_f}$$

avec U_p la tension entre phase au primaire ...

3.2 Caractéristiques.

3.2.1 Plaque signalétique.



3.2.2 Valeurs types.

puissance assignée (kVA) ⁽¹⁾	100	160	250	315*	400	500*	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150		
tension assignée primaire ⁽¹⁾	15 ou 20 kV															
tension assignée secondaire à vide ⁽¹⁾	400 V entre phases, 231 V entre phase et neutre															
niveau d'isolement assigné ⁽⁴⁾ primaire	17,5 kV pour 15 kV 24 kV pour 20 kV															
réglage HTA (hors tension)	± 2,5 % ou ± 5 % ou ± 2,5 % ± 5 % ⁽¹⁾															
couplage	Dyn 11 ⁽¹⁾ (triangle ; étoile neutre sorti)															
pertes (W) à vide	210	460	650	800	930	1100	1300	1220	1470	1800	2300	2750	3350	4380		
dues à la charge ⁽²⁾	2150	2350	3250	3900	4600	5500	6500	10700	13000	16000	20000	25500	32000	33000		
tension de court-circuit (%) ⁽²⁾	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	7		
courant à vide (%)	2,5	2,3	2,1	2	1,9	1,9	1,8	2,5	2,4	2,2	2	1,9	1,8	1,7		
chute de tension à pleine charge (%)	cos φ = 1		cos φ = 0,8		cos φ = 1		cos φ = 0,8		cos φ = 1		cos φ = 0,8		cos φ = 1		cos φ = 0,8	
rendement (%)	97,69	98,27	98,46	98,53	98,64	98,70	98,78	98,53	98,57	98,60	98,63	98,61	98,61	98,83		
charge	97,13	97,85	98,09	98,17	98,30	98,387	98,48	98,17	98,22	98,25	98,29	98,27	98,26	98,54		
charge	98,14	98,54	98,70	98,75	98,84	98,89	98,96	98,81	98,84	98,86	98,88	98,87	98,87	99,04		
75 %	97,69	98,18	98,37	98,44	98,56	98,62	98,71	98,51	98,56	98,58	98,61	98,60	98,60	98,80		
bruit (dBA) puissance acoustique Lwa	53	59	62	64	65	67	67	68	68	70	71	72	74	74		
pression acoustique Lpa à 0,3 mètre	42	48	50	52	53	54	54	55	55	56	58	58	59	59		

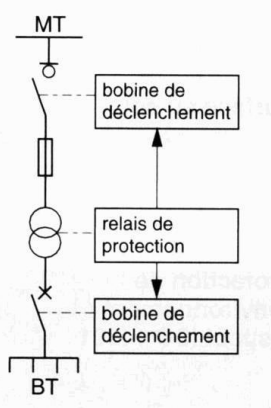
3.3 Protections.

3.3.1 Protections électriques.

Le choix des protections électriques est très spécifique en raison du comportement du transformateur lors de sa mise sous tension et de la pointe de courant qui apparaît alors.

(Voir les TD correspondant au choix de fusibles HTA de protection ...).

3.3.2 Protections internes.



Doc. Schneider

Les enroulements du transformateur baignent généralement dans un diélectrique chargé de les refroidir.

En cas de défaut, il faut éviter les échauffements anormaux et leurs conséquences qui peuvent être destructrices !

On utilise un DGPT2, dispositif de protection capable de détecter :
 les dégagements gazeux internes
 les surpressions,
 les élévations de température anormales,

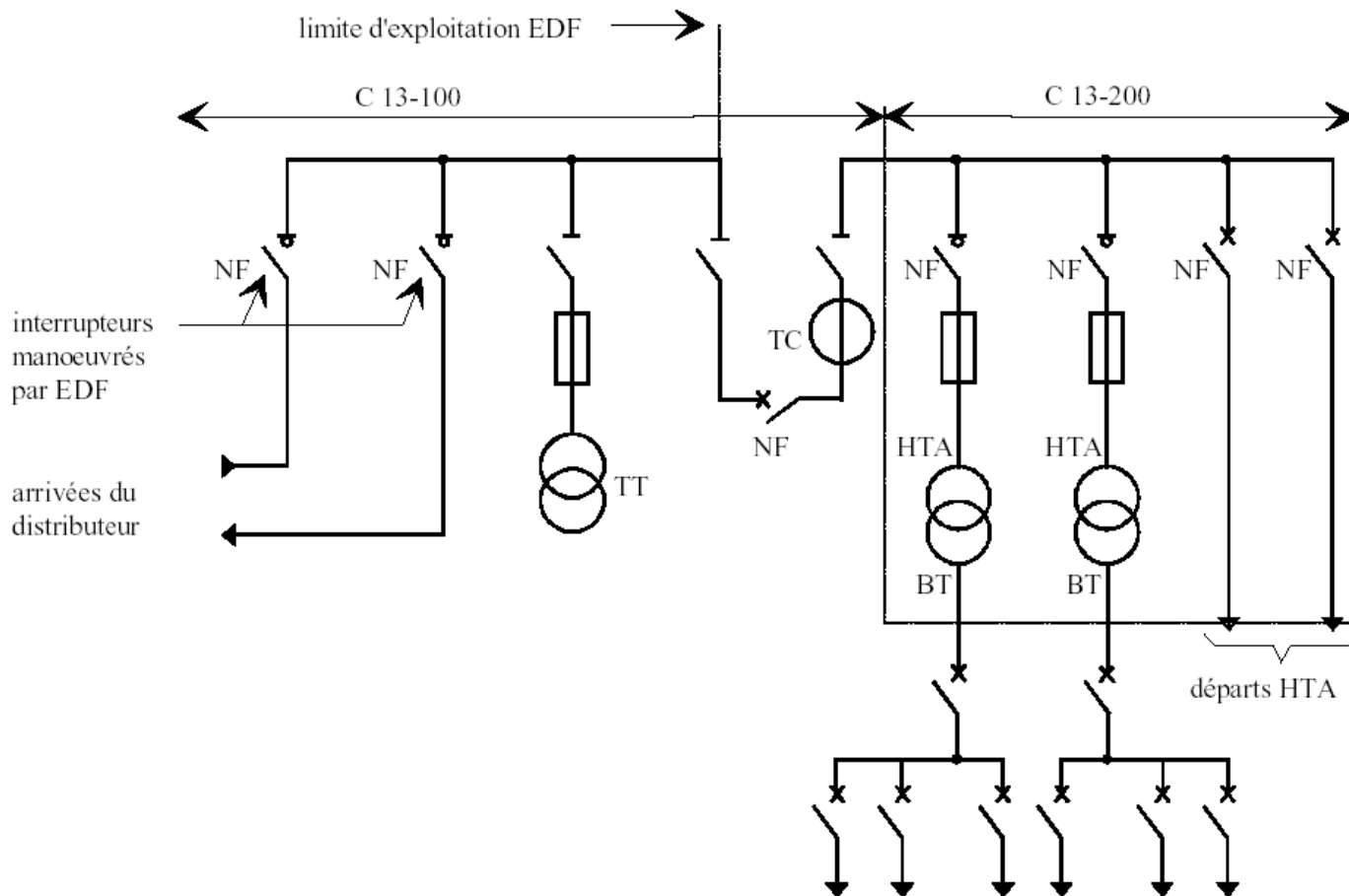
et d'agir en ouvrant les dispositifs en amont aussi bien qu'en aval.
 (Voir le TD correspondant ...)

4 Annexes.

4.1 Exemple de poste.

4.1.1 Schéma.

Documentation Schneider



EX : dessiner le raccordement d'un compteur d'énergie coté HTA ...

4.1.2 Description.

Alimentation en rupture d'artère, protection générale par disjoncteur et comptage HTA, deux transformateurs HT/BT et départs HTA.

4.1.3 Problème du comptage.

(Voir le TP tarification et le raccordement d'un compteur/centrale au chapitre 14 ...)

Le comptage, et donc la facturation de l'énergie consommée (active, réactive, harmoniques ...), nécessite une analyse de l'énergie fournie. Il faut donc disposer d'images précises des tensions disponibles ainsi que des courants absorbés.

Le comptage peut s'effectuer au primaire du transformateur, dans ce cas, on utilise généralement des transformateurs de potentiel pour abaisser les tensions mesurées par le compteur.

En revanche s'il s'effectue au secondaire il faut intégrer les pertes internes du transformateur.

C'est la norme NFC 13-100 qui définit l'emplacement du comptage :

avec un seul transformateur de courant nominal $I_{sn} < 2000$ A le comptage s'effectue en basse tension.
autres cas : il s'effectue en haute tension.

5 Exemple du Stade de France¹.

L'objet de l'étude porte sur l'alimentation en énergie électrique du stade de France.

5.1 Structure HTA.

- 5.1.1 Repérez l'arrivée normale ENEDIS (ERDF) et donnez son type.
- 5.1.2 Surlignez en vert la boucle d'alimentation normale 20 kV.
- 5.1.3 Surlignez en jaune la boucle d'alimentation de remplacement 20 kV.
- 5.1.4 Mettez en évidence (rouge) la boucle de sécurité 20 kV.
- 5.1.5 Quel est le principal schéma de liaison à la terre du neutre de cette installation ?
- 5.1.6 Comment est renforcée la continuité de service au niveau des circuits de sécurité basse tension (410V) ?

5.2 Liaison « Livraison » / « Poste Sud-Est ».

On veut travailler sur le câble de liaison entre le poste de livraison et le poste satellite Sud-Est.

- 5.2.1 Indiquez les deux appareils à manoeuvrer.

Ces deux appareils sont condamnables en manoeuvre et en mise à la terre au moyen de clefs.

Un point noir indique une clef présente, un point blanc une clef absente et deux points (noir et blanc) une clef présente mais prisonnière en l'absence de la deuxième.

- 5.2.2 Indiquez les manoeuvres à réaliser pour séparer le câble et le mettre à la terre.

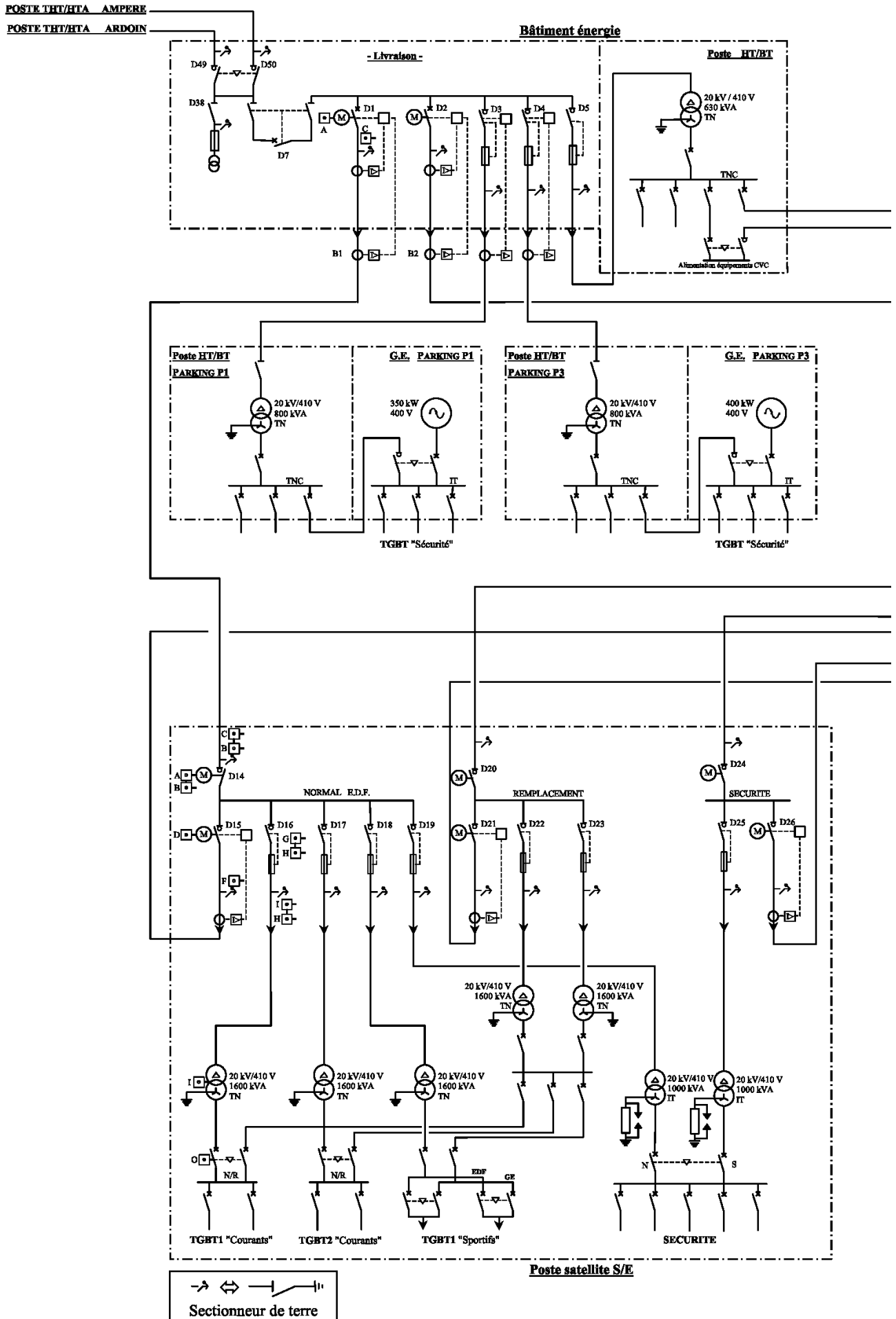
5.3 Dimensionnement des cellules.

- 5.3.1 En considérant les puissances apparentes des transformateurs abaisseurs, quelle est la puissance installée Sino dans le poste satellite Nord Ouest ? Et Sise pour le poste Sud Est ?
- 5.3.2 Déduisez en le courant maximal I_{max} pouvant traverser les cellules de la boucle normale surlignée en vert.
- 5.3.3 Les cellules installées sur cette boucle ont un courant assigné $I_{sn}=400A$, sont-elles compatibles avec le fonctionnement maximal du stade ?
- 5.3.4 Qu'en est-il de la cellule D7 ?

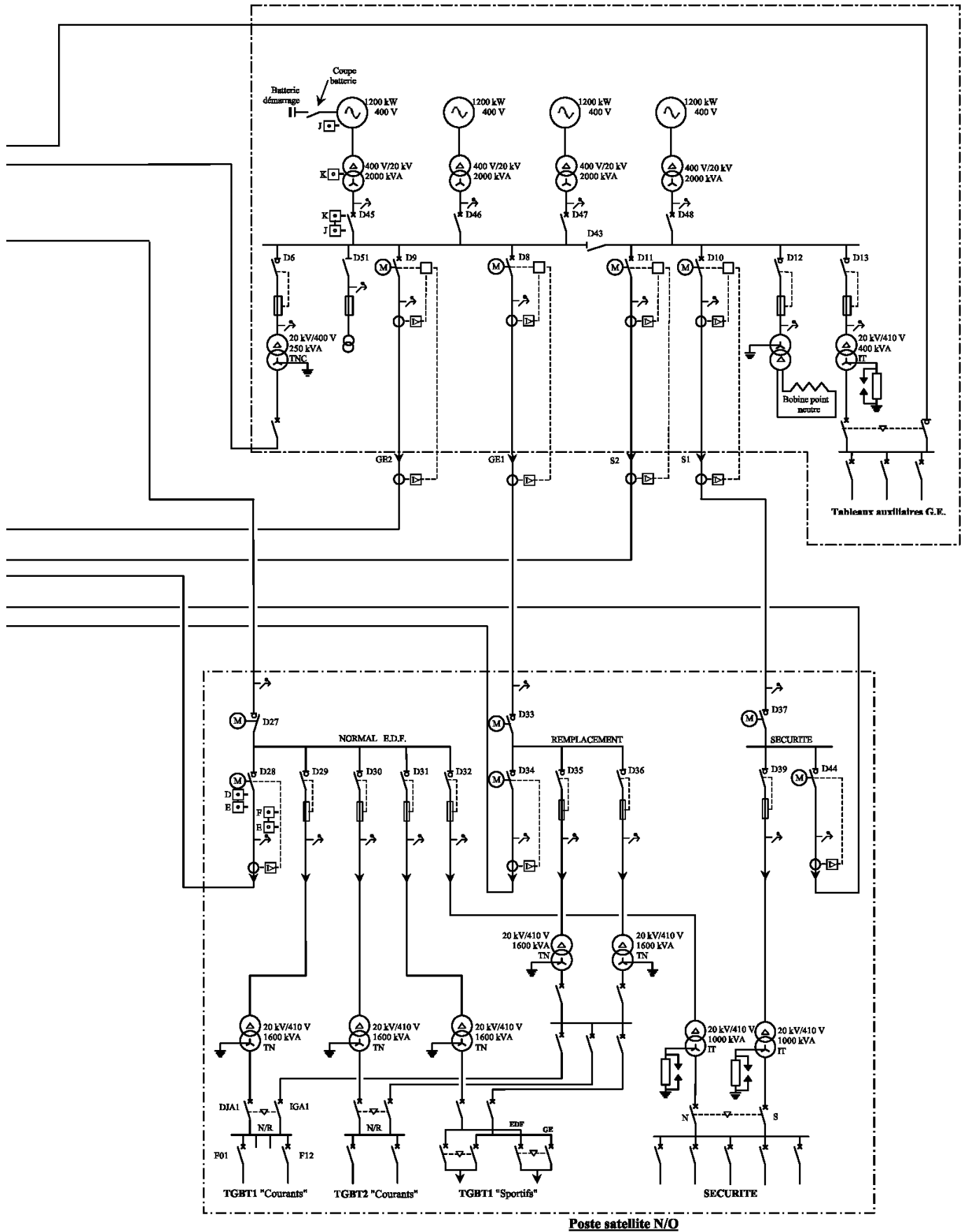
5.4 Centrale GE.

- 5.4.1 Combien vaut la puissance active nominale P_n fournie par un groupe électrogène ?
- 5.4.2 Combien vaut la puissance apparente nominale S_n du transformateur chargé d'élever la tension fournie par ce groupe électrogène ?
- 5.4.3 Les groupes électrogènes peuvent fournir de l'énergie réactive, quelle puissance réactive maximale peuvent-ils fournir sans endommager le transformateur auquel ils sont raccordés en fonctionnement nominal ?
- 5.4.4 Quel est le facteur de puissance correspondant ?

¹ Extrait du concours général 1999.

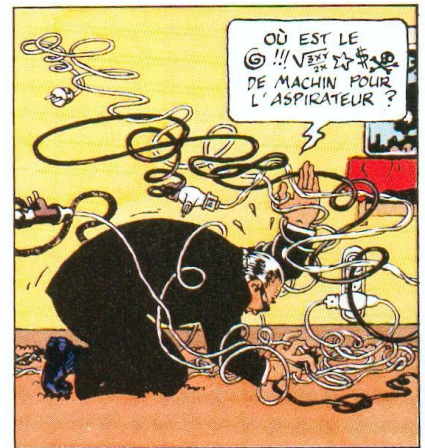


Centrale G.E. - Bâtiment énergie



(Notes)

Distribution BT



(Notes)

1 Introduction

1.1 Présentation.

Le problème de la conception d'une installation est le premier qui se présente à l'électricien.

Dans ce document nous allons aborder les principaux problèmes posés à savoir :

Choix ou justification d'une structure.

Bilan des puissances véhiculées.

Choix des lignes et câbles.

Influence de ce choix.

1.2 Sources.

1.2.1 Normes.

Ce document a été écrit en se référant à la norme qui fait foi dans le domaine : la **NFC 15-100**¹.

Les nombres précédés du signe § entre parenthèses indiquent le paragraphe auquel il est fait référence.

1.2.2 Constructeurs.

Pour rester en liaison avec le monde professionnel, l'organisation de ce document est aussi inspirée des documentations techniques des constructeurs suivants :

Schneider : <http://merlingerin.schneider-electric.fr/#>

Hager : <http://catalogue.hager.fr/>

Socomec : <http://www.socomec.fr/>

Sur chacun de ces sites, en fouillant un peu, vous pourrez découvrir des cahiers techniques synthétisant les grands problèmes de la distribution électrique basse tension. Ce sont des approches professionnelles différentes qui méritent le détour.

2 Structure. (§ 314)

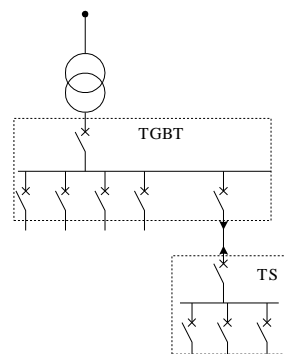
2.1 Arborescence.

La **structure radiale** ou dite en peigne est la plus fréquemment choisie car elle permet d'assurer une **sélectivité horizontale** (en cas de défaut sur un circuit, il est seul isolé).

Cependant, la multiplication des circuits entraîne un volume de cuivre important.

C'est pour cette raison que les circuits sont en principe regroupés géographiquement en tableaux secondaires alimentés par un tableau général basse tension ou TGBT.

On parle alors de **structure arborescente**.



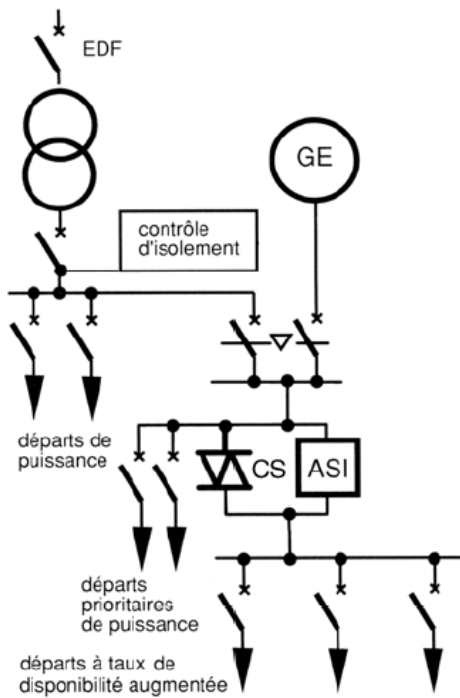
2.2 Continuité de service².

La continuité de service peut être un impératif dans certains cas. En fonction de la sensibilité des récepteurs aux perturbations de tension, plusieurs solutions sont envisageables.

L'installation ci-contre est alimentée « normalement » par le réseau EDF, via le transformateur HTA/BT.

¹ La NFC 15-100 est la norme qui donne les règles concernant les installations basse tension.

² [\(Voir à ce propos le cahier technique Schneider n°148\).](#)



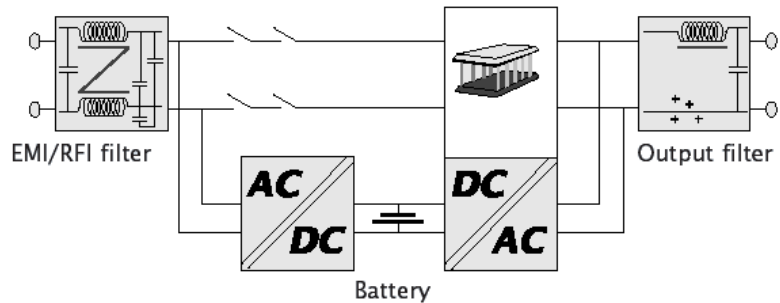
- 1 batterie,
- 1 chargeur AC/DC,
- 1 onduleur DC/AC
- 1 logique de commutation,
- 2 filtres : entrée et sortie.

En cas de disparition de ce réseau de distribution ou en cas de problème au niveau du départ principal, le **groupe électrogène GE** se met en route et les **circuits prioritaires** sont alimentés par celui-ci tandis qu'on **déleste** les **circuits non prioritaires**.

Le passage de normal à secours peut durer quelques secondes pour tenir compte du temps de démarrage du groupe thermique.

Si ce délai est trop important pour les circuits prioritaires³, on a alors recours à l'utilisation des **alimentations sans interruption (ASI)** généralement constituées d'**onduleurs**.

Classiquement, une alimentation sans interruption statique se compose des éléments suivants :



En mode normal, l'onduleur alimente l'application avec le secteur, simplement filtré mais sans aucune conversion d'énergie. Son principe de fonctionnement est séquentiel (sur secteur/sur batterie). En cas de coupure, de baisse ou hausse de tension, l'onduleur puise son énergie dans la batterie pour fournir une énergie stabilisée.

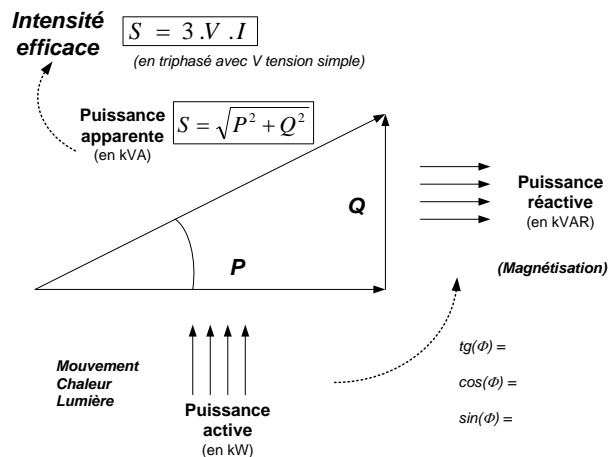
3 Bilan des puissances.

3.1 Boucherot.

3.1.1 Couple PQ.

Pour une **puissance active** demandée par l'utilisateur (mouvement, chaleur, lumière ...), certains récepteurs ont besoin d'absorber en plus de la **puissance réactive** afin de magnétiser des enroulements (moteur, bobine, ballast etc ...).

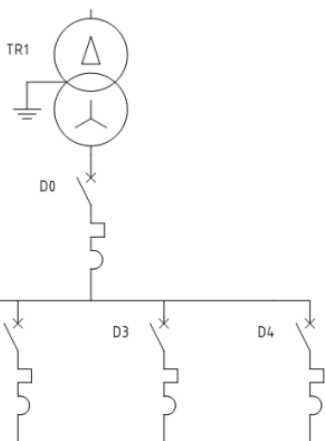
C'est le courant efficace qui permet de dimensionner les composants d'un circuit, il faut donc déterminer la **puissance apparente S** à partir de toutes les puissances actives et réactives pour calculer I.



³ Salle informatique, chaîne de production etc ...

3.1.2 Théorème de Boucherot.

La **puissance de dimensionnement ou apparente** est calculée à l'aide du **théorème de Boucherot**⁴. Celui-ci énonce que dans le cas des installations absorbant des courants sinusoïdaux⁵ sur plusieurs circuits :



$$P_0 = P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

et

$$Q_0 = Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

On peut alors calculer la puissance apparente totale $S_0 = S_{tot}$:

$$S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2}$$

Et donc :

$$I_{tot} = \frac{S_{tot}}{3 \cdot V}$$

IL EST FAUX D'ENONCER DE MANIERE GENERALE QUE :

$$\mathbf{I_{TOT} = \Sigma(I) \dots}$$

On remarque que la puissance apparente est appelée puissance de dimensionnement car elle représente "réellement" le courant absorbé par une installation !!!

3.2 Evaluation des puissances.

Faire absolument les exercices d'application proposés en TD !!!

3.2.1 Types de récepteurs.

On peut regrouper les récepteurs classiques en quatre grands types :

Exemple	Puissances ...			Type
	Active : P (utile)	Réactive : Q (magnétisante)	Apparente : S (dimensionnement)	
Four, chauffage éclairage incandescent	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	Q = 0	S = P	Non déphasant,
	$P = V \cdot I$			
Moteur, transformateur ...	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	Déphasant,
	$P = V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$	$Q = V \cdot I \cdot \sin(\varphi)$		

Ces différents types de récepteurs ou de charges seront mis en évidence lors des séances d'essais de systèmes. Ils ont cependant été rencontrés dans votre scolarité antérieure.

3.2.2 Coefficients correcteurs.

La **puissance d'utilisation** est déduite de la puissance maximale pouvant être demandée en y affectant plusieurs coefficients ou facteurs correcteurs :

$k_u < 1$ facteur d'utilisation maximale par récepteur,

C'est le « rapport de la puissance effectivement absorbée par un appareil d'utilisation à sa puissance nominale » (§ 216-1)

⁴ Paul Boucherot, ingénieur de l'ESPC (1863-1943).

⁵ Si le courant n'est pas sinusoïdal, la formule devient : $S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2 + D_{tot}^2}$
Avec D_{tot} la puissance déformante totale au point considéré ...

$k_s < 1$ facteur de simultanéité par tableau,

C'est le « rapport de la somme des puissances nominales des appareils susceptibles de fonctionner simultanément à la somme des puissances nominales de tous les appareils alimentés par le même circuit ou la même installation ». (§ 216-2)

Pour information (guide UTE 15 105), en l'absence d'indication, il est possible d'évaluer k_s en se reportant au tableau ci-dessous :

Nombre de départs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9<
$k_s =$	1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6

$k_a > 1$ **facteur d'accroissement** prévisible, il dépend directement du cahier des charges.

Ces facteurs s'appliquent aux puissances actives et réactives.

La **puissance installée** est la somme de toutes les puissances apparentes (S en kVA) nominales de l'installation. C'est une grandeur fictive qui n'a de valeur qu'estimative ...

3.3 Puissance et énergie réactive. (voir TD).

Un site intéressant concernant la compensation d'énergie réactive :

<http://www.alpestechnologies.com>

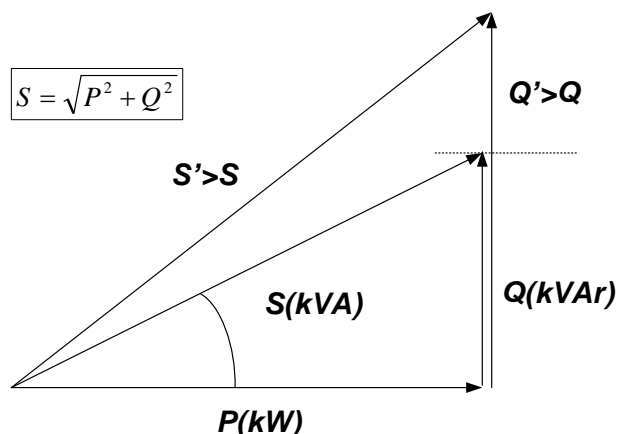
3.3.1 Problèmes posés.**Problème 1 :**

Dans une installation, pour une puissance active demandée P constante, la puissance apparente S varie dans le même sens que la puissance réactive Q :

« plus Q est élevée, plus S l'est ! »

Or, la puissance apparente, qu'on appelle aussi la puissance de dimensionnement sert à déterminer le courant d'emploi I_B .

Ce courant permet alors de choisir : le transformateur de tête, la section des conducteurs, les appareils de protection.



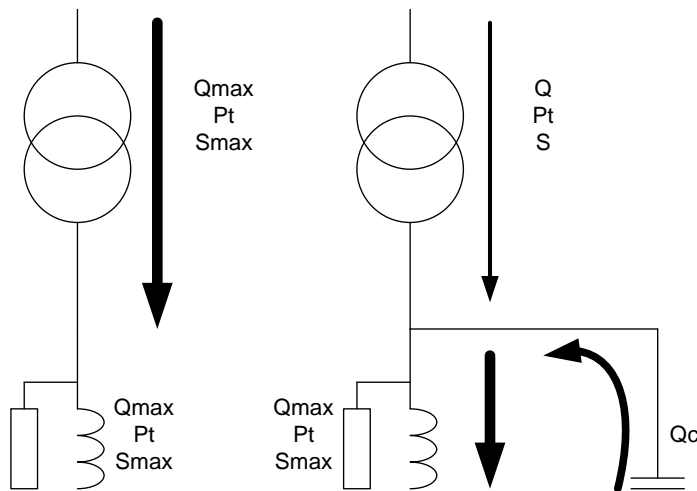
Tous ces arguments montrent que la puissance réactive doit être limitée.

Puissance apparente $\nearrow \Rightarrow$ Intensité $\nearrow \Rightarrow$ Section $\nearrow \Rightarrow$ € $\nearrow \dots$

Problème 2 :

En tarif vert et lors de certaines périodes d'hiver, l'énergie réactive fournie par EDF est facturée au-delà d'un seuil (40% de l'énergie active). Il est donc nécessaire dans ces périodes de ne pas dépasser le seuil afin d'éviter de payer des **pénalités**.

3.3.2 Solution.



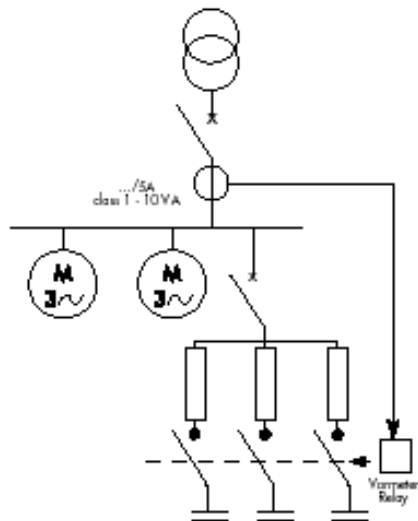
La solution bien connue consiste à installer des condensateurs.

En effet, un condensateur alimenté en alternatif a la capacité de fournir de la puissance réactive⁶.

La zone **compensée** se situe donc en amont des condensateurs tandis que la partie en aval reste « réactive ».

3.3.3 Compensation automatique.

Comme les charges d'une installation sont rarement constantes, il faut s'adapter à l'absorption de réactif. On utilise alors des batteries de condensateurs.



Une **batterie** de condensateurs est constituée de plusieurs **gradins** de condensateurs généralement commutés en fonction de la puissance réactive à fournir.

Cela évite de surcompenser une installation, ce qui provoquerait les mêmes inconvénients que précédemment.

Les condensateurs sont généralement montés en triangle en triphasé⁷. Dans ce cas⁸, $Q_c = 3 \cdot C \cdot \omega \cdot U^2$.

Les condensateurs sont généralement donnés en kVAR, exemple :

Une batterie triphasée de 9 kVAR avec une tension nominale de 400 V / 50 Hz est donc constituée de 3 condensateurs montés en triangle de valeur capacitive :

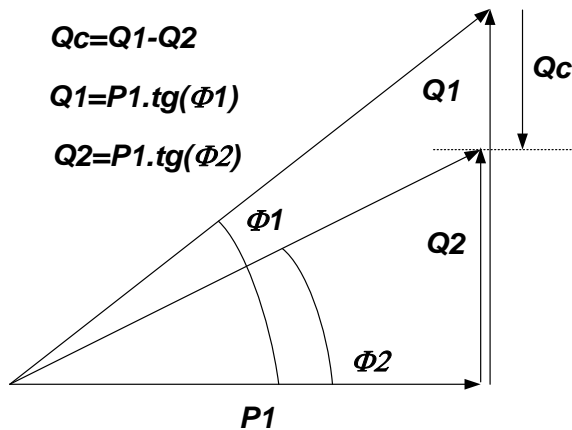
$$C = 9000 / (3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 400^2) = 59,7 \mu\text{F}$$

⁶ Contrairement aux récepteurs classiques qui en absorbent ...

⁷ ce qui permet de réduire leur valeur de capacité C en n'augmentant leur tension d'emploi U que d'un facteur racine de 3 ...

⁸ En monophasé avec une tension V le facteur 3 disparaît : $Q_c = C \cdot \omega \cdot V^2$

3.3.4 Détermination.

Problème 1 :

Si on connaît :

Le facteur $\text{tg}(\Phi_1)$ de l'installation à compenser ;

le facteur $\text{tg}(\Phi_2)$ à obtenir ;

la puissance active demandée P_1 ;
on calcule Q_c à l'aide la formule suivante :

$$Q_c > P_1 \cdot [\text{tg}(\Phi_1) - \text{tg}(\Phi_2)]$$

Problème 2 :

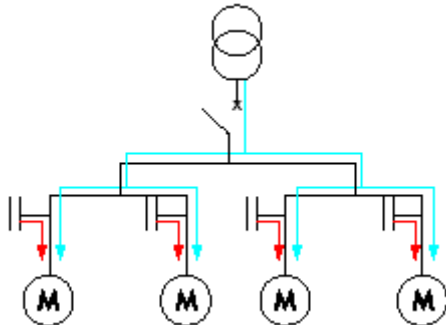
A partir de la facture on peut choisir la puissance des condensateurs Q_c de manière à ce que les condensateurs fournissent l'équivalent de l'énergie réactive facturée :

$$Q_c > \text{Erf} / \text{Tf}, \text{ avec :}$$

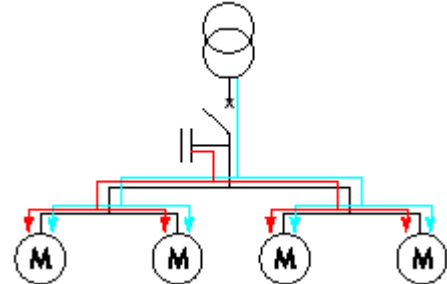
Erf l'énergie réactive facturée et
Tf le temps de fonctionnement.

3.3.5 Situation.

La partie compensée, où le courant est donc plus faible, se situe en amont de la batterie de condensateurs, selon le problème à résoudre on placera donc les condensateurs à des endroits différents ...



Cette installation doit se faire au plus près des récepteurs « gourmands » en énergie réactive lorsque la préoccupation est matérielle : section de câble, appareil de protection etc ...



Quand il s'agit d'éviter la facturation de l'énergie réactive il suffit d'installer une batterie de condensateurs en tête d'installation.

3.3.6 Consommateurs d'énergie réactive.

4 Canalisations.

4.1 Détermination des conducteurs.

4.1.1 Matériaux.

Les principaux **matériaux conducteurs** utilisés et leurs caractéristiques sont les suivants :

Matériaux	Prix ⁹	Résistivité	Masse	Avantage	Inconvénients
Cuivre (Cu)	4900 €/tonne	22,5 mΩ.mm ² /m	8,92 kg/litre	Faibles pertes	Lourd
Aluminium (Al)	1340 €/tonne	36 mΩ.mm ² /m	2,7 kg/litre	Léger	Résistif (pertes !)

Les principaux **types d'isolant** utilisés sont :

Isolant	Température max.
PVC Polychlorure de vinyle	70 °C
PR Polyéthylène réticulé	90 °C

4.1.2 Détermination de la section. (§ 523)

Le choix de la section d'un conducteur s'effectue en fonction du courant maximal admissible (c'est à dire n'entraînant pas la température maximale de fonctionnement). Il faut donc considérer le courant maximal pouvant circuler dans le câble.

Le courant d'emploi en régime permanent I_B permet de déterminer le calibre I_n (ou le réglage I_r) du disjoncteur¹⁰ de protection protégeant le câble. Le courant maximal admissible I_z doit donc être pris supérieur à ce calibre. (**voir tableau 52F en annexe**).

$$I_z > I_n$$

4.1.3 Facteur de correction.

Cependant, plusieurs paramètres peuvent ou doivent être pris en compte.

Si la température ambiante est élevée, 50 °C par exemple, le câble aura du mal à évacuer la chaleur et s'échauffera plus. On devra donc le surdimensionner.

Pour un isolant PVC, on applique un coefficient $K_3=0,71$ au courant I_z en calculant $I'_z=I_z \cdot K_3$ qui doit être supérieur au calibre.

$$I_z > I_n / K_3$$

Avant d'appliquer une formule il faut réfléchir à la valeur qu'on doit trouver : supérieure ou inférieure ...

Le mode de pose : si les conducteurs sont « mal ventilés », pose sous plafond par exemple, le problème est le même, il faut appliquer un coefficient $K_1=0,95$ et on obtient :

$$I_z > I_n / K_1$$

On se réfère donc à des tableaux indiquant les facteurs de correction à appliquer pour estimer le courant équivalent véhiculé I'_z par la canalisation

$$I'_z = I_n / (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots)$$

et $I_z > I'_z$

Coefficient K_1

le mode de pose :

voir tableaux

52 E, 52 F et 52 G.

⁹ Prix indicatif en juin 2014 ...

¹⁰ Lorsque la protection est assurée par des fusibles, un facteur de correction est appliqué au calibre.

Coefficient K2	groupement de circuit :	52 L et 52 M.
Coefficient K3	température ambiante différente de 30	52 J.

Les constructeurs ont repris ces tableaux en les simplifiant et en les adaptant aux besoins de leurs clients. Vous les retrouverez sous formes diverses chez chacun d'eux.

Le tableau qui suit provient du guide technique extrait du catalogue de Merlin Gerin (groupe Schneider).

Lettre de sélection

type d'éléments conducteurs	mode de pose	lettre de sélection
conducteurs et câbles multiconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> ■ sous conduit, profilé ou goulotte, en apparent ou encastré ■ sous vide de construction, faux plafond ■ sous caniveau, moulures, plinthes, chambranles 	B
	<ul style="list-style-type: none"> ■ en apparent contre mur ou plafond ■ sur chemin de câbles ou tablettes non perforées 	C
câbles multiconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> ■ sur échelles, corbeaux, chemin de câbles perforé ■ fixés en apparent, espacés de la paroi ■ câbles suspendus 	E
câbles monoconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> ■ sur échelles, corbeaux, chemin de câbles perforé ■ fixés en apparent, espacés de la paroi ■ câbles suspendus 	F

Facteur de correction K1

lettre de sélection	cas d'installation	K1
B	■ câbles dans des produits encastrés directement dans des matériaux thermiquement isolants	0,70
	■ conduits encastrés dans des matériaux thermiquement isolants	0,77
	■ câbles multiconducteurs	0,90
	■ vides de construction et caniveaux	0,95
C	■ pose sous plafond	0,95
B, C, E, F	■ autres cas	1

Facteur de correction K2

lettre de sélection	disposition des câbles jointifs	facteur de correction K2											
		nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20
B, C	encastrés ou noyés dans les parois	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38
C	simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,70		
	simple couche au plafond	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,61		
E, F	simple couche sur des tablettes horizontales perforées ou sur tablettes verticales	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72		
	simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78		

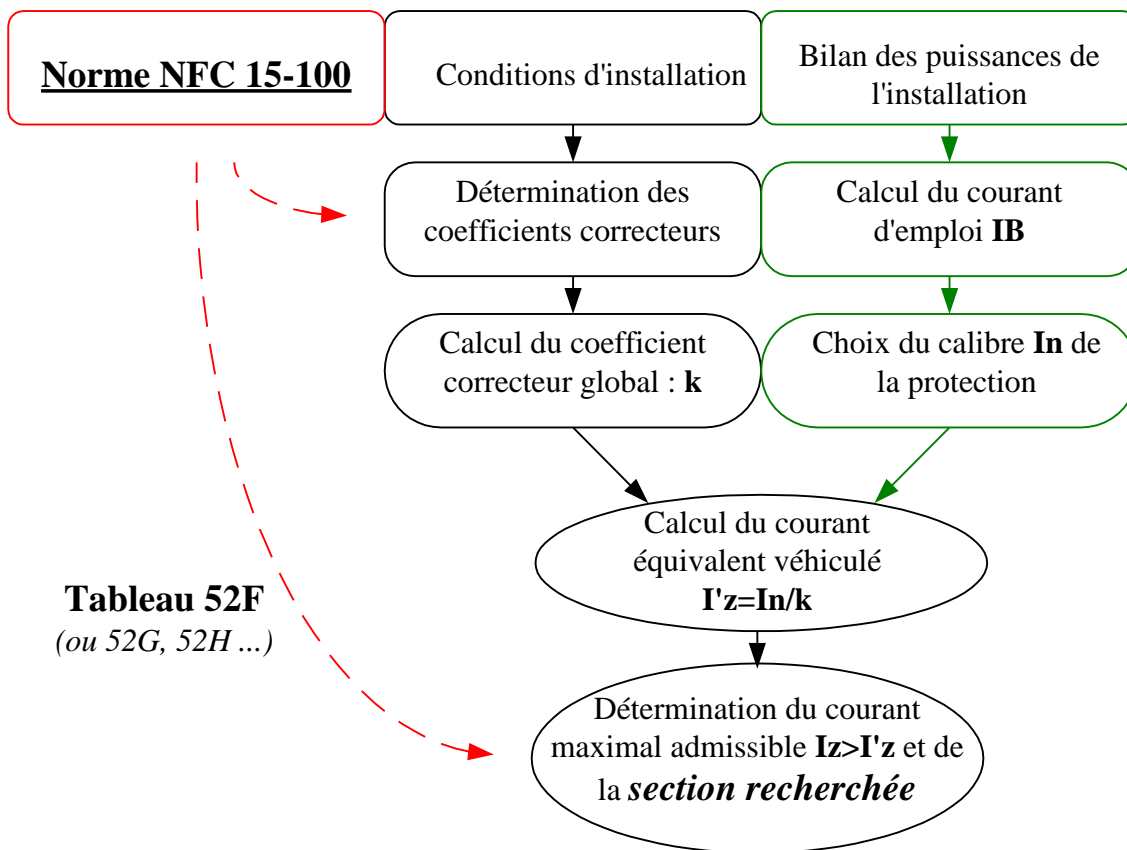
Lorsque les câbles sont disposés en plusieurs couches, appliquer en plus un facteur de correction de :

- 0,80 pour deux couches
- 0,73 pour trois couches
- 0,70 pour quatre ou cinq couches.

Facteur de correction K3

températures ambiantes (°C)	isolation		
	élastomère (caoutchouc)	polychlorure de vinyle (PVC)	polyéthylène réticulé (PR) butyle, éthylène, propylène (EPR)
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,93	0,96
40	0,82	0,87	0,91
45	0,71	0,79	0,87
50	0,58	0,71	0,82
55	–	0,61	0,76
60	–	0,50	0,71

La méthode proposée par les différents constructeurs peut alors se synthétiser comme suit :



Conclusion :

$$\underline{I_b < I_r < I_n < I'z < I_z}$$

4.1.4 Réduction du PE.

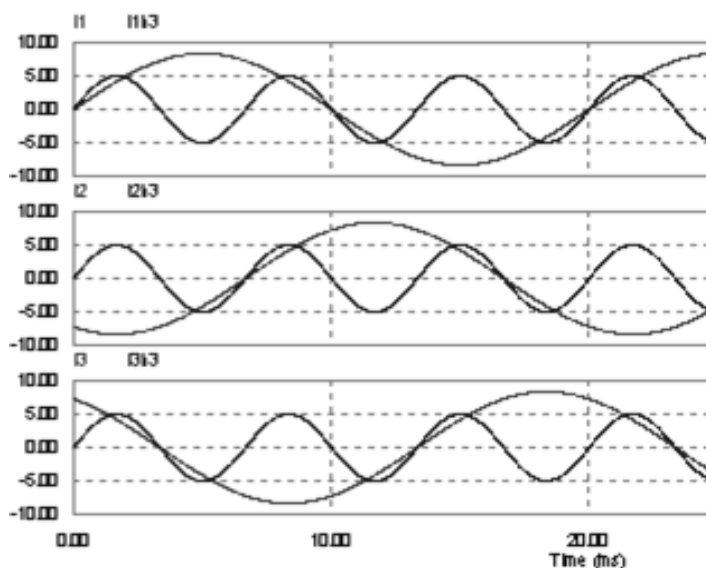
Les sections déterminées ci-dessus concernent le courant d'emploi qui est généralement véhiculé par les trois phases d'une canalisation. Cependant, le conducteur PE ne doit pas être dimensionné en fonction du courant d'emploi mais en fonction du courant de défaut pouvant s'établir et circuler avant qu'un dispositif de protection ne déclenche. Les conditions d'échauffement étant donc différentes, la NFC 15-100 autorise donc (§543-1-2) une réduction de sa section respectant le tableau ci-dessous.

Section des conducteurs de phase de l'installation	Section minimale du conducteur de protection
S (mm ²)	Sp (mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

4.1.5 Dimensionnement du conducteur « neutre ».

Si l'ensemble des récepteurs alimentés est équilibré et si le neutre est distribué, il peut alors être sous dimensionné. La norme NFC 15-100 autorise dans certains cas (§ 524) une réduction pouvant aller jusqu'à 50 % comme ci-dessus.

Attention !!! Ceci cesse d'être possible en présence d'harmoniques, notamment de rang 3.



L'ensemble de courbes ci-contre montre bien que les harmoniques de rang 3 d'un système de courants triphasé se retrouvent en phase et sont donc susceptibles de s'additionner dans le neutre ...

Le courant dans le neutre n'est donc pas nul et peut même être supérieur aux courants des phases ...

L'article 524, paragraphe 2 définit les règles de calcul du conducteur de neutre.

Taux d'harmoniques	Effets prévisibles
THDu < 5 % et THDi < 10 %	Néant
5 % < THDu < 8 % ou 10 % < THDi < 50 %	Pollution significative, effets nuisibles possibles
THDu > 8 % ou THDi > 50 %	Pollution forte, dysfonctionnements probables
Taux d'harmonique 3 en courant > 15 %	Courant non négligeable dans le conducteur neutre

Document Schneider.

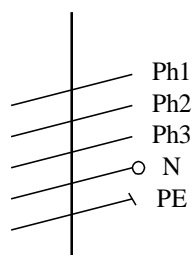
• pour des réseaux à taux d'harmoniques compris entre 15 % et 33 %, la norme impose une section de câble du neutre égale à la section de phase ; Mais un facteur de réduction de courant admissible de 0,84 doit être pris en compte pour l'ensemble des conducteurs : $S_n = S_{ph} = S_{ph0} \times 1/0,84$ (facteur de dimensionnement pour l'ensemble des conducteurs, par rapport à la section S_{ph0} calculée).

• pour des réseaux à taux d'harmonique supérieur à 33 %, la section du neutre sera calculée en tenant compte d'un facteur de 1,45 sur le courant d'emploi du circuit de phase. Le conducteur doit être surdimensionné pour un courant d'emploi égal à $1,45/0,84$ fois le courant d'emploi dans la phase¹¹.

Si l'installation est en câbles multipolaires, la section calculée du neutre s'applique à l'ensemble des brins. Si la distribution est en câble unipolaire, la section de phase peut être inférieure à la section du neutre.

4.2 Désignation.

4.2.1 Symboles.



Ce symbole représente de manière unifilaire un circuit triphasé avec neutre distribué et conducteur de protection.


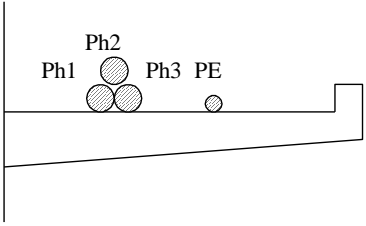
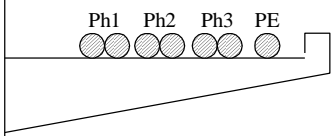
On trouve aussi les groupements suivants :

Monophasé => Ph + N + PE

Triphasé sans neutre => 3*Ph + PE.

¹¹ En fait, le facteur de correction de 0,84 précédent s'applique encore.

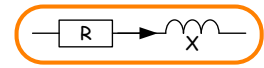
4.2.2 Représentation.

Appellation simplifiée	Coupe transversale	Multi ou mono ?
4G50	 Présence de PE	
$3*(1*150^2)+1*70^2$ Attention $70^2 \neq 70*70$ Il faut lire 70 mm^2		
$3*(2*1*150^2)+1*150^2$		

4.2.3 Modélisation.

Un conducteur présente une résistance R et une réactance X qui entraînent des pertes et des chutes de tension ...

Z est l'impédance qui représente le conducteur ...



$$Z^2 = R^2 + X^2$$

On peut calculer ces valeurs en utilisant les formules suivantes :

Pour la résistance : $R = \rho \cdot L/S$

avec $\rho =$ 18,5 < 22,5 < 28 m Ω .mm²/m pour le cuivre,
29,4 < 36 < 44 m Ω .mm²/m pour l'aluminium.

L est la longueur et S la section du conducteur.

En ce qui concerne la réactance, elle dépend essentiellement de la longueur et du nombre de conducteurs en parallèle :

$$X = x \cdot L/n$$

x est la réactance linéique¹², comprise entre 0,08 et 0,13 m Ω /m.

n est le nombre de conducteurs en parallèle et L la longueur.

Faire les exercices de base correspondants !!

4.2.4 Appellations.

Deux codes sont actuellement en vigueur :

le code traditionnel UTE

le code harmonisé CENELEC qui remplace le précédent.

Ces deux codes sont complexes car ils doivent définir complètement le câble.

Exemple : AR02V => conducteur aluminium,

isolant PR sans bourrage mais avec gaine de protection en PVC.

¹² Pour $S < 50 \text{ mm}^2$, on peut négliger la réactance.

4.3 Chute de tension. (§ 525).

4.3.1 Problème posé.

Toute canalisation présente une impédance qui, bien que très faible, peut s'avérer ne pas être négligeable vis-à-vis du processus qu'elle alimente.

En fonctionnement nominal (circulation du courant I_b) il apparaît alors une chute de tension entre les deux extrémités de cette canalisation.

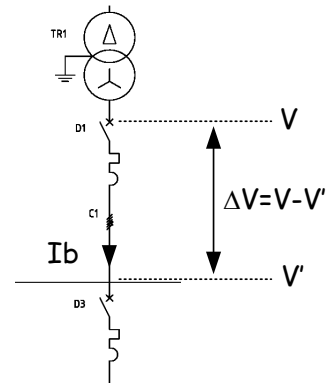
Cette chute de tension peut être préjudiciable :

aux récepteurs qui la provoquent

(non démarrage d'un moteur sous-alimenté par exemple),

aux récepteurs alimentés par la même canalisation

(partie commande par exemple).



4.3.2 Détermination.

Si une phase de la canalisation présente une résistance R et une réactance X alors :

$$\Delta V = 2 \cdot [R \cdot \cos(\varphi) + X \cdot \sin(\varphi)] \cdot I_B \text{ entre phase et neutre en monophasé,}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot [R \cdot \cos(\varphi) + X \cdot \sin(\varphi)] \cdot I_B \text{ entre phases en triphasé équilibré.}$$

$$\Delta V = [R \cdot \cos(\varphi) + X \cdot \sin(\varphi)] \cdot I_B \text{ entre phase et neutre en triphasé équilibré.}$$

En valeur relative,
$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V \cdot 100}{V} \text{ ou } \Delta U(\%) = \frac{\Delta U \cdot 100}{U}.$$

Ces valeurs sont exprimées par rapport à la valeur de la tension nominale de l'installation, il s'agit de valeurs maximales à ne pas dépasser !

Remarque n°1 : pour la détermination de la chute de tension ΔU aux bornes d'un tronçon composé de deux canalisations différentes, on additionne généralement les valeurs intermédiaires trouvées $\Delta U1$ et $\Delta U2$ sans prendre en compte le déphasage possible entre les deux : $\Delta U = \Delta U1 + \Delta U2$.

Remarque n°2 : parfois ces formules sont données avec les résistances et réactances linéiques de la canalisation ou pour 100 mètres de canalisation ... Il suffit alors de multiplier par la longueur L ou par $L/100$.

Remarque n°3 : parfois les constructeurs fournissent des tableaux permettant d'éviter les calculs ci-dessus. Voir l'exemple suivant extrait du guide technique du catalogue Hager.

Ce tableau ci-contre donne la valeur de la chute de tension entre phase et neutre « v » en volt dans un conducteur de 100 m parcouru par un courant d'intensité 1 A et pour un réseau triphasé 400 V.

$$\Delta V = \ll v \gg \cdot I_b \cdot L / 100 \text{ en volt}$$

$$\Delta V / V = \ll v \gg \cdot I_b \cdot L / (100 \cdot V) \text{ en \%}$$

Section en mm ²	Cuivre (Cu)		Aluminium	
	Cos(Φ)		Cos(Φ)	
	0,8	1	0,8	1
1,5	1,2	1,5	1,92	2,4
2,5	0,72	0,9	1,16	1,44
4	0,45	0,56	0,73	0,9
6	0,3	0,38	0,48	0,6
10	0,18	0,23	0,29	0,36

4.3.3 Valeur normative.

La chute de tension en régime permanent ne doit pas excéder les valeurs données ci-dessous :

Type d'alimentation	Eclairage	Autres usages
Directement en basse tension	3%	5%
Transformateur HT/BT	6%	8%

5 Annexes.**5.1 Tableau 52F.**

TABLEAU 52 F

Courants admissibles (en ampères) dans les canalisations pour les méthodes de référence B, C, E et F

*PR et PVC indiquent le type d'isolant**2 indique un circuit monophasé**3 indique un circuit triphasé*

MÉTHODE DE RÉFÉRENCE	ISOLANT ET NOMBRE DE CONDUCTEURS CHARGÉS								
	B	PVC 3	PVC 2		PR 3		PR 2		
C		PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2		
E			PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2	
F				PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2
S (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CUIVRE									
1,5	15,5	17,5	18,5	19,5	22	23	24	26	
2,5	21	24	25	27	30	31	33	36	
4	28	32	34	36	40	42	45	49	
6	36	41	43	48	51	54	58	63	
10	50	57	60	63	70	75	80	86	
16	68	76	80	85	94	100	107	115	
25	89	96	101	112	119	127	138	149	161
35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
50	134	144	153	168	179	192	207	225	242
70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
95	207	223	238	258	278	298	328	352	377
120	239	259	276	299	322	346	382	410	437
150		299	319	344	371	395	441	473	504
185		341	364	392	424	450	506	542	575
240		403	430	461	500	538	599	641	679
300		464	497	530	576	621	693	741	783
400						754	825		940
500						868	946		1083
630						1005	1088		1254

Les valeurs dans le tableau sont celles du courant maximal admissible I_z dans le conducteur défini

Les valeurs de courant figurant dans ce tableau sont les valeurs du courant maximal admissible **I_z** dans le conducteur défini par : sa section, la méthode de référence, le type de circuit et l'isolant.

On doit avoir : $I_z > I'z$ (courant équivalent véhiculé)

Remarques : Pour une même section I_z va du simple au double en fonction du mode de pose et de l'isolant ...
 $S = 35 \text{ mm}^2 \Rightarrow 110 \text{ A} < I_z < 200 \text{ A}$ (à méditer ...)

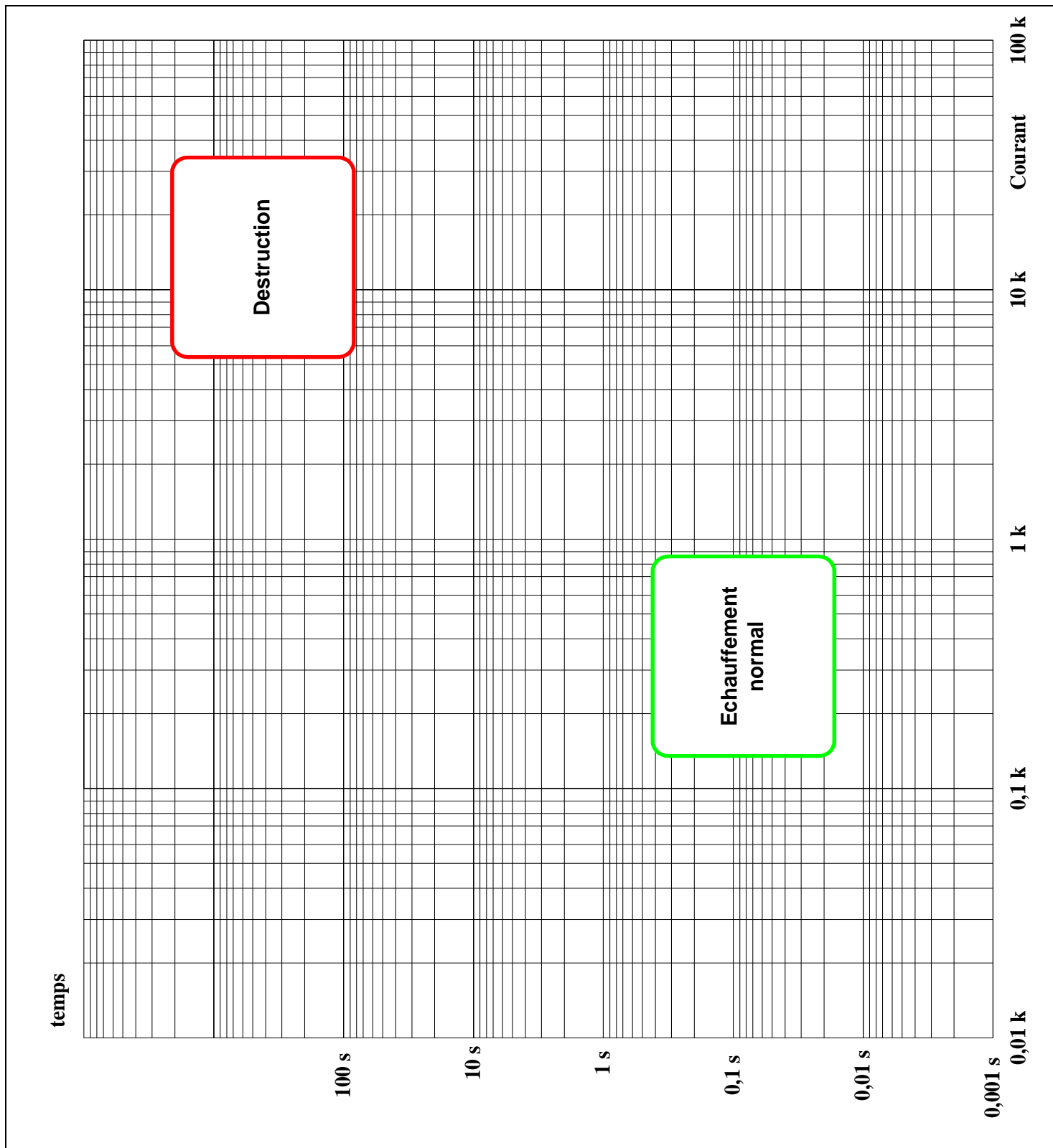
On peut remarquer que la densité surfacique de 5 A/mm^2 qu'on utilise couramment n'est pas valable pour l'ensemble des sections ...

5.2 Contrainte dans un conducteur.

La contrainte thermique d'un conducteur et de son isolant détermine deux zones :
Echauffement normal et destruction ...

Tracez l'allure de la caractéristique d'un conducteur de section 70 mm^2 , ayant un courant maximal admissible $I_z = 200 \text{ A}$ et une contrainte thermique $k^2 S^2 = 65,3 \text{ (kA)}^2 \cdot \text{s}$, ce qui signifie que :

Si $I^2 \cdot t < 65,3$ l'échauffement est normal ...
avec I en kilo-Ampère et t en seconde



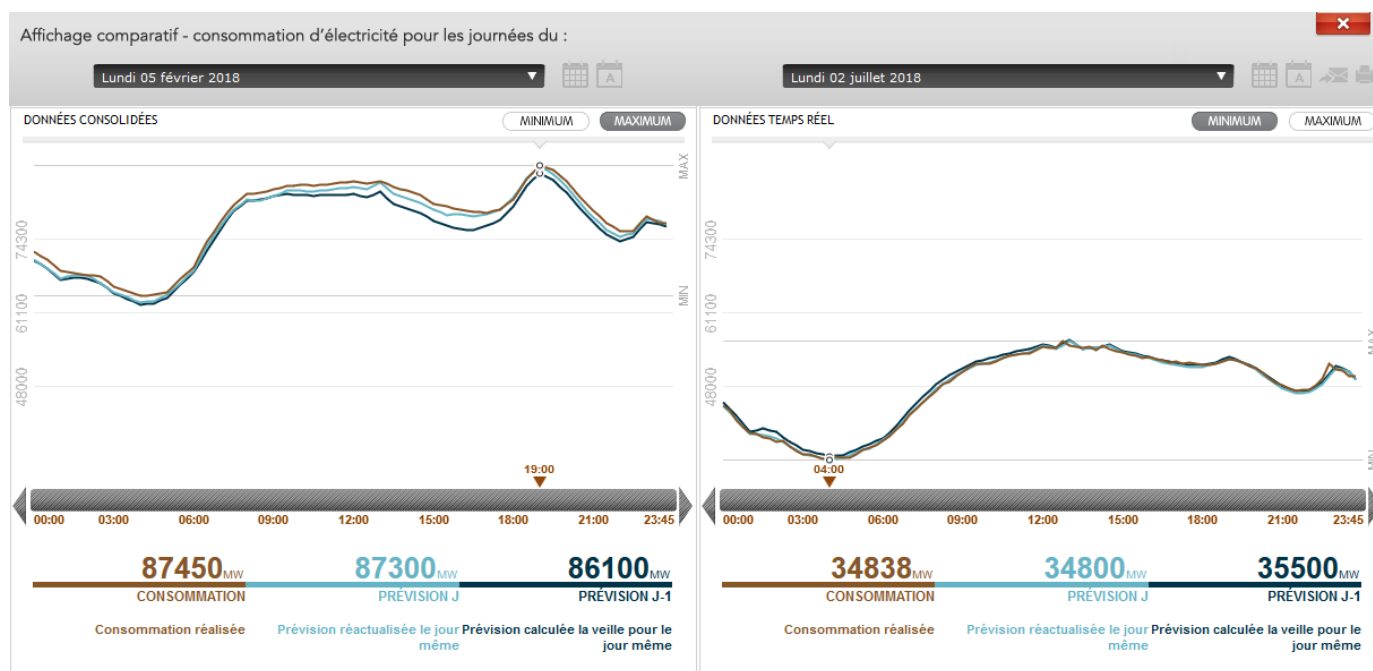
Tarification HTA & BT



(Notes)

1.2.2 Cycle journalier.

La demande fluctue également au cours de la journée.



Copie d'écran RTE

Les pointes de consommation, bien que prévisibles (il fait plus froid en février qu'en août !), surviennent à des dates difficilement localisées, car elles résultent soit de vagues de froid, soit d'événements les plus divers.

Pour toutes ces raisons EDF et RTE doivent posséder et entretenir des équipements ne fonctionnant que quelques heures par an. Ils **incitent donc les usagers à réduire leur consommation lors des pointes** en proposant pour les différents tarifs de nombreuses options visant à dissuader les usagers de consommer de l'électricité lorsque la demande est la plus forte.

(Revoir les cours antécédents sur les moyens de production ...)

1.3 Principes généraux.

Le kWh produit au cours d'une journée de pointe en hiver mobilisera les moyens de production les plus coûteux (centrales thermiques essentiellement), ce qui sera répercuté dans sa facturation. Pour éviter l'utilisation de ces moyens de production, EDF et RTE ont mis en place des dispositions tarifaires de plus en plus complexes qui prennent en compte les possibilités d'effacement des clients.

L'ensemble de ces dispositions incite les utilisateurs à **adapter leur besoin en puissance et en énergie aux périodes les plus favorables pour le bon fonctionnement du réseau de transport et des producteurs d'énergie.**

Les clients peuvent choisir l'option qui est la mieux adaptée à leurs caractéristiques de consommation, en particulier à leurs possibilités de modulation tout au long de l'année.

En tarif réglementé le choix entre les catégories se fait en principe en fonction des besoins de puissance² du client :

- puissance < à 36 kVA en BT : ex tarif Bleu
- puissance > à 36 kVA en BT : ex tarif Jaune
- puissance > à 36 kVA en HTA : ex tarif Vert.

² Remarque : kVA et non de kW attention ...

2 Particuliers < 36 kVA : tarif bleu.

2.1 Tarif réglementé.

2.1.1 Tarification binôme.

Il y a deux éléments de tarification :

une **prime fixe**³ qui est fonction de la **puissance souscrite** en kVA,
le prix des kWh consommés ou **consommation**.

La puissance souscrite (en kVA) dépend des besoins du client.

Précision importante !

Quel que soit le fournisseur d'énergie, pour les puissances < 36 kVA la partie acheminement est généralement intégrée dans l'abonnement et dans le prix du kWh, le client n'a alors pas accès au détail.

2.1.2 Option "Heures Creuses"

Il est possible de souscrire l'option "Heures Creuses" pour les abonnements supérieurs à 3 kVA. Avec cette tarification les **consommations en heures creuses** (8 heures par jour) sont facturées à prix réduit, mais la **prime fixe** est plus élevée.

Option Base (TTC)		
Puissance Souscrite (kVA)	Abonnement mensuel (€ TTC/mois)	Prix du kWh (cts € TTC/kWh)
3	5,74	15,55
6	8,92	14,67
9	10,42	14,83
12	11,96	14,83
15	13,50	14,83
18	15,27	14,83
24	18,41	14,83
30	21,79	14,83
36	24,46	14,83

Option Heures Creuses (TTC)			
Puissance Souscrite (kVA)	Abonnement mensuel (€ TTC/mois)	Prix du kWh (cts € TTC/kWh)	
		Heures Pleines	Heures Creuses
6	10,06	15,93	12,44
9	12,25	15,93	12,44
12	14,26	15,93	12,44
15	16,12	15,93	12,44
18	17,83	15,93	12,44
24	21,84	15,93	12,44
30	23,53	15,93	12,44
36	26,39	15,93	12,44

☐ Suite à une décision des pouvoirs publics (Arrêté du 12 août 2010 relatif aux tarifs réglementés de vente de l'électricité), les puissances de 18 à 36 kVA inclus de l'option Base du Tarif Bleu pour les clients résidentiels ont été mises en extinction et ne sont plus disponibles à la souscription.

(EDF février 2018)

2.1.3 Option TEMPO.

Cette option est proposée aux abonnés BT « soucieux de maîtriser leur consommation d'électricité » en **adaptant celle-ci aux coûts de production de l'électricité.**

L'année a été décomposée en :

300 jours bleus (coût de l'électricité faible).

43 jours blancs

22 jours rouges (coût de l'électricité élevé).

Chaque jour est décomposé en deux **périodes tarifaires** :

16 heures pleines.

8 heures creuses.

La couleur du jour, le type d'heures et (à partir de 20 heures) la couleur du jour suivant sont signalés sur le compteur (électronique).

³ On parle aussi d'abonnement.

		Option Tempo (TTC)					
Puissance Souscrite (kVA)	Abonnement mensuel (€ TTC/mois)	Prix du kWh (cts € TTC/kWh)					
		Bleu HC	Bleu HP	Blanc HC	Blanc HP	Rouge HC	Rouge HP
9	11,95	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82
12	13,90	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82
15	14,60	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82
18	15,84	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82
30	22,35	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82
36	25,49	11,13	13,27	13,47	16,29	17,47	54,82

(EDF février 2018)

Le prix du kWh dépend donc de la couleur du jour et du type d'heures.

2.1.4 Comptage.

Le compteur d'énergie sera monophasé ou triphasé selon le type d'alimentation.

Pour les clients ayant souscrit une option heures creuses, EDF pose un compteur d'énergie qui comporte 2 écrans pour différencier les consommations.

En option HC, il indiquera l'énergie consommée en heures pleines et en heures creuses.

2.1.5 Délestage.

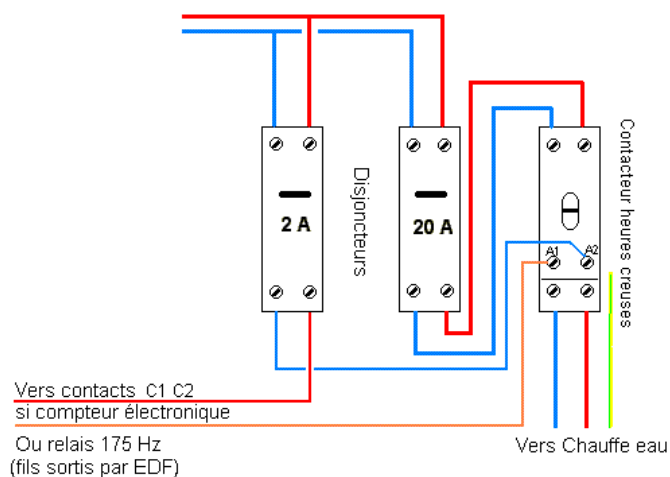
Pour bénéficier pleinement des périodes où l'énergie est moins chère, il est impératif d'adapter automatiquement sa consommation aux plages horaires correspondantes.

Deux contacts E (production d'eau chaude par ballon à accumulation) et C (chauffage électrique) sont accessibles sur le compteur électronique, le tableau suivant indique selon le programme choisi, la couleur du jour et le créneau horaire l'état du contact eau chaude.

Contact C1/C2 :

Programmes CHAUFFE-EAU	BLEU		BLANC		ROUGE	
	HEURES CREUSES	HEURES PLEINES	HEURES CREUSES	HEURES PLEINES	HEURES CREUSES	HEURES PLEINES
EAU 1	■	■	■		■	
EAU 2	■	■	■		■	
EAU 3	■	■	■	■	■	

■ Période où le fonctionnement des appareils asservis est possible (contact fermé).



2.2 Offres du marché.

2.2.1 Déréglementation.

A partir du 1 janvier 2016, les tarifs réglementés historiques vert et jaune ont disparu et ont été remplacés par des tarifs en « offre de marché ». Depuis, chaque entreprise consommatrice doit souscrire un contrat avec un fournisseur de son choix pour l'acheminement et la fourniture de l'énergie.

Il est nécessaire de faire attention aux éléments suivants :

- vérifier si l'offre inclut ou non l'acheminement ;
- comparer les prix sur une même base (soit hors toutes taxes, soit hors TVA, soit TTC) ;
- tenir compte de l'évolution des prix : prix fixe ou variable, choix des variables d'indexation, etc. ;

- considérer la période d'engagement et les pénalités éventuelles en cas de résiliation anticipée ;
- tenir compte des modalités de facturation et de paiement proposées ;
- analyser les services proposés : interlocuteur dédié, modalités de contact, gestion pour les contrats multi-sites, services d'efficacité énergétique, offres « vertes », etc.

Source CRE in GuideElectriciteSuppressionTRVCC

2.2.2 Prix.

Il faut distinguer deux types de prix⁴ :

Les tarifs indexés qui suivent les tarifs réglementés en restant 5 à 10 % inférieurs.
(économies certaines !).

Les tarifs fixes (indépendants donc des TRV).

(économies dans le cadre actuel de hausse des prix de l'énergie ...).

2.2.3 Origines.

En général le deuxième argument reste la promotion des énergies « vertes », « propres » ou « renouvelables »⁵. Ces offres s'appuient sur la garantie « qu'une quantité d'électricité d'origine renouvelable a été injectée dans le réseau, quelque part en Europe, à hauteur des quantités d'électricité consommées ».

Il s'agit donc généralement d'un acte militant. Certains privilégient alors les petits producteurs et l'économie locale (Enercoop ou Ilek) aux grands groupes comme Total.

2.2.4 Qualité de l'énergie.

ATTENTION, si vous avez bien suivi, vous savez que la qualité de l'énergie ou le service technique sont indépendants du fournisseur puisque tous les clients bénéficient du même gestionnaire du réseau de transport, RTE et du même gestionnaire du réseau de distribution, ENEDIS.

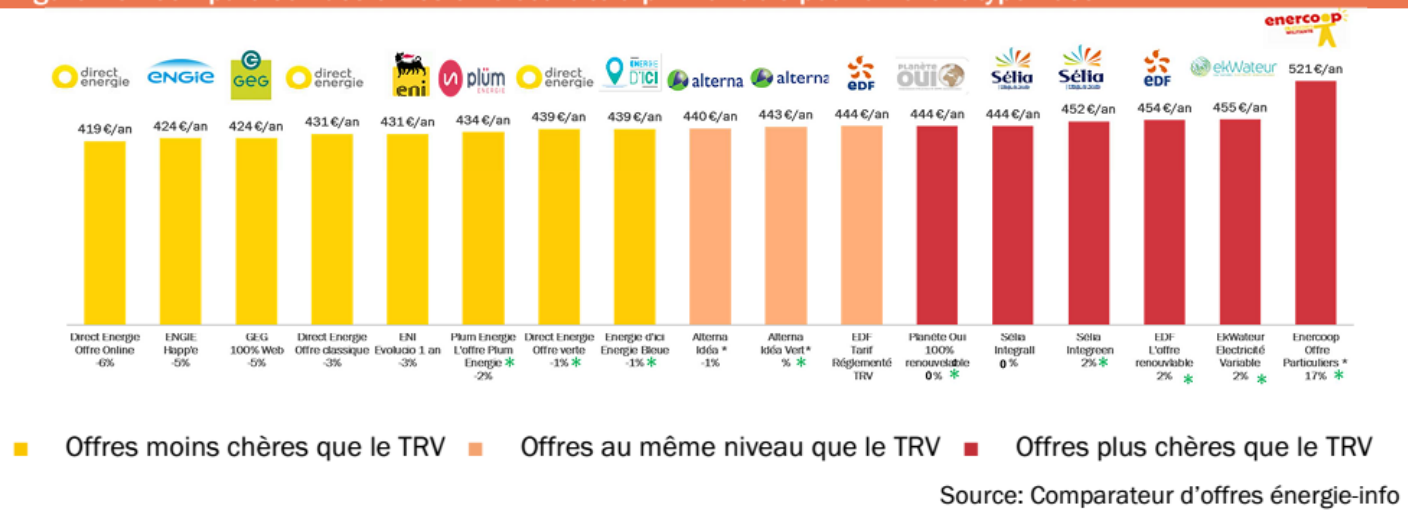
2.2.5 Services.

Il reste enfin la qualité de service client qui peut départager les différents fournisseurs : qualité de réponse, temps d'attente, proximité, engagement et frais divers ...

Dans tous les cas il est impératif de bien lire les termes des contrats !!

2.2.6 Comparatif.

Figure 16 : Comparaison des offres en électricité à prix variable pour un client type Base



⁴ En dehors des offres du tarif réglementé bien sûr !

⁵ Ces énergies représentent moins de 7% de l'énergie produite en France en 2017 ...

3 Clients > 36 kVA.

Il est impératif de compléter la lecture de cette partie du document par l'étude menée en TP sur la facturation de l'énergie électrique telle qu'elle est mise en oeuvre au Lycée du Dauphiné depuis 2016.

3.1 Structure du TURPE.

3.1.1 Eléments de tarification.

Les **composantes** de tarification sont au nombre de 8 :

CG	CC	CS	CMDPS	CER	CACS	CR	CI
Gestion	Comptage	Soutirage	Dépassement ²	Energie réactive	Secours ³	Regroupement	Injection

On peut regrouper les 5 premières⁶ comme suit :

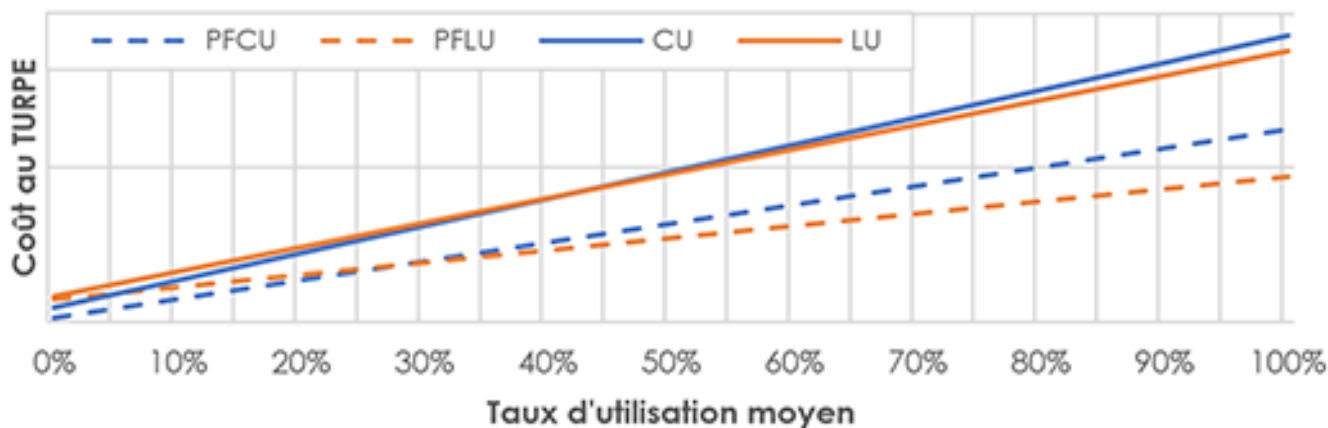
une **prime fixe** annuelle fonction de la (ou des) **puissance(s) souscrite(s)**, $CG+CC+CS(\text{fixe})$
 le prix du transport de la **consommation** en kWh, $CS(\text{variable})$
 éventuellement les **pénalités** de dépassement de puissance, $CMDPS$
 le prix de l'**énergie réactive** au-delà de $tg(\Phi)=0,4$ ⁷. CER

3.1.2 Options tarifaires.

Il existe quatre **options tarifaires** en fonction du **taux d'utilisation** (voir plus bas) :

- Courte Utilisation avec Pointe fixe
- Courte Utilisation avec Pointe mobile (prime faible / coût kWh élevé)
- Longue Utilisation avec Pointe fixe
- Longue Utilisation avec Pointe mobile (prime élevée / coût kWh faible)

Selon la version choisie, le coût du kWh et la prime fixe diffèrent.



Doc. Ayming.fr

Le **taux d'utilisation** correspond à la **puissance moyenne d'utilisation** (consommation moyenne divisée par le nombre d'heures de la période) divisée par la **puissance souscrite** : à 100%, la puissance moyenne vaut en permanence la puissance souscrite.

3.1.3 Classes temporelles.

Le TURPE comporte cinq **classes temporelles** réparties sur deux saisons, ces périodes décrites ci-dessous sont valables pour les quatre **options tarifaires** :

Hiver/Haute : de novembre à mars avec : heures de pointe **HP**,
heures pleines **HPH**,
heures creuse **HCH**

⁶ Les trois dernières ne sont pas traitées ici.

⁷ lors des heures de pointe (HP) et des heures pleines d'hiver (HPH).

«La tarification prévoit de facturer l'énergie réactive soutirée pendant les mois de novembre à mars, de 6 h à 22 h, du lundi au samedi, les jours ouvrables.» (TURPE)

Le seuil fixé par RTE est de $\text{tg}(\Phi) = 0,4^8$ ce qui signifie que pour une énergie active consommée le RTE « offre » 40% en énergie réactive en **franchise** et facture l'**excédent**. La consommation d'énergie réactive est facturée au prix moyen de 1,89 centimes/kVArh (tarif 2017).

L'amélioration du facteur de puissance est obtenue par l'utilisation de condensateurs (voir le cours de physique appliquée). *Les condensateurs fournissent de la puissance réactive.*

Un bilan de l'énergie réactive consommée par une installation est nécessaire pour déterminer la puissance des condensateurs à mettre en place. Les factures donnent les valeurs de l'énergie réactive consommée ainsi que du facteur $\text{tg}(\Phi)$. La puissance réactive Q_c nécessaire à la compensation est calculée d'après l'une des relations suivantes :

$$Q_c = P [\text{tg}(\Phi) - 0,4]$$

$$Q_c > \text{Erf}/T_f$$

avec :

P la puissance active absorbée par l'installation et $\text{tg}(\Phi)$ le facteur correspondant.
Erf l'énergie réactive facturée et T_f le temps de fonctionnement.

L'énergie réactive est facturée pour chaque version tarifaire en heures de pointe (HP) et en heures pleines d'hiver (HPH) au-delà de $\text{tg}(\Phi) > 0,4$.

Exemple : énergie active consommée en HP et HPH : **60000 kWh**
énergie réactive en franchise (non facturée) : $60000 \times 0,4 = 24000 \text{ kVARh}$
énergie réactive consommée : **42000 kVARh**
énergie réactive facturée: $42000 - 24000 = 18000 \text{ kVARh}$
soit $18000 \times 1,89 / 100 = 340,2 \text{ euros}$.

3.4 Eléments calculs CS (TURPE 2017).

$$CS = b_1 \cdot P_1 + \sum_{i=2}^5 b_i \cdot (P_i - P_{i-1}) + \sum_{i=1}^5 c_i \cdot E_i$$

P_i désigne la puissance souscrite pour la i ème plage temporelle, exprimée en kW et E_i désigne l'énergie active soutirée pendant la i ème plage temporelle, exprimée en kWh.

Coefficient pondérateur de la puissance (b_i)

€/kW/an	Pointe	HPH	HCH	HPB	HCB
CU pointe fixe	2,59	2,32	1,96	1,78	0,93
CU pointe mobile	3,17	2,23	1,96	1,78	0,93
LU pointe fixe	15,88	15,34	12,94	8,52	1,63
LU pointe mobile	18,25	16,97	12,94	8,52	1,63

Coefficient pondérateur de l'énergie (c_i)

c€/kWh	Pointe	HPH	HCH	HPB	HCB
CU pointe fixe	3,03	2,85	2,05	1,90	1,15
CU pointe mobile	4,04	2,73	2,05	1,90	1,15
LU pointe fixe	2,77	2,08	1,30	0,96	0,85
LU pointe mobile	3,17	1,91	1,30	0,96	0,85

⁸ (ce qui correspond à $\cos(\Phi) = 0,93$).

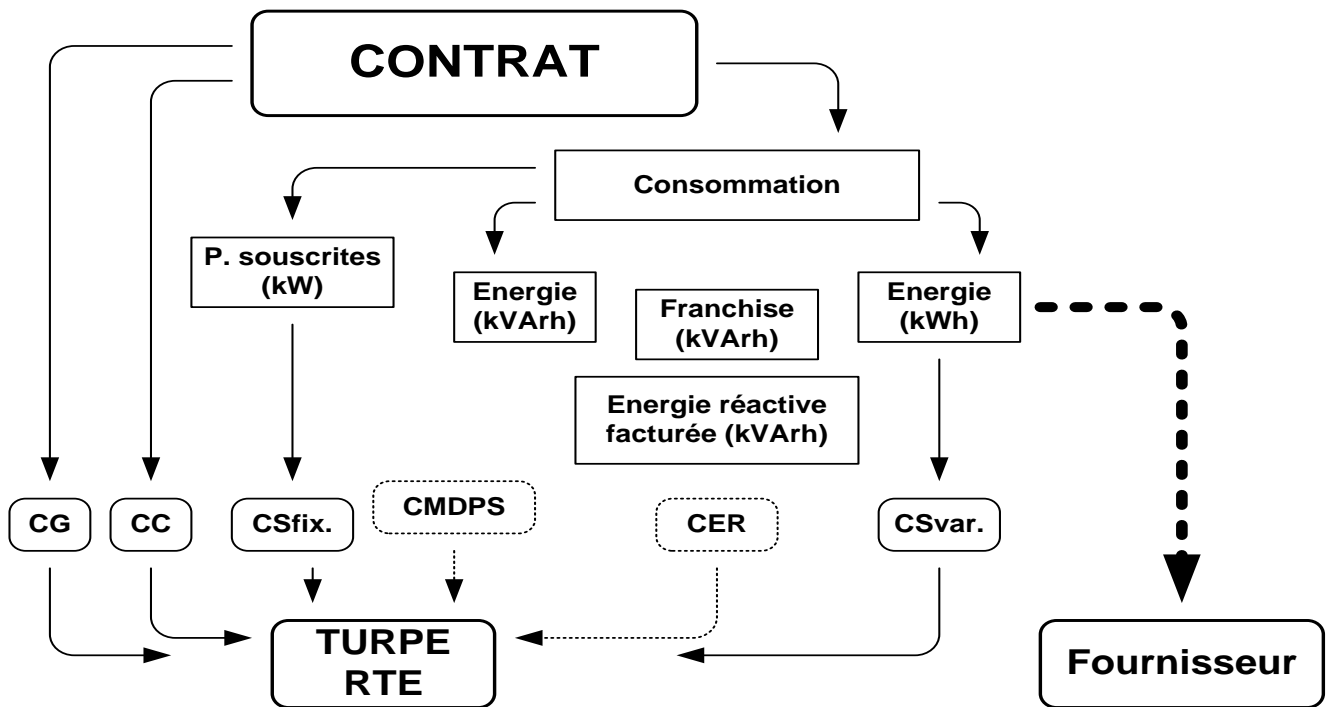
4 Synthèse.

4.1 Récapitulatif.

La figure ci-dessous indique les différents éléments qui entrent en jeu pour déterminer le montant total de la facture.

On y retrouve les 5 composantes principales du TURPE ainsi que la part liée au fournisseur, qu'il soit historique ou non.

Seules les différentes taxes ne sont pas représentées.



Composantes essentielles du TURPE :

CG	CC	CS	CMDPS	CER	CACS	CR	CI
Gestion	Comptage	Soutirage	Dépassement ²	Energie réactive	Secours ³	Regroupement	Injection

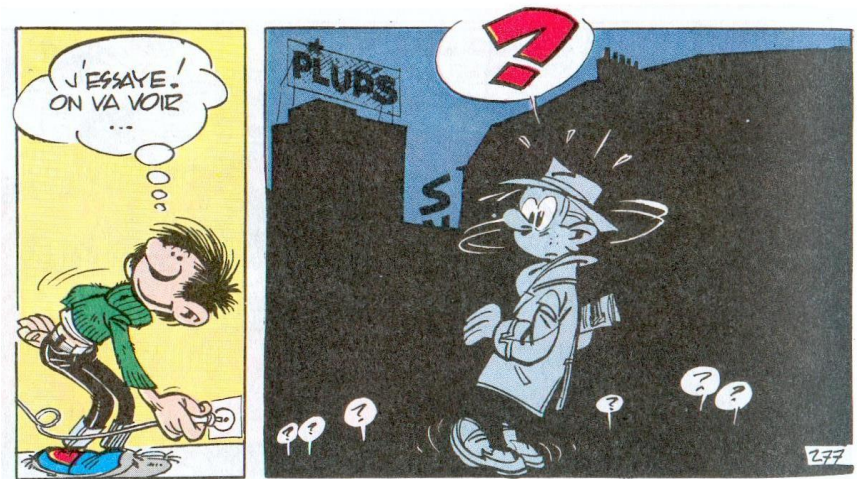
4.2 Conseils.

La lecture de ce document doit être accompagnée du parcours « Moodle » correspondant sur la plateforme de e-formation de l'académie de Grenoble.

L'étude réalisée en TP de la facturation de l'énergie électrique au lycée du Dauphiné est un plus ...

(Notes)

Qualité de l'énergie



(Notes)

1 Présentation.

1.1 Panorama.

Liste des titres ou sous-titres de la presse spécialisée après le passage de l'an 2000 :

Qu'entend-on par qualité du courant ? (12/04)
 Veiller à la qualité de service des réseaux (03/05)
 Connaître les perturbations du courant et y remédier (11/05)
 Quali-foudre pour valider les compétences (11/05)
 Dégradations du courant : causes et remèdes (03/06)
 J3E 2007 : L'efficacité énergétique (12/06)

...

1.2 Conclusion.

En gros, il ne suffit plus de fournir de l'énergie, il faut en plus que celle-ci soit « de qualité » ! Encore faut-il définir précisément cette qualité de l'énergie.

2 Critères de qualité.

2.1 Présentation

2.1.1 Vous avez dit énergie ?

Toute énergie électrique consommée pendant une durée T comprise entre t_1 et t_2 , dépend :

De cette durée T ,
 de la tension $v(t)$ fournie par le distributeur et
 du courant absorbé $i(t)$ par le client.

$$E(t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v(t).i(t).dt$$

ou

$$\ll \mathbf{E = V.I.t} \gg^1$$

Trois paramètres apparaissent qui vont influencer directement sur la qualité de l'énergie :

La tension	fournie par le distributeur	(vendeur),
Le courant	absorbé par le récepteur	(client),
Le temps	pendant lequel la fourniture doit être assurée.	

2.1.2 Qui fait quoi ?

Le tableau ci-dessous indique le degré estimé de responsabilité de chacun :

	Vendeur	Client
Disponibilité	XXXXXXXX	XXX
Qualité du courant I	X	XXXXXXXXXX
Qualité de la tension U	XXXXXXXX	XXX

¹ Si V et I sont constants pendant la durée t ...

2.2 Continuité et disponibilité.

On ne peut parler de qualité de l'énergie que lorsque celle-ci est effectivement présente !!! En cas de rupture de l'alimentation, que celle-ci soit brève (quelques ms) ou longue (quelques secondes) la qualité est forcément mise à mal !

Dans la suite de ces documents, le facteur temps, comme paramètre influant la qualité sera envisagé dans le cas de la rupture d'alimentation.

(voir le cours sur la disponibilité de l'énergie).

2.3 Qualité de la tension fournie.

La tension est généralement fournie par l'entreprise EDF et donc de bonne qualité. Parfois, on peut être amené à établir un diagnostic intermédiaire et donc à contrôler les tensions distribuées à l'intérieur d'une installation.

(voir le cours sur la qualité de la tension).

2.4 Qualité du courant absorbé.

Le courant absorbé par une installation dépend essentiellement de l'installation elle-même. Les problèmes de qualité détectés sont alors le plus souvent « à la charge » du propriétaire de celle-ci !

(voir le cours sur la qualité du courant).

3 Stratégie de protection.

3.1 Perturbations.

Les perturbations qui entraînent une dégradation de l'énergie électrique sont de deux types :

3.1.1 Des incidents.

Ce sont des défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients (court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc ...), ces défauts pouvant résulter de causes :

atmosphériques (foudre, givre, tempête...),
matérielles (vieillessement d'isolants...),
ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

Dans ce cas, il faut protéger les installations sensibles se situant à proximité et qui sont polluées par le dysfonctionnement non prévisible.

3.1.2 Un fonctionnement normalement perturbateur.

Par exemple des fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc...

Dans ces cas là, il peut être prévu d'empêcher les émissions de ces pollutions.

3.2 Remèdes.

Bien souvent, plusieurs solutions sont mises en œuvre et le rôle du concepteur consiste à :
faire un diagnostic de l'installation,
établir un inventaire des solutions possibles,
mettre en œuvre ces solutions dans le respect des normes correspondantes.

4 Mesure de l'énergie.

4.1 Principes.

Toute énergie électrique consommée pendant une durée t , dépend :

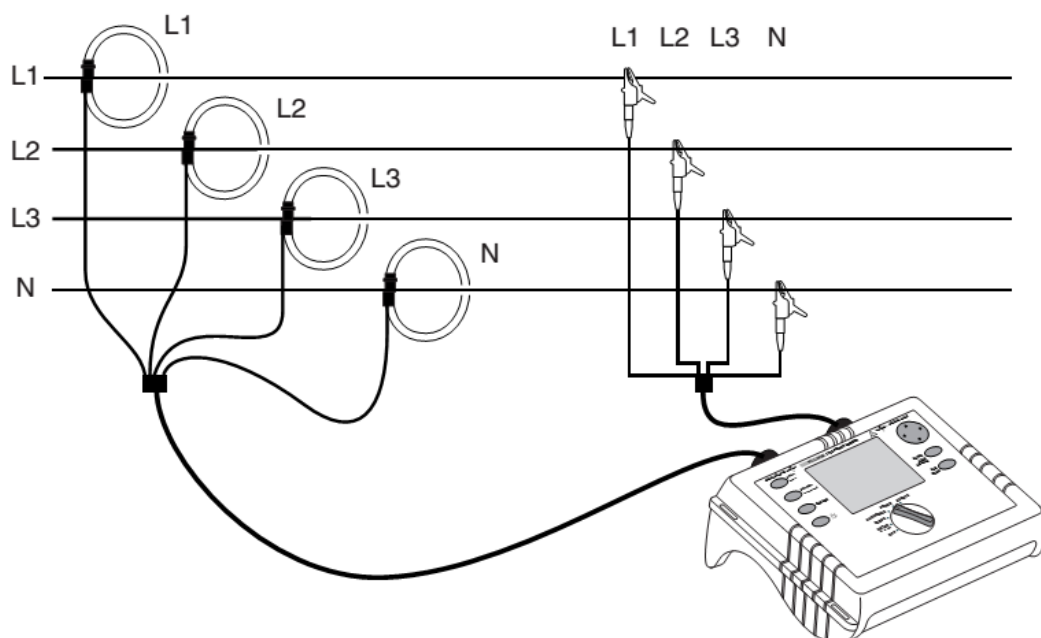
De cette durée t ,
de la tension V fournie par le distributeur et
du courant absorbé I par le client.

$$E(t) = \int_0^t V(x).I(x).dx$$

Pour cela il faut donc disposer d'un appareil permettant de faire l'acquisition de la tension simple et du courant en ligne d'une part, et qui doit d'autre part être capable de faire le calcul ci-dessus et de le mémoriser !
L'énergie est généralement calculée à partir d'une intégration de la puissance moyenne.

4.2 Mise en œuvre.

4.2.1 Mobile.



Power logger doc Fluke

Dans le meilleur des cas, l'appareil dispose de 4 prises tension qui permettent de mesurer les 3 tensions simples², et de 4 pinces de courant (ou tores de mesure) afin de mesurer les 3 courants en ligne ainsi que le courant circulant dans le neutre.

L'acquisition se fait sur 10 périodes avec une fréquence d'échantillonnage suffisante³ pour pouvoir calculer :

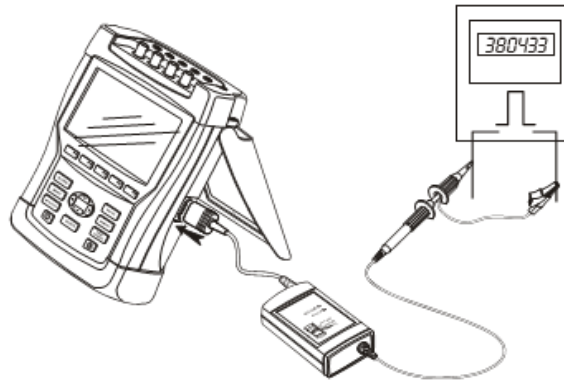
les valeurs efficaces des tensions et courants,
les harmoniques des tensions et courants,
les déphasages des courants en lignes par rapport aux tensions simples,
les puissances actives.

² La prise tension affectée au neutre est nécessaire pour effectuer simplement les mesures sur un réseau monophasé.

³ Voir CEI 31000-4-30

Ensuite de simples calculs permettent de déterminer les énergies actives ou réactives consommées.

Enfin, certains appareils peuvent compter pendant un temps T les impulsions issues d'un système de comptage industriel. Il suffit alors de paramétrer la valeur d'une impulsion (en Watt.heure) pour connaître l'énergie mesurée pendant le temps T.



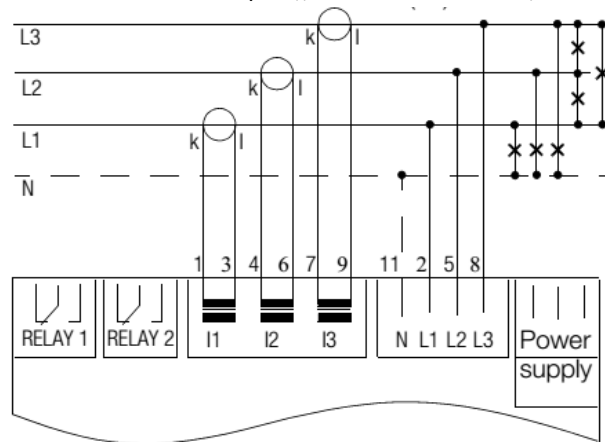
Power quality analyzer 434 doc Fluke

4.2.2 Fixe.

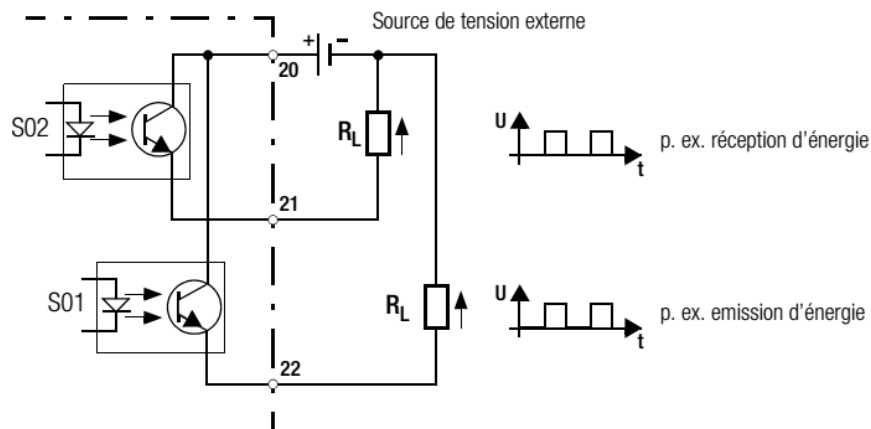
Les systèmes de mesure fixes ont les mêmes fonctions que les systèmes mobiles précédents à la différence que les raccordements sont permanents.

Des exemples de ces raccordements sont proposés ci-dessous pour une centrale de mesure A2000 de la marque Gossen Metrawatt :

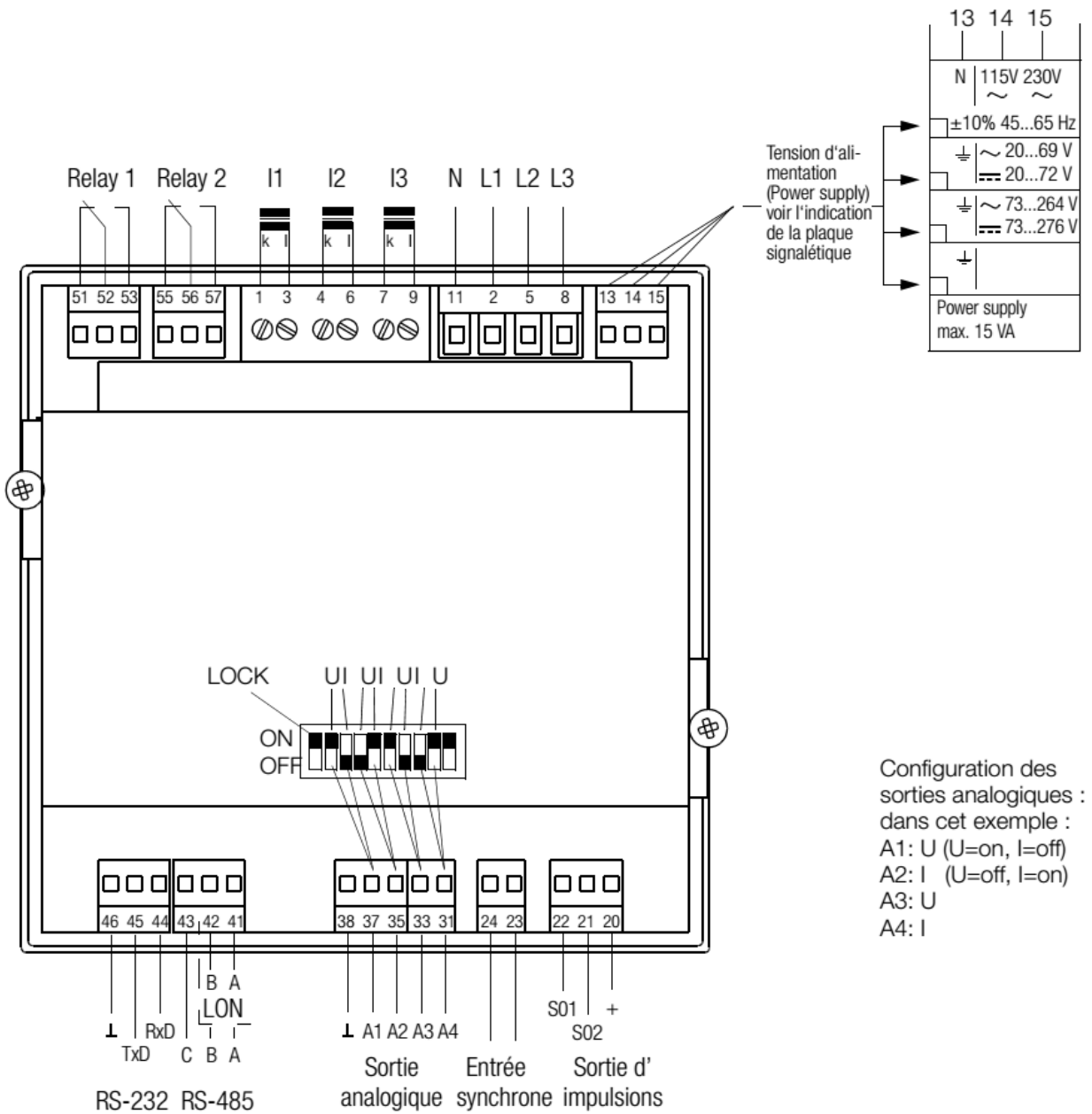
Raccordement sur un réseau tri+neutre avec 3 transformateurs de courant.



4.2.3 Sorties impulsionnelles.



4.2.4 Brochage global



5 Grandeurs et valeurs de référence :

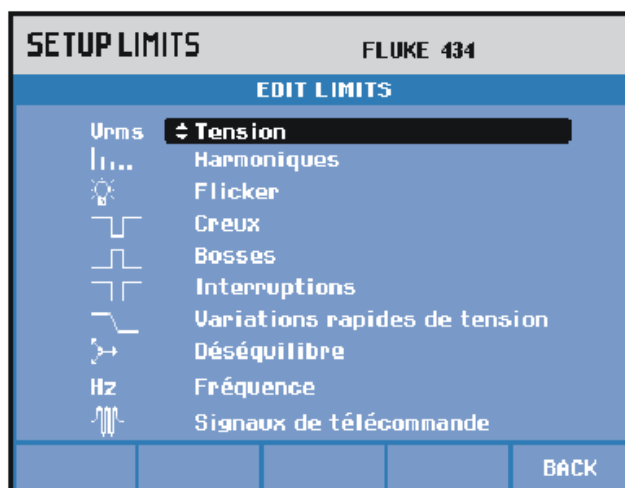
5.1 Tension.

Le tableau suivant donne un aperçu des niveaux de qualité spécifiés dans les normes citées auparavant : EN 50160 pour l'Europe et IEC 1000 pour le monde.

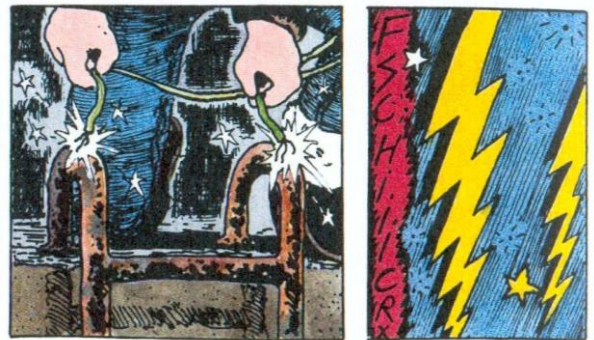
TOPIC	Compatibility levels (IEC 1000-2-1/2)	Voltage characteristics (EN 50160)
	LV	LV
Frequency	49-51 Hz	49,5-50,5 Hz (99,5% year, 10s mean) 47-52 Hz (100% time, 10s mean)
Magnitude		$U_n \pm 10\%$ (95 % week, 10 min RMS) $U_n +10/-15\%$ (100% week, 10 min RMS)
Temporary overvoltages phase/earth		<i>indicative</i> : 1,5 kV RMS
Transient overvoltages phase/earth		generally ≤ 6 kV (occasionally higher)
Voltage unbalance	$U_- \leq 2\%$	$U_- \leq 2\%$ (95 % week, 10 min RMS) (3 % in some areas)
Harmonic voltage	$U_5 \leq 6\%$ $U_7 \leq 5\%$ $U_{11} \leq 3,5\%$ $U_{13} \leq 3\%$ etc., and $THD \leq 8\%$	$U_5 \leq 6\%$ $U_7 \leq 5\%$ $U_{11} \leq 3,5\%$ $U_{13} \leq 3\%$ etc., and $THD \leq 8\%$ (95 % week, 10 min RMS; higher values possible if resonance)
Mains signalling voltage	110-500 Hz : 3,5-6,0 % 0,5-2,0 kHz : 2-5 % 3-20 kHz : 2 % 20-150 kHz : 0,3 %	100-500 Hz : 9 % 1-10 kHz : 5 % (99 % day, 3 s mean)
dc components	under consideration	
Voltage dips	<i>indicative</i> : urban: 1 to 4/month rural: much more	<i>indicative</i> : up to a few tens to up to one thousand
Short interruptions		<i>indicative</i> : up to a few tens to up to several hundreds
Long interruptions		<i>indicative</i> : (interrupt. > 3 min) annual frequency <10 or ≤ 50 , depending on area

5.2 Courant.

Pour les caractéristiques de référence d'un courant "propre", se référer au cours de physique et au chapitre 17 sur la qualité du courant.



Protection contre les sur-intensités



(Notes)

1 Présentation.

L'énergie électrique distribuée se caractérise par plusieurs grandeurs : la tension, la fréquence et l'intensité du courant disponible. L'utilisation n'étant pas exempte d'erreurs, il s'ensuit inévitablement **des défauts électriques**. L'étude qui suit se propose dans un premier volet de les définir et de les classer afin, dans un deuxième volet, d'étudier **les moyens de protection** permettant d'assurer une meilleure conduite des processus.

La première grande famille concerne les défauts qui entraînent une élévation anormale de l'intensité absorbée par un circuit et donc une élévation de la température : ce sont **les surintensités** (surcharge et court-circuit).

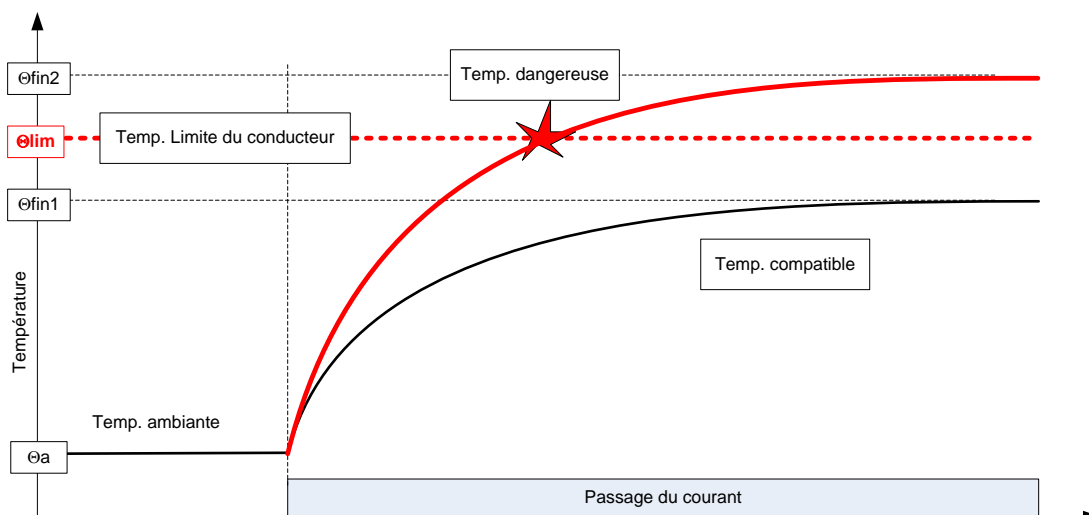
1.1 Surintensité.

1.1.1 Equilibre et surcharge. (Voir courtd2.free.fr pour plus de détails ...)

Un conducteur parcouru par un courant électrique est en permanence soumis à deux phénomènes contraires : échauffement et refroidissement. En fonctionnement normal (à température ambiante Θ_a) sa température Θ est solution de l'équation différentielle découlant des deux équations vues en annexe, on obtient alors :

$$\Theta - \Theta_a = (\Theta_{fin} - \Theta_a) * [1 - \exp(-t/\tau)]$$

et donc sa température se stabilise à Θ_{fin} au bout d'un certain temps.



Une **surintensité** est définie comme un courant entraînant une température Θ_{fin2} non compatible avec les conducteurs et isolants du circuit, c'est à dire telle que $\Theta_{fin2} > \Theta_{lim}$: la température critique des isolants et/ou des conducteurs du circuit.¹

1.2 Causes.

On a vu qu'une surintensité apparaît quand l'intensité appelée est supérieure à celle supportable par le circuit. Les causes sont multiples :

- prise multiple sur-employée,
- moteur asynchrone triphasé 240V/410V couplé en triangle sur un réseau 240V/410V ...
(un enroulement supportant 240 V est alors alimenté en 410 V ...)
- transformateur mal raccordé, (voir moteur ci-dessus)
- frottements excessifs sur un arbre moteur, (couple résistant ≠ courant absorbé ...)
- dégradation du facteur de puissance etc, etc (voir TD chapitre 4) ...
- accident ([court-circuit](#)).

1.3 Principes de protection.

¹ On limite les surcharges aux élévations de température « lente » et progressive, c'est à dire inférieure à 3 ou 10 fois le courant nominal pendant quelques secondes.

Trois moyens de détection sont possibles :

une mesure directe de la température à l'aide d'un capteur de température,

une mesure de l'intensité absorbée par le circuit accompagné **d'un traitement** permettant d'avoir une image de la grandeur $\underline{I}^2 \cdot t^2$ qui « représente » la température du matériau³.

détection magnétique de l'intensité⁴.

Ces trois principes ont donné plusieurs types de composants assurant la protection contre les surintensités, ils sont décrits et développés par la suite.

2 Calcul de courant de court-circuit.

Les références (§) données dans ce document proviennent de la publication UTE C 15-105⁵ ...

2.1 Généralités.

2.1.1 Définition et causes.

Un court-circuit est défini comme la liaison entre deux points (au moins) ayant des potentiels différents. Il s'ensuit généralement un arc électrique⁶ si la différence de potentiel est supérieure à une dizaine de volts.

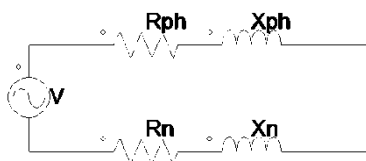
Les causes sont la plupart du temps accidentelles : inattention, câblage non testé, fausse manœuvre. Elles peuvent aussi découler d'autres défauts non traités : surcharge => isolement défectueux => court-circuit !

2.1.2 Types.

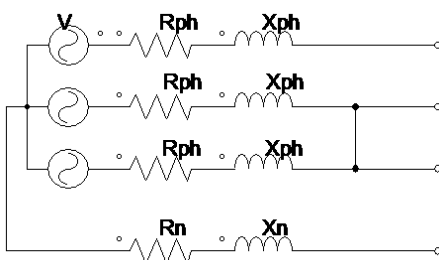
Les courts-circuits sont de plusieurs types en fonction des conducteurs en défaut.

La boucle de défaut contenant : le générateur (qui alimente le défaut) et l'impédance (qui le limite) dépend donc du type de court-circuit.

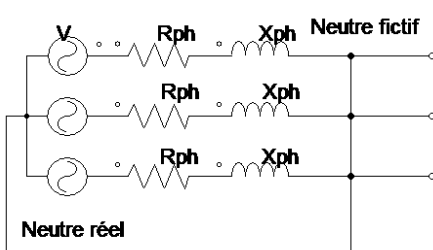
On distingue les courts-circuits :



I_{k1} (ou I_{cc1}) monophasé :
phase / neutre, (V)
 $Z(\text{phase} + \text{neutre})$
 $I_{k1} = V/Z(\text{ph}+\text{n})$



I_{k2} (ou I_{cc2}) biphasé :
phase / phase, (U)
 $Z(\text{phase} + \text{phase}) = 2 \cdot Z_{ph}$
 $I_{k2} = U/(2 \cdot Z_{ph})$



I_{k3} (ou I_{cc3}) triphasé équilibré :
phase / phase / phase,
(V car le court-circuit devient un point « neutre »...)
 $Z(\text{phase}) = Z_{ph}$
 $I_{k3} = V/Z_{ph}$

I_f (ou I_{k0}) terre : phase / terre (V), Z_{ph} et $Z_{PE} + ?$ Voir chap. 8 ...

² $I^2 t$ s'appelle la contrainte thermique et s'exprime en $A^2 \cdot s$ ou en $kA^2 \cdot s$. Voir plus loin.

³ Voir plus loin la définition de la contrainte thermique ...

⁴ Voir le cours sur le magnétisme en Sciences Appliquées.

⁵ (voir aussi l'excellent [cahier technique Schneider n°158](#) !!!)

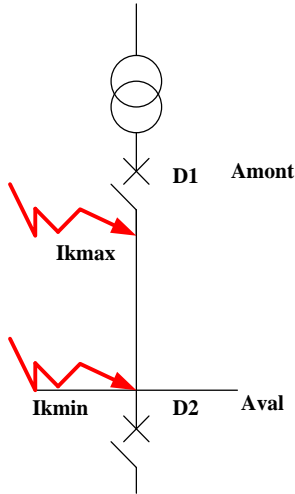
⁶ Voir sur le site OSO le cours d'archive sur l'arc électrique et les moyens de l'éteindre ...

on parle de défaut homopolaire

L'intensité du courant qui s'établit est alors très élevée et devient donc rapidement destructrice.

Dans la suite de ce document, on montre comment calculer la valeur du courant de court-circuit triphasé équilibré I_{k3} , les autres calculs de courant suivent le même principe en adaptant le générateur et la boucle de défaut.

2.1.3 Situations.



Remarque : la notion de court-circuit minimal et maximal dans une canalisation dépend de deux facteurs :

- ❖ la position du défaut dans la canalisation,
- ❖ le type de défaut concerné : I_{k0} , I_{k1} , I_{k2} ou I_{k3} .

En général, on a

$$I_{kmax} = I_{k3amont}$$

et

$$I_{kmin} = I_{k0aval}$$

mais pas toujours ... Il faut tenir compte de tout !

2.1.4 Utilité. (§ C.1)

La connaissance des intensités de court-circuit (I_{cc} ou I_k) aux différents points d'une installation permet de définir :

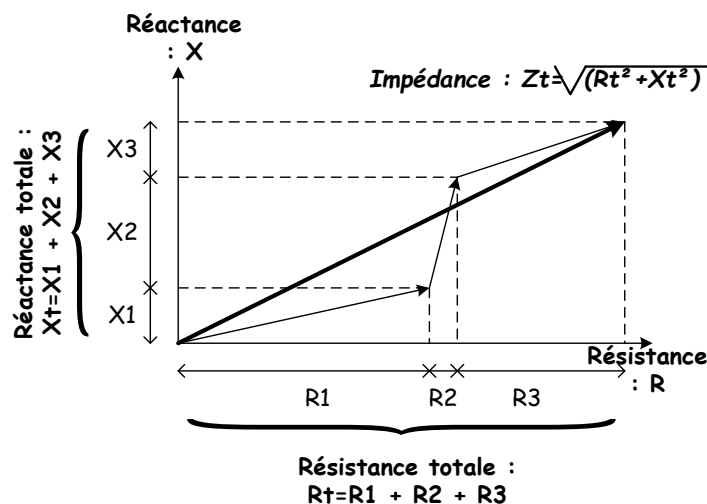
- le pouvoir de coupure des appareils de protection contre les court-circuits (I_{kmax}),
- le réglage des appareils de protection contre les court-circuits (I_{kmin}),
- la tenue mécanique des barres et des câbles aux surintensités (I_{kmax}),
- la protection des personnes en régimes TN et IT (I_{kmin}),
- la sélectivité.

2.2 Calcul de I_{k3} : méthode des impédances. (§ C.2.1)

2.2.1 Principe.

Cette méthode consiste à totaliser les résistances et réactances intervenant sur le trajet de la boucle de défaut, depuis et y compris la source jusqu'au point considéré, puis à calculer l'impédance Z_{cc} correspondante :

Modèle d'une phase :



$$Z_t = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

L'intensité de court-circuit s'en déduit facilement (voir les types de court-circuit ci-dessus) :

$$I_{k3} = \frac{V}{Z_t} = \frac{V}{\sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}}$$

Remarques : Dans les autres cas, (sections de neutre et de phase différentes pour I_{cc1} par exemple ...) il suffit de s'adapter en calculant les deux impédances : aller et retour et d'adapter la formule donnant I_{k3} .

2.2.2 Source.

Dans le cas le plus général, la source est le réseau amont. L'impédance du réseau amont ramenée au secondaire du transformateur, Z_a , s'exprime par :

$$Z_a = \frac{U_o^2}{S_{cc}}$$

avec U_o la tension entre phases à vide au secondaire du transformateur et S_{cc} ⁷ la puissance de court-circuit du réseau amont en VA (kVA ou MVA).

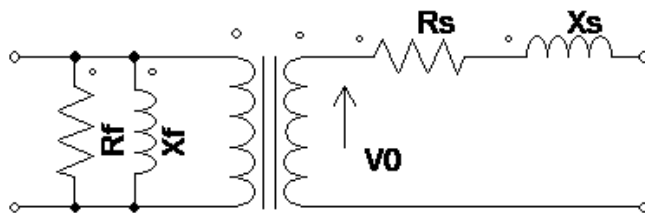
Souvent $Z_a = U_o^2 / S_{cc} = X_a$, dans ce cas on néglige R_a .

On peut poser que $R_a = Z_a/10$ et on calcule X_a avec $Z_a^2 = R_a^2 + X_a^2$.

On peut trouver les valeurs de R_a et X_a dans des tableaux sans faire les calculs soi-même :

Pcc	U_o	R_a (mΩ)	X_a (mΩ)
250 MVA	237	0,033	0,222
	410	0,100	0,700
500 MVA	237	0,017	0,111
	410	0,050	0,350

2.2.3 Transformateur triphasé (voir l'essai de système correspondant).

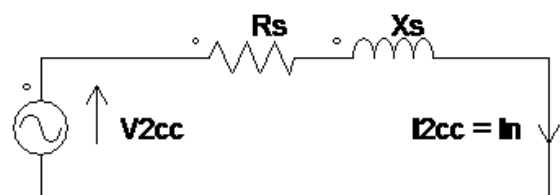


Le schéma ci-contre modélise un transformateur triphasé par un schéma équivalent monophasé où figurent :

1/3 des pertes cuivre => R_s ,

1/3 des pertes fer => R_f ,

On appelle **tension de court-circuit** (notée U_{cc}) la tension qu'il faut appliquer, entre phases, au primaire d'un transformateur pour que le secondaire soit parcouru par l'intensité nominale I_n , les bornes de celui-ci étant court-circuitées.



$$V_{2cc} = V_0 \cdot U_{cc}(\%) / 100$$

Avec V_0 la tension à vide ...

Cette grandeur s'exprime habituellement en pourcentage de la tension concernée.

⁷ on trouve aussi Pcc, ce qui est « incorrect »

L'impédance interne d'une phase du secondaire d'un transformateur vaut alors :

$$Z_s = \frac{V_{2cc}}{I_{2cc}} = \frac{V_0 * U_{cc}(\%)}{100 * I_n} = \frac{3 * V_0 * V_0 * U_{cc}(\%)}{3 * V_0 * 100 * I_n} = \frac{U_{cc}(\%)}{100} * \frac{U_0^2}{S_n} \quad (\text{à pouvoir retrouver ...})$$

On admet pour décomposer cette impédance en résistance et réactance que :

$$R_s = \frac{P_{cu}}{3 * I_n^2},$$

avec P_{cu} les pertes joules totales dans le cuivre,

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2},$$

(X_s modélise la réactance de fuite ramenée au secondaire du transformateur).

Des équations ci-dessus il est facile de montrer que

$$I_{k3} = \frac{100 * I_n}{U_{cc}(\%)}$$

On peut trouver les valeurs des grandeurs ci-dessus dans des tableaux normalisés fournis par les constructeurs de transformateurs.

Tableau CC – Valeurs des tensions de court-circuit, des résistances et des réactances des transformateurs immergés dans un diélectrique liquide (NF C 52-112-X)

P (kVA)	50	100	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
U_{cc}	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
R_t (m Ω)	43,7	21,9	13,7	8,7	5,5	3,5	4,1	3,3	2,6	2,1	1,6	1,3
X_t (m Ω)	134,1	67,0	41,9	26,8	16,8	10,6	12,6	10,0	8,1	6,3	5,0	4,0

2.2.4 Câbles⁸ et jeux de barres. (§ G.1).

Dans un cas comme dans l'autre la résistance d'un conducteur de longueur L et de section S est donnée par la formule bien connue :

$$R = \frac{\rho * L}{S}$$

avec $\rho =$ 18,5 < 22,5 < 28 m Ω .mm²/m pour le cuivre,
29,4 < 36 < 44 m Ω .mm²/m pour l'aluminium.

Si une phase est constituée de n conducteurs en parallèle, la formule devient :

$$R = \frac{\rho * L}{n * S}$$

En ce qui concerne la réactance⁹, elle dépend essentiellement de la longueur et du nombre de conducteurs en parallèle :

$$X = \frac{x * L}{n}$$

x est la réactance linéique, comprise entre 0,08 et 0,13 m Ω /m.

ATTENTION A LA MISE EN // DE PLUSIEURS CONDUCTEURS ...

2.2.5 Appareillage.

Les disjoncteurs et les contacteurs ont une impédance faible (voir catalogues) qui est généralement négligée devant les autres. Parfois, on intègre une réactance qui est de l'ordre de 0,15 m Ω par pôle.

2.2.6 Synthèse.

⁸ Ce qui suit a déjà été vu dans le chapitre 4 ...

⁹ Pour $S < 50$ mm², on peut négliger la réactance.

(Voir [annexe n°1](#)).

Le document proposé en annexe se trouve dans les catalogues « distribution » du constructeur Schneider. Il rassemble les différents calculs utilisés pour déterminer le courant de court-circuit I_{k3} dans une installation.

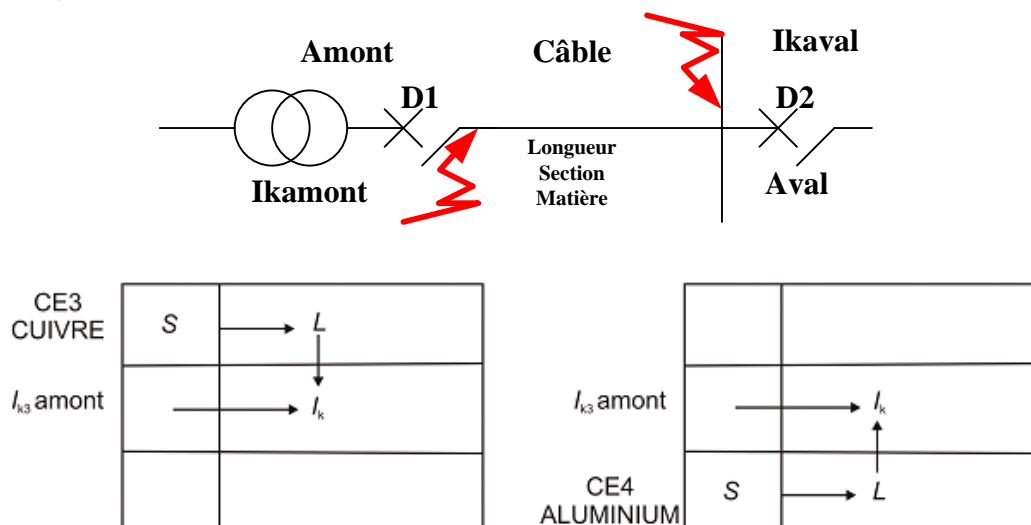
Comme il s'agit de calculer I_{kmax} deux détails sont à remarquer :

La résistivité du cuivre vaut $18,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ afin d'avoir R_{min} , donc Z_{min} et ainsi I_{kmax} ...

Un coefficient de 1,05 est appliqué à la tension d'alimentation pour la même raison.

2.3 Méthode de composition. (§ C.2.2 et annexe 2)

Dans certains cas la méthode décrite ci-dessus est lourde à appliquer (manque de données). On utilise des tableaux qui permettent d'évaluer le **courant de court-circuit maximal aval** en connaissant le **courant de court-circuit maximal amont** et les caractéristiques (longueur, matériaux et section) du câble reliant les deux points amont et aval.



(Voir [annexe n°2](#)).

2.4 Méthode conventionnelle. (§ C.2.3)

Elle est réservée au calcul de défaut d'isolement dans le cadre de l'étude des SLT.

(Voir à ce propos le chapitre 8 concernant l'étude des schémas de liaison à la terre : le régime TN notamment !)¹⁰.

Elle suppose entre autre que la boucle de défaut est résistante et que la source chute de 20 %.

3 Principes de protections.

3.1 Principes.

Etant donné les effets rapidement destructeurs d'un court-circuit, sa détection et sa suppression doivent être très rapides (de l'ordre de la dizaine de millisecondes, temps compatible avec le paragraphe § 434-5-2 de la NFC 15-100). Les moyens technologiques employés sont donc :

- fusion rapide ⇒ fusibles,
- déclenchement magnétique ⇒ disjoncteurs magnétiques,
- ⇒ disjoncteurs magnéto-thermiques.
- déclenchement électronique ⇒ disjoncteurs classe B (électroniques)

3.2 Mise en situation.

¹⁰ Rappel important : en schéma de liaison à la terre TN, un défaut d'isolement se traduit par un court-circuit monophasé I_{k1} .

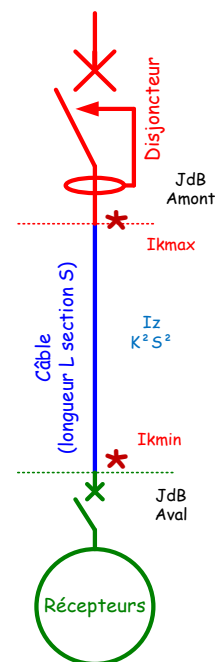
Dans l'ensemble de ce document on considère un circuit classique composé d'un ensemble de récepteurs absorbant un **courant d'emplois I_b** .

Il est alimenté par un câble de longueur L et de section S .
Ce câble est constitué de conducteurs dont le **courant maximal admissible** vaut I_z et la **contrainte thermique $K^2 S^2$** ¹¹.

Pour ce câble, on définit la partie **amont** et la partie **aval** qui correspondent aux deux jeux de barres.

Sur le JdB amont on trouve **I_{kmax}** .
Sur le JdB aval il y a **I_{kmin}** .

Ce câble est protégé par un disjoncteur dont les caractéristiques sont à déterminer pour qu'il protège efficacement le câble. C'est le sujet de ce document !



3.3 Protections contre les surcharges (§ 433).

Pour assurer la protection contre les surcharges un dispositif doit respecter deux règles.

3.3.1 Règle des courants.

Il faut que le dispositif :

- ne déclenche pas pour les courants d'intensité normale du circuit protégé (**I_b**),
- déclenche avant d'atteindre un courant destructeur pour les conducteurs (**I_z**) ...

Il doit donc avoir un **courant assigné I_n** (ou calibre ou réglage) tel que :

$$I_b < I_n < I_z$$

3.3.2 Règle du temps de fonctionnement.

Les normes produites ou les constructeurs indiquent une grandeur $I^2 t$, temps de fonctionnement conventionnel, qui doit respecter la règle suivante :

$$I^2 t < 1,45 * I_z^2$$

3.3.3 Dispenses (§433-3).

Cet aspect est complexe, mais ce qu'il faut en retenir c'est que pour les circuits dans lesquels il n'est pas sensé se produire une surcharge on peut ne pas en prévoir ...

Notamment, les circuits fixes d'éclairage, les circuits de communication, etc ...

Dès qu'une prise est située sur un circuit, celui-ci doit être protégé contre les surcharges !

3.4 Protections contre les courts-circuits (§ 434).

Pour assurer la protection contre les courts-circuits un dispositif doit respecter deux règles.

3.4.1 Règle du temps de coupure (§ 434-5-2).

Cette règle permet d'assurer que le dispositif de protection déclenche dans un **temps t_{max}** compatible avec la **contrainte thermique** des composants à protéger (câbles).

$$t_{max} < \frac{k^2 \cdot S^2}{I_{max}^2}$$

Le produit $k^2 S^2$ est une caractéristique du circuit à protéger (c'est la contrainte thermique), I_{max} aussi ; alors que t_{max} est une caractéristique du dispositif de protection.

¹¹ Voir chapitre 9

3.4.2 Règle du pouvoir de coupure (§ 434-5-1).

Cette règle assure que le dispositif de coupure sera encore en état de fonctionner après avoir éliminé le court-circuit. Il faut donc que son **pouvoir de coupure (Icu)** soit supérieur au plus grand des courants de court-circuit **I_{kmax}** apparaissant sur le circuit qu'il est censé protéger ...

$$I_{k_{\max}} < I_{cu} = PdC$$

3.5 Moyens technologiques (§ 432).

3.5.1 Inventaire.

Appareils	Surcharge	Court-circuit	Combiné
Fusible aM			
Fusible gG			
Disjoncteur magnéto-thermique			
Disjoncteur électronique			
Relais magnétique			

3.5.2 Coordination.

Voir le cours d'archive correspondant ...

4 Disjoncteurs.

4.1 Généralités.

4.1.1 Constitution.

Les disjoncteurs dans leur appellation générale sont des composants qui assurent la détection et l'élimination temporaire des surcharges et des courts-circuits. Très souvent modulaires ils présentent l'avantage d'être ré-enclenchables après intervention. Leur prix élevé est compensé par leur facilité d'utilisation, le temps gagné au câblage et la fiabilité accrue par rapport aux associations classiques « fusible+relais thermique+contacteur ».

On distingue trois parties électriques distinctes dont les rôles sont différents : les pôles¹², les déclencheurs et les auxiliaires de dialogue.

4.1.2 Déclencheurs.

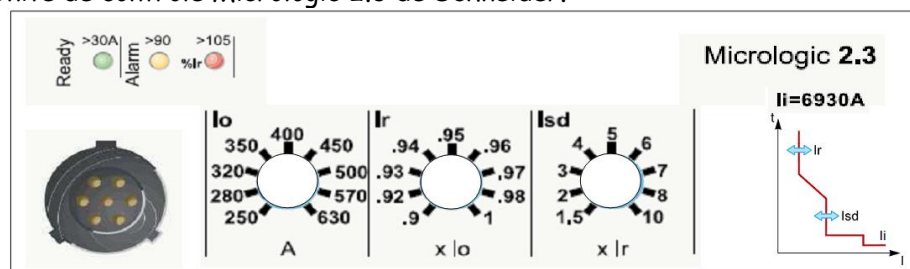
On appelle déclencheur la partie du disjoncteur qui détecte la surintensité et provoque l'ouverture des contacts. Deux types de déclencheur existent actuellement :

La technologie magnéto-thermique (bobine+bilame) qui regroupe grosso modo les fonctionnalités des deux types de relais thermique et magnétique en y adjoignant le pouvoir de coupure.

La technologie électronique (transformateur de courant+traitement) plus souple d'utilisation.

4.1.3 Réglages.

Sur les disjoncteurs électroniques (catégorie B), la courbe de déclenchement est réglable partiellement ou en totalité. Exemple : Unité de contrôle Micrologic 2.3 de Schneider.



Description :

I₀ permet de régler le calibre de l'appareil

=> I₀ = 500 A si I_b = 470 A par exemple.

I_r permet de régler la protection long retard ou « thermique »

¹² (Voir le document sur l'arc électrique et son extinction sur le site OSO).

=> $470/500 = 0,94$ donc $I_r = 0.94$.

Isd permet de régler la protection instantannée ou « magnétique »

=> $I_{sd} = 7$ si on veut $I_m = 7 \cdot I_r = 3290 \text{ A}$

4.1.4 Courbes de fonctionnement.

Les courbes de fonctionnement de ces deux types de déclencheurs sont légèrement différentes en raison des grandes possibilités de traitement des déclencheurs électroniques.

On distingue alors deux catégories de disjoncteurs A ou B selon qu'il y a possibilité de fonctionnement court retard (B) figure 31 ou non (A) figure 27.

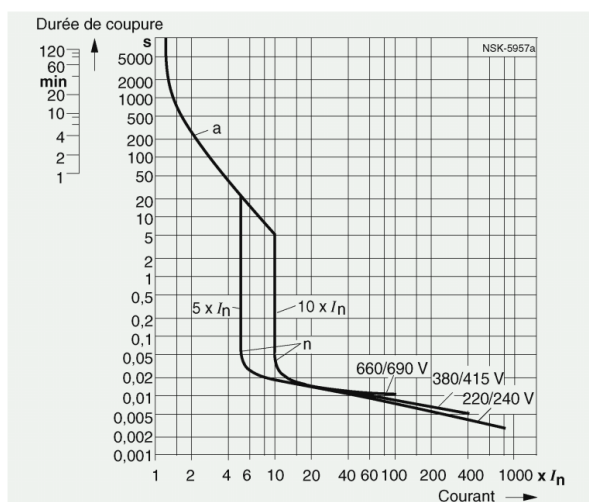


Figure 27 Caractéristique de déclenchement d'un disjoncteur 3VF4 pour la protection d'installations, I_{cu} 100 kA, déclencheur «n» réglable.

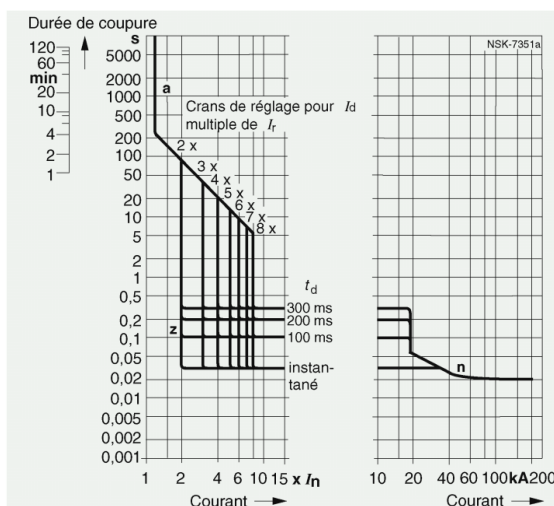


Figure 31 Caractéristique de déclenchement d'un disjoncteur 3VF7, I_{cu} 50/70 kA, avec déclencheur électronique

(Exemples tirés du catalogue "basse tension" Siemens 1999)

4.2 Caractéristiques.

4.2.1 Tensions assignées.

La **tension assignée d'emplois** est la tension maximale sous laquelle le disjoncteur peut fonctionner dans des conditions normales notamment au niveau du pouvoir de coupure.

On définit aussi la **tension assignée d'isolement** (U_i) et surtout la **tension assignée de tenue aux chocs** (U_{imp}) qui caractérise sa résistance à la foudre.

4.2.2 Courants assignés et courbes.

Le **courant assigné d'emplois** (I_n) est la valeur maximale du courant ininterrompu que peut supporter un disjoncteur à une température ambiante précise en respectant les limites d'échauffement prescrites.

On l'assimile souvent au **courant thermique noté I_{th}** .

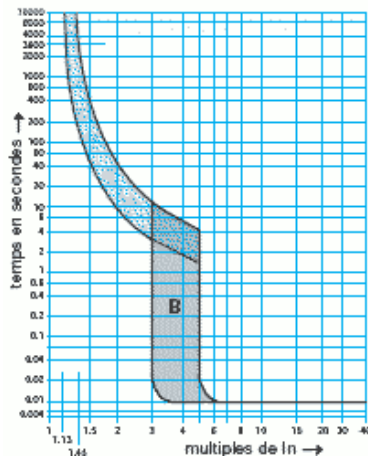
Les déclencheurs amovibles sont en général réglables, on appelle alors **courant de réglage** (I_r) le courant maximal que peut supporter le disjoncteur sans déclenchement, c'est ce réglage qui permet d'assurer la protection contre les surcharges.

Ils ont une plage de réglage qui s'étend classiquement de $0,4 \cdot I_n$ à I_n .

En ce qui concerne la protection contre les courts-circuits, on appelle **courant de déclenchement instantané** (Inst) ou **seuil de fonctionnement magnétique** (parfois I_m) la valeur du courant qui entraîne un déclenchement dont le temps est inférieur à une demi période. C'est ce courant qui permet d'assurer la protection contre les courts-circuits.

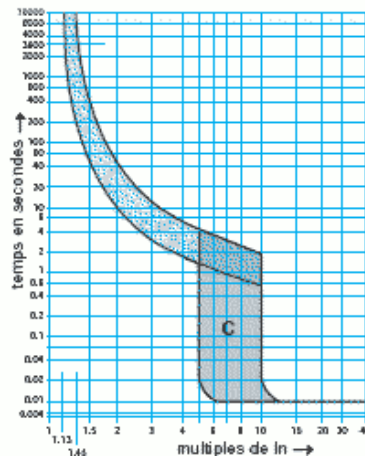
Exemple : Courbes de déclenchement classiques :

Courbe "B" NF C 61-410 (EN 60898-1)



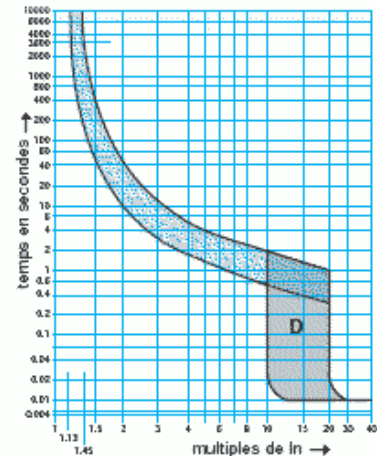
De 3 à 5 x In

Courbe "C" NF C 61-410 (EN 60898-1)



De 5 à 10 x In

Courbe "D"



de 10 à 15 x In

Les courbes ci-dessus conviennent à des utilisations différentes :

La courbe B présente un courant de déclenchement magnétique I_m faible qui permet de détecter les courants de court-circuit sur les lignes de grande longueur mais n'est pas compatible avec les démarrages des moteurs asynchrones ou la mise sous tension des transformateurs ...

En revanche, la courbe D est particulièrement bien adaptée à ces types de récepteurs ...

4.2.3 Pouvoir de coupure.

4.3 Choix.

On choisit un disjoncteur en fonction de plusieurs critères dont les plus évidents sont le nombre de pôles et les différents courants.

4.3.1 Disposition (§ 431).

Les disjoncteurs sont bi, tri ou tétra polaires, ce nombre de pôles dépend de la nature des conducteurs et du régime de neutre. On différencie les pôles coupés et ceux protégés, les règles suivantes sont à respecter :

les conducteurs PE et PEN ne doivent en aucun cas être coupés (§ 543-3-3),

en régime IT, le conducteur neutre doit toujours être protégé et coupé (§431-2-2),

en régime TT et TN, le neutre peut n'être ni protégé ni coupé si :

sa section est supérieure ou égale à celle des phases,

il n'est pas parcouru par des courants de surcharge (tri équilibré, absence d'harmoniques).

Si $S_n < S_{ph}$, il faut protéger le neutre (§ 431-2-1).

4.3.2 Courants.

Pour assurer la protection contre les surcharges on vérifie que :

$$I_B < I_r < I_n < I'z < I_z$$

avec I_B le courant d'emplois de la partie à protégée,
 $I'z$ le courant équivalent véhiculé par la canalisation,
 I_z le courant maximal admissible dans la canalisation.

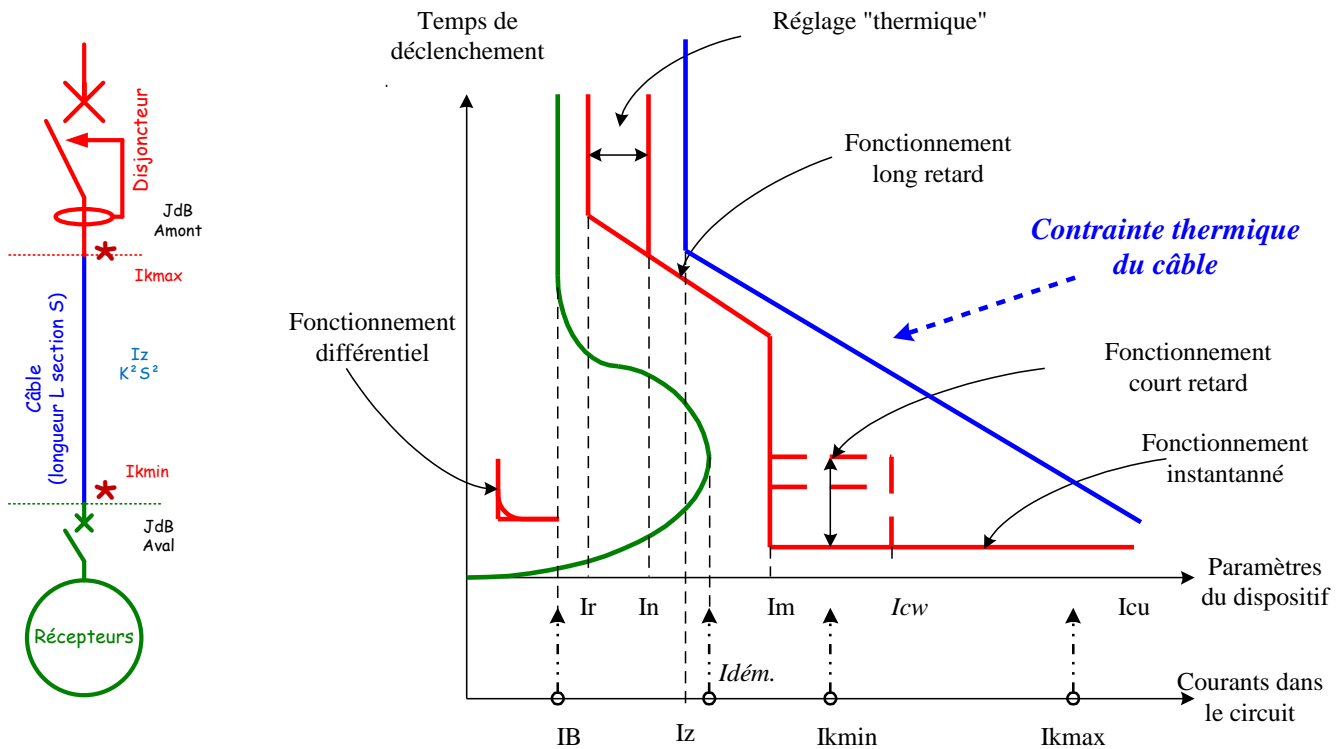
La protection contre les court-circuits est assurée en respectant les deux règles suivantes :

$$I_m < I_k(\min), \\ I_k(\max) < PdC$$

En résumé :

$$I_e = I_B < I_r < I_n < I_z < I_m < I_k(\min) < I_k(\max) < I_{cu} = PdC$$

Ces inéquations sont illustrées ci-dessous :



A défaut de choix précis du courant de déclenchement magnétique I_m (celui-ci n'étant pas toujours réglable), on choisit un type de courbe de déclenchement type. Cette courbe est choisie de manière à « laisser passer » les pointes de courant qui sont acceptables par l'ensemble du circuit.

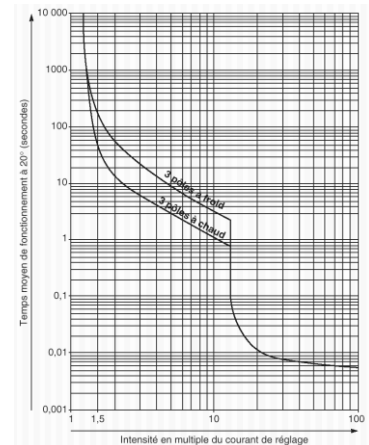
4.3.3 Protection des moteurs asynchrones.

On appelle **départ moteur** l'association d'un disjoncteur et d'un contacteur, elle assure la protection du moteur contre les court-circuits les surcharges et sa commande à distance (sous certaines conditions le sectionnement).

Pour les plus simples il n'y a qu'un type de courbe de déclenchement qui s'apparente au type D avec un rapport $I_m/I_r=13$, ce fonctionnement magnétique s'adapte parfaitement au courant de démarrage supérieur à 7 fois I_n .

Les plus complexes disposent des réglages de I_r et I_m et intègrent la commande fonctionnelle ainsi que des possibilités de dialogue au moyen de contacts secs.

Extrait du catalogue Legrand 2002 :



4.4 Sélectivités (§ 535-1).

Il y a **sélectivité** si un défaut, survenant en un point quelconque d'une installation, est éliminé par l'appareil de protection placé immédiatement en amont du défaut et par lui seul.

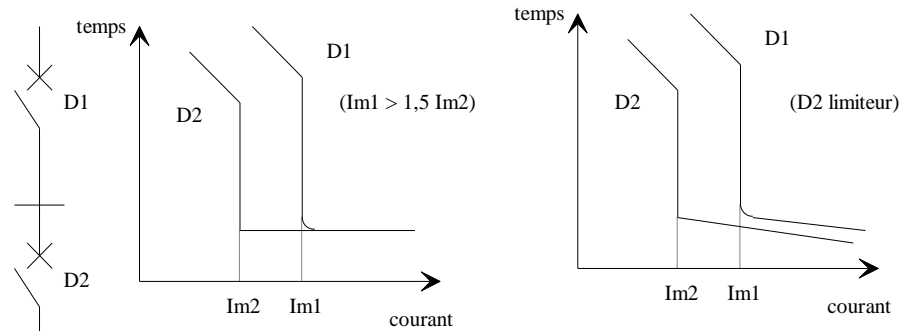
La sélectivité entre deux disjoncteurs A (amont) et B (aval) est **totale** si B fonctionne pour toute valeur de court-circuit jusqu'au courant de court-circuit franc triphasé au point où il est placé.

La sélectivité est **partielle** si B fonctionne seul jusqu'à un courant de court-circuit présumé I_{cc} inférieur à I_{ccB} . Au delà de cette valeur, A et B fonctionnent simultanément.

4.4.1 Sélectivité ampère métrique.

Ce type de sélectivité repose sur le décalage ampère-métrique des courbes de déclenchement donc sur la différence des calibres et des courants de fonctionnement instantanés entre amont et aval. On considère que si $I_m(A) > I_m(B)$ alors il y a sélectivité. Cette sélectivité reste cependant partielle car si $I_{cc} > I_m(A)$ les deux

dispositifs déclenchent. Ce mode de sélectivité est donc réservé aux circuits terminaux dans lesquels les courants de court-circuits sont faibles.



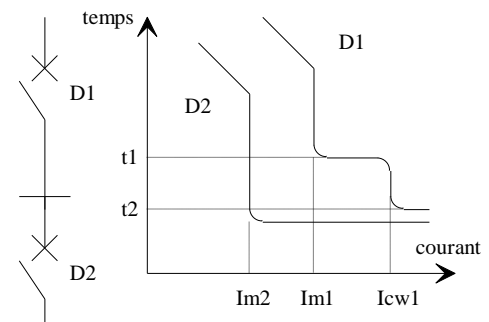
4.4.2 Sélectivité chronométrique.

La sélectivité chronométrique est un complément à la sélectivité ampère métrique, elle consiste à retarder l'ouverture du disjoncteur amont pour permettre au disjoncteur aval d'éliminer le défaut.

Comme les temps de déclenchements magnétiques sont tous semblables, il faut que le disjoncteur amont dispose d'un retard intentionnel ou soit de catégorie B, auquel cas on repousse la sélectivité jusqu'à I_{cw1} .

Il faut de plus que, pendant le retard, la partie de l'installation parcourue par le courant de défaut supporte la contrainte thermique ...

En catégorie B la zone de fonctionnement à court retard se caractérise par son **courant assigné de courte durée admissible** (I_{cw}). Ce retard intentionnel qui peut être réglable permet entre autre d'assurer une relative sélectivité sur les courts-circuits éloignés donc faibles en laissant à un disjoncteur aval le temps de déclencher.



5 Relais thermiques.

5.1 Généralités.

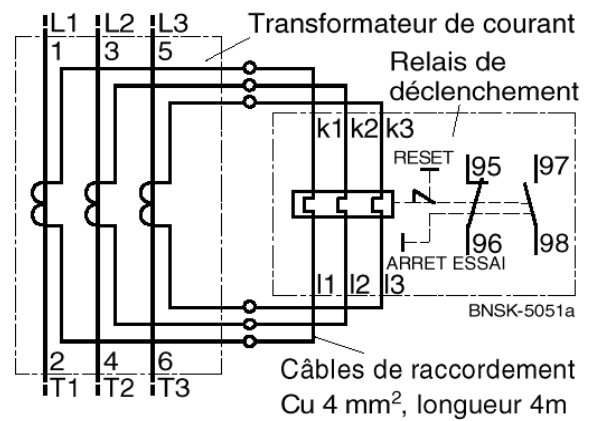
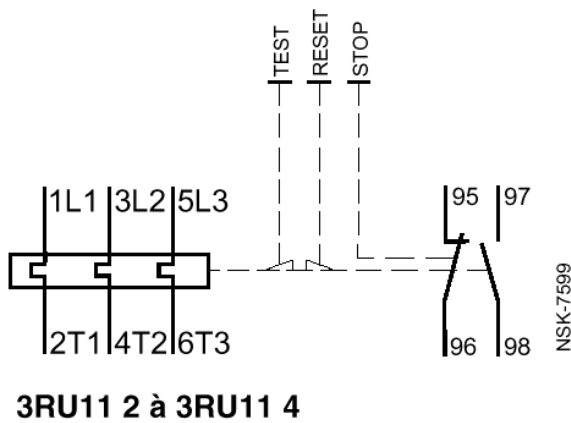
5.1.1 Fonctionnement

Les relais thermiques utilisent la propriété des bilames formées de deux lames minces de métaux ayant des coefficients de dilatation différents¹³. Celles-ci s'incurvent en fonction de la température. Le courant à contrôler modifie la température grâce à l'effet joule (effet direct ou indirect selon que le courant circule dans la bilame ou autour) et déforme ainsi la bilame. Un dispositif mécanique permet alors, au delà d'un certain seuil, de basculer un ou plusieurs contacts.

5.1.2 Symbole.

Les exemples suivants sont extraits du catalogue Siemens 1999.

¹³ Les alliages utilisés sont : fer-nickel et invar.

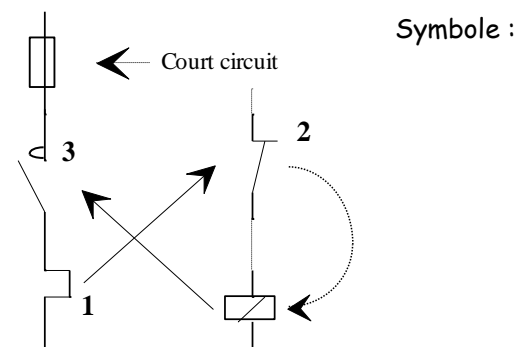


5.1.3 Mise en oeuvre.

Comme les relais thermiques ne sont pas des organes de coupure, il est essentiel de les associer à un contacteur au moins qui ouvre le circuit en défaut et accessoirement assure la mémorisation du défaut.

Cette association s'appelle **un discontacteur**.

Il est à remarquer que cette association doit être accompagnée d'une protection contre les courts-circuits.

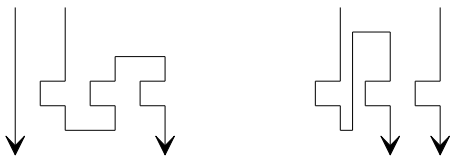


5.1.4 Déséquilibre de phase.

En cas de surcharge équilibrée sur les trois phases les trois bilames se déforment et il y a ce qu'on appelle déclenchement triphasé, c'est le cas lors d'un grippage de moteur ou d'un mauvais raccordement de la plaque à bornes.

En revanche, une rupture de phase n'entraîne pas de déclenchement grâce aux bilames ... alors que cet incident peut être néfaste au bon fonctionnement d'un système surtout si celui-ci alimente un moteur triphasé.

Pour détecter ce type de défaut (différent d'une surcharge) on utilise un « dispositif différentiel » mécanique qui réagit en fonction de la différence des déformations des bilames, voir ci-dessous :



Il faut surtout retenir que les 3 bilames d'un relais thermique tripolaire doivent être parcourus par les mêmes courants en fonctionnement normal si le relais est équipé d'un **dispositif différentiel** (ce qui est le cas généralement). Cela entraîne les précautions de câblage suivantes dans le cas des moteurs monophasés ou continus :

5.2 Caractéristiques.

5.2.1 Choix.

Le choix d'un relais thermique s'effectue en fonction de l'**intensité de réglage** qui doit satisfaire aux deux conditions rappelées ci après :

I_r doit être supérieure au courant d'emploi **I_b** du circuit qu'il protège,

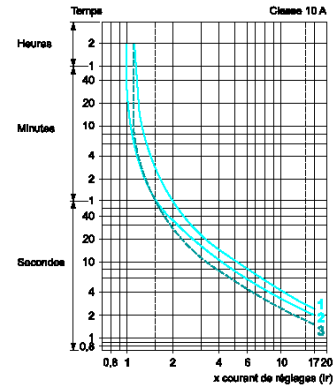
I_r doit être inférieure au courant maximal admissible **I_z** dans les conducteurs du circuit, donc :

$$I_b < I_r < I_z$$

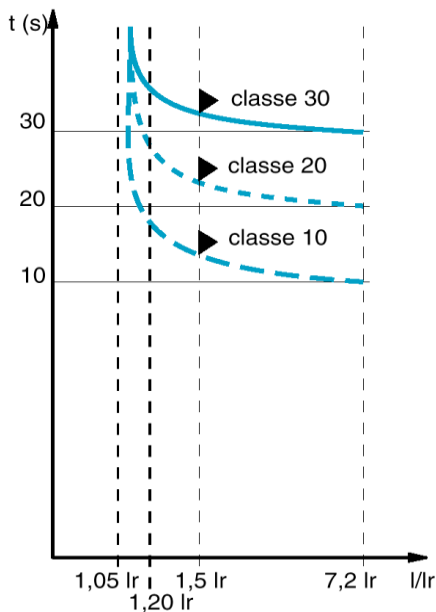
Dans le cas des démarrages de moteurs asynchrones triphasés, il faut, de plus, tenir compte du temps de démarrage et donc de la classe de déclenchement.

5.2.2 Calibre.

Le calibre I_n est le courant maximal supporté indéfiniment par l'appareil, à ne pas confondre avec le courant de réglage I_r qui est le courant au-delà duquel le relais déclenche. En fait l'intensité qui entraîne effectivement le déclenchement vaut $1,15.I_r$.



5.2.3 Classes de déclenchement.



On différencie plusieurs classes de relais thermique en fonction de la position verticale de leur courbe de déclenchement.

En fonction du temps de déclenchement à $7,2.I_r$ ¹⁴, la norme CEI 947-4 (internationale) définit les classes suivantes :

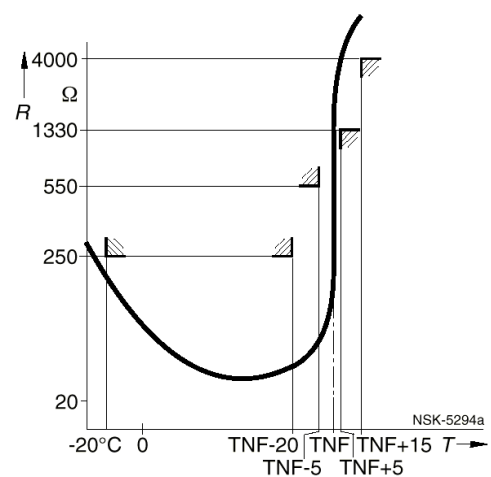
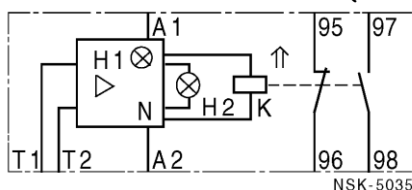
classe	$1,05 I_n$	$1,2 I_n$	$1,5 I_n$	$7,2 I_n$
10 A	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ min.}$	$2 \leq t \leq 10 \text{ s}$
10	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 4 \text{ min.}$	$4 \leq t \leq 10 \text{ s}$
20	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 8 \text{ min.}$	$6 \leq t \leq 20 \text{ s}$
30	$t > 2 \text{ h}$	$t < 2 \text{ h}$	$t < 12 \text{ min.}$	$9 \leq t \leq 30 \text{ s}$

5.3 Autres protections contre les surcharges.

5.3.1 Sonde à thermistances PTC.

Ce système ne tient pas compte du courant absorbé par le circuit, mais directement de sa température. Des sondes à thermistances à coefficient de température positif sont noyées dans les enroulements du stator du moteur. Leur résistance varie en fonction de la température comme ci contre.

Un dispositif électronique mesure les variations de résistance de la sonde (montée dans un pont) et agit sur un relais de sortie équipé, selon les modèles, de contact à ouverture ou à fermeture. (Voir ci-dessous)



TNF signifie :
Température Nominale de Fonctionnement

5.3.2 Applications.

¹⁴ Correspondant à la pointe d'intensité au démarrage d'un moteur asynchrone.

Un moteur équipé de la sorte est protégé contre l'échauffement quel qu'en soit la cause et notamment lorsque l'intensité absorbée n'en est pas à l'origine : défaut de ventilation, démarrages fréquents (qui échauffent le moteur anormalement), température ambiante trop élevée etc ...

Il faut remarquer que la protection des câbles d'alimentation n'est plus assurée, c'est pourquoi on associe généralement aux sondes un relais thermique comme précédemment.

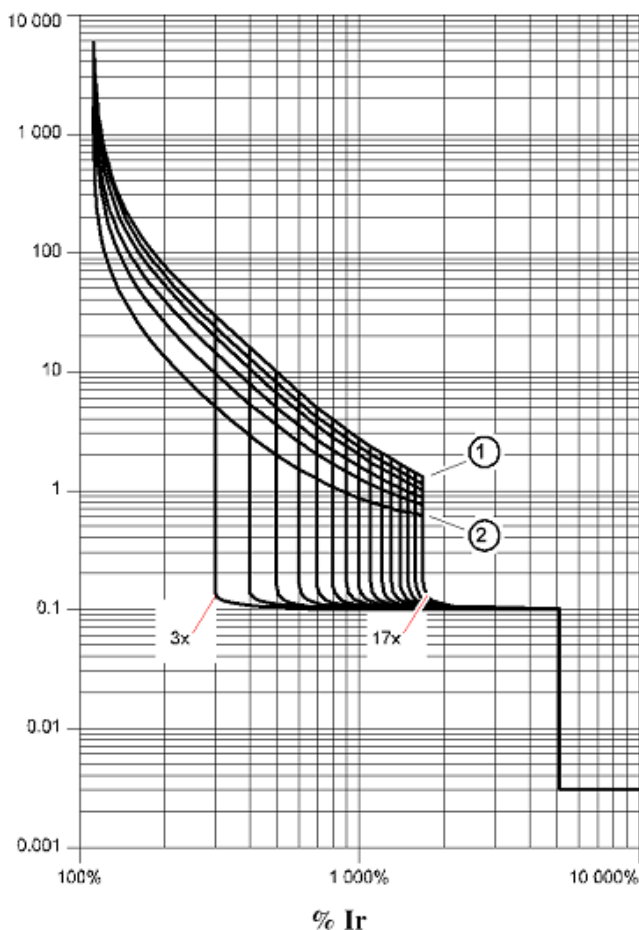
5.3.3 Cas des démarreurs et variateurs de vitesse électroniques.

Tous les modulateurs d'énergie actuels pour la commande des moteurs disposent d'une image du courant absorbé.

Muni de cette information et d'un système de calcul même sommaire, il suffit alors de déterminer, en temps réel, la grandeur (I^2t) afin d'évaluer l'échauffement des enroulements du moteur. La comparaison avec un seuil défini par le calibre (ou le courant de réglage) permet alors d'avertir ou de déclencher en cas de dépassement.

Ci-dessous : la courbe de « détection intégrée » réglable d'un départ pour moteur asynchrone triphasé de type Tésys équipé d'une unité de contrôle LUCMO5BL.

La courbe représente le temps de déclenchement en seconde en fonction de la surintensité exprimée en % du courant de réglage.



- (1) correspond à la classe 30
(2) correspond à la classe 5

Ci-dessous l'écran permettant de régler l'unité de contrôle afin de l'adapter au moteur qu'elle est sensée protéger :

On peut régler Ir et la classe de déclenchement, Mais aussi :

- le temps de réarmement thermique,
- le mode de réarmement

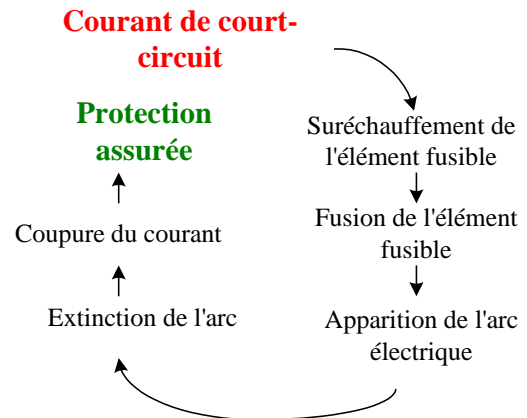
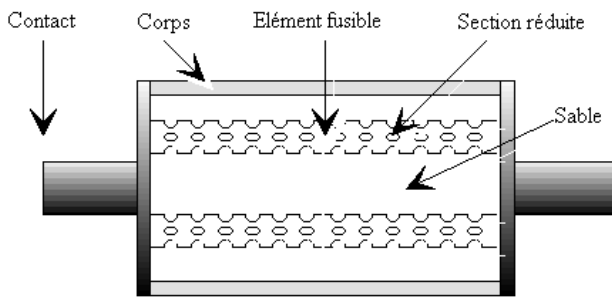
6 Protection contre les courts-circuits à éléments fusibles.

6.1 Description d'un fusible.

6.1.1 Définition.

Un fusible est un appareil qui, par la fusion d'un ou plusieurs de ses éléments conçus et calibrés à cet effet, ouvre le circuit dans lequel il est installé en interrompant le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant une valeur donnée.

6.1.2 Principe de fonctionnement (et constitution).



6.2 Caractéristiques.

6.2.1 Catégories d'emplois.

Les fusibles sont classés en 6 grands types représentant leurs caractéristiques de fusion selon CEI, VDE et UTE. On parle aussi de **catégories d'emplois**, elles sont désignées par un groupe de deux lettres :

première lettre :	g :	zone de coupure étendue,	(=> surcharge et court-circuit)
(domaine de protection)	a :	zone de coupure restreinte,	(=> court-circuit)
deuxième lettre :	G :	usage général,	(=> câbles et lignes)
(domaine d'utilisation)	M :	circuit inductif,	(=> appareillage ...)
	R :	semi-conducteur.	

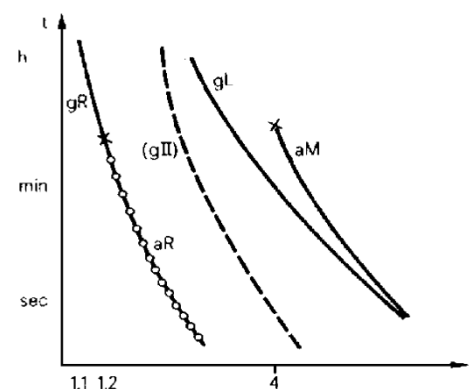
Les courbes de déclenchement des différents types de fusibles couramment utilisés sont sommairement illustrées sur le graphique ci-contre =>

On repère entre autre que :

Les fusibles *_R* fondent « rapidement ».

Les fusibles *aM* ne protègent pas contre les surcharges.

(l'appellation *gII* n'existe plus).



6.2.2 Tension et courant assignés.

(On parle parfois de tension et courant nominaux)

6.2.3 Pouvoir de coupure.

C'est le courant maximal que le fusible est capable d'interrompre sans que la tension de rétablissement ne provoque un réamorçage de l'arc.

Les cartouches fusibles industrielles ont des pouvoirs de coupure de l'ordre de la centaine de kA. Elles sont souvent employées pour renforcer le PdC de composants moins performants situés sur la même ligne.

E.D.F. parle dans ces cas là de fusible *aD* pour accompagnement disjoncteur.

7 Annexes.

7.1 Annexe 1 : exemple de calcul Schneider.

Exemple			
schéma	partie de l'installation	résistances (mΩ)	réactances (mΩ)
	réseau amont $S_{K0}^{(1)} = 500000 \text{ kVA}$	$R1 = \frac{(1,05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0,1$ $R1 = 0,035$	$X1 = \frac{(1,05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0,995$ $X1 = 0,351$
	transformateur $S_{nt} = 630 \text{ kVA}$ $U_{kr} = 4 \%$ $U = 420 \text{ V}$ $P_{cu} = 6\,300 \text{ W}$	$R2 = \frac{6\,300 \times 420^2 \times 10^{-3}}{630^2}$ $R2 = 2,8$	$X2 = \sqrt{\left(\frac{4}{100} \times \frac{420^2}{630}\right)^2 - (2,8)^2}$ $X2 = 10,84$
	liaison (câbles) transformateur disjoncteur $3 \times (1 \times 150 \text{ mm}^2)$ Cu par phase $L = 5 \text{ m}$	$R3 = \frac{18,51 \times 5}{150 \times 3}$ $R3 = 0,20$	$X3 = 0,09 \times \frac{5}{3}$ $X3 = 0,15$
	disjoncteur rapide M1	$R4 = 0$	$X4 = 0$
	liaison disjoncteur départ 2 barres (CU) $1 \times 80 \times 5 \text{ mm}^2$ par phase $L = 2 \text{ m}$	$R5 = \frac{18,51 \times 2}{400}$ $R5 = 0,09$	$X5 = 0,15 \times 2$ $X5 = 0,30$
	disjoncteur rapide M2	$R6 = 0$	$X6 = 0$
	liaison (câbles) tableau général BT tableau secondaire $1 \times (1 \times 185 \text{ mm}^2)$ Cu par phase $L = 70 \text{ m}$	$R7 = 18,51 \times \frac{70}{185}$ $R7 = 7$	$X7 = 0,13 \times 70$ $X7 = 9,1$

Qualité de la tension



(Notes)

1 Position du problème.

1.1 Description.

Il a été vu précédemment que la qualité de l'énergie dépendait en fait de trois paramètres. Celui qui semble prépondérant concerne la qualité de la tension fournie par le distributeur.

Comment peut-on caractériser la tension fournie en France sur le réseau basse tension triphasé classique ?



$$v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t \pm 2\pi/3)$$

4 paramètres apparaissent clairement dans la formule de la tension en alternatif triphasé :

l'amplitude,	230 V ou 400 V entre phases (depuis le 29/05/86). (+6%/-10% NFC 15100 §313-1-1) (+10%/-15% EN50160)
la forme	sinusoïdale (ou cosinus c'est pareil !).
la fréquence (contenue dans la pulsation)	f=50 Hz ($\omega=2\pi f$ est la pulsation).
enfin l'équilibre entre les phases	+/- $2\pi/3$.

1.2 Perturbations ...

1.2.1 Remarque.

Dès que l'un de ces paramètres est altéré, c'est l'ensemble de la tension qui est perturbé et par voie de conséquence **la qualité de l'énergie** fournie !

Cependant, l'inter actions des perturbations entre elles rend l'étude complexe.

On essaiera donc par la suite de ne les envisager qu'une par une, en les considérant indépendantes.

1.2.2 Classification.

En se basant sur les 4 paramètres pouvant altérer la tension, on va développer succinctement les perturbations suivantes : déséquilibres, problèmes de fréquence et de forme (peu importants) pour nous attarder sur les perturbations de l'amplitude de la tension.

1.3 Déséquilibres.

Pour quantifier le déséquilibre d'un installation, on parle de composante directe (U_+ ou U_d) et inverse (U_- ou U_i)¹ du réseau et on calcule U_-/U_+ (%). Que ce soit au niveau mondial ou européen les normes précédentes limitent ce déséquilibre à :

$$\frac{U_-}{U_+} (\%) < 2$$

C'est généralement le cas en ce qui concerne la tension fournie « à vide », en cas de **déséquilibre hérité**² il faut donc se référer au document sur la qualité du courant.

¹ Voir éventuellement en cours de sciences appliquées ...

1.4 Perturbations de fréquence.

1.4.1 Généralités.

La fréquence est de 50 Hz en France et dans la plus grande partie de l'Europe³. Cette fréquence est très stable au sein du **réseau synchrone** européen. En revanche, en cas de **réseau isolé** ou de taille réduite il n'en est pas de même ... Le GTR responsable (RTE) veille donc à ce que les vendeurs indépendants qui injectent leur production dans le réseau respectent leurs engagements ...

1.4.2 Caractéristiques.

Au niveau mondial (IEC 1000-2-1/2) la fréquence doit rester dans une plage de 49 à 51 Hz,

Au niveau européen (EN 50160) cette plage devient 49,5 à 50,5 Hz en moyenne.⁴

En France la tolérance est de +/- 2 %.

Pour info il est bon de se rappeler que les états unis ont du 60 Hz et que le japon du 50 et du 60 Hz ...

1.5 Problèmes d'harmonique.

Comme précédemment, le problème des harmoniques de tension est quasiment négligeable sur le réseau national en raison de la très forte puissance de court-circuit de celui-ci.

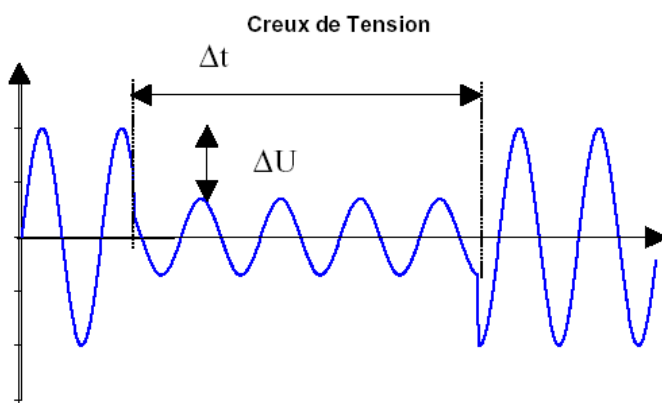
Sauf quelques cas rares (voir TD), ce problème sera donc laissé de côté pour l'instant.

2 Amplitude.

L'amplitude est le paramètre le moins fiable de la tension. C'est celui qui est le plus souvent dégradé.

2.1 Creux de tensions ou coupures brèves.

2.1.1 Définition.



Ils sont caractérisés par :

leur **profondeur** ΔU ,

leur **durée** Δt .

La norme EN50160 fixe la profondeur minimale à 10 % de la tension nominale et la durée à moins de 3 mn (1 mn pour la CEI).

Les coupures brèves sont un cas particulier, et les coupures longues doivent donc durer plus de 3 mn.

2.1.2 Causes.

Les creux de tensions proviennent généralement d'appels de courant conséquents, il s'agit donc de **perturbations héritées**. Les causes peuvent être multiples :

Couplage de transformateur HTA (courant à la mise sous tension = $10 \times I_n$, quelques 100ms),

Couplage de condensateurs HTA (courant d'appel = $100 \times I_n$, quelques ms),

Courts-circuits entraînant des chutes de tension importantes.

Fonctionnement d'un disjoncteur shunt⁵.

² C'est-à-dire lié à la charge, c'est un déséquilibre des tensions qui apparaît quand on fait circuler un courant.

³ (revoir les cours sur la production et le transport de l'énergie électrique).

⁴ calculée sur 10 s pendant 99,5 % de l'année.

⁵ Voir cours d'archive sur la HTA ...

Les coupures brèves sont généralement liées aux manœuvres sur le réseau HTA ou supérieur : réorganisation du réseau suite à un défaut ou ré enclenchement après un défaut sur ligne aérienne. (Voir le cours sur la distribution HTA : protection d'un poste source).

Très souvent ces perturbations sont peu visibles car le réseau continue d'être « alimenté » par les machines raccordées qui fonctionnent en génératrice ou les condensateurs qui font tampon ...

2.1.3 Inconvénients majeurs.

Le problème devient crucial pour les composants qui nécessitent une tension minimale de maintien comme :

les contacteurs	tension de bobine < tension de retombée	ouverture,
les moteurs asynchrones	couple moteur < couple résistant	décrochage,
les lampes à décharge	extinction des lampes	ré allumage retardé.

Les charges informatiques perte de données ou de contrôle ...

Ces exemples montrent en plus la transformation d'un creux de tension en coupure brève, ou longue.

2.1.4 Remèdes possibles.

Au niveau du **réseau de distribution**, la responsabilité est celle du GTR et repose essentiellement sur une bonne gestion de la télé conduite et une augmentation de la **puissance de court-circuit**.

Au niveau du **client**, il faudra préconiser l'emploi de **démarrateurs progressifs** ou de **relais statiques intelligents**.

De plus il peut être recommandé de **séparer** l'alimentation des circuits de contrôle ou de commande (plus sensibles) des circuits de puissance (perturbateurs).

L'alimentation des circuits de contrôle sera alors renforcée (batteries, condensateurs etc ..).

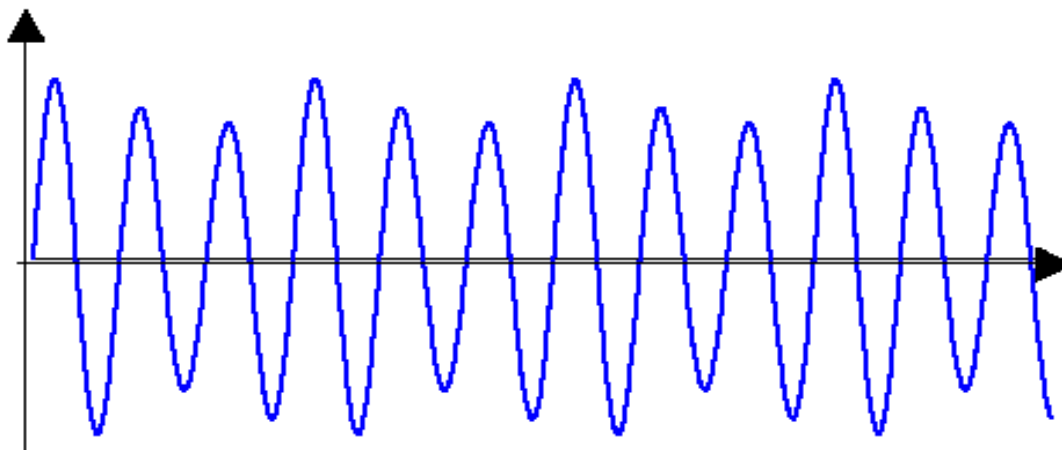
2.1.5 Coupures longues.

On a vu que souvent un creux de tension peut dégénérer en coupure brève voire longue ... Les stratégies de protection changent alors⁶.

2.2 Flicker.

2.2.1 Définition.

Le phénomène de flicker pourrait être considéré comme un creux de tension faible (moins de 10 %) et lent ($f < 25\text{HZ}$) ...



⁶ Se référer au document sur la disponibilité de l'énergie

2.2.2 Causes

Les causes sont encore une fois **héritées** puisque elles sont liées à des appels de courant importants et répétitifs. Les récepteurs **pollueurs** sont généralement des fours à arc ou des systèmes de chauffage alimentés par des **gradateurs à train d'ondes**.

Dès lors que la chute de tension entraînée dépasse 1 %, la gêne visuelle (papillotement de l'éclairage) est perceptible⁷.

2.2.3 Remèdes possibles.

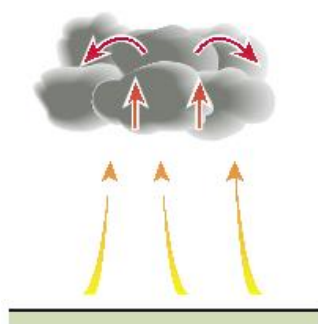
Les remèdes sont de deux types.

Si on s'attaque au **pollueur** on peut : modifier le cycle du modulateur, augmenter la section de son alimentation,

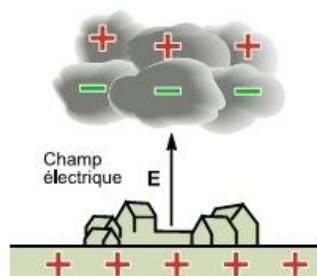
Si on protège le **pollué** on peut : utiliser des lampes insensibles aux variations de tension (ballast électronique)
Les raccorder au plus près de la source
(augmentation de la puissance de court-circuit)⁸

2.3 Origine atmosphérique. (§443).

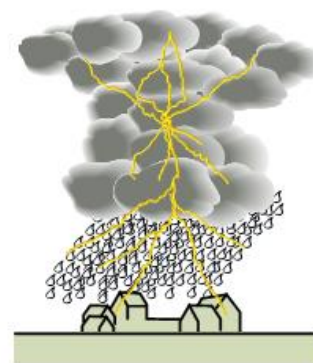
2.3.1 Problème.



Phase de charge



Phase de développement



Phases de maturité et d'effondrement

La foudre est un amorçage entre un nuage chargé d'électricité et la terre. Il s'en suit une décharge électrique sous forme d'un courant électrique de 20 à 200 kA pendant un temps très court (maximum 3 secondes).

Les effets de ce courant important sont de plusieurs types.

La circulation du courant provoque un dégagement de chaleur qui peut entraîner des brûlures au point de contact ou même des incendies.

Les efforts électrodynamiques⁹ peuvent entraîner eux des déformations mécaniques allant jusqu'à la destruction des « conducteurs » parcourus, ou même, parfois, simplement à côté.

2.3.2 Principes généraux. (§534).

Les deux moyens de protection classiques sont les paratonnerres¹⁰ et les parafoudres, seuls ces derniers sont abordés dans ce document.

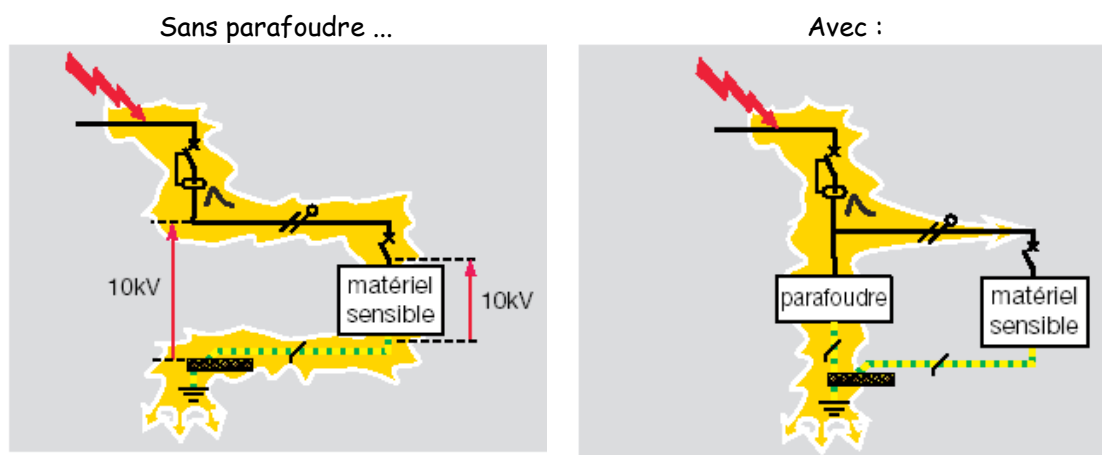
⁷ Faire absolument le TD d'application concernant ce sujet.

⁸ Cette méthode est de manière générale toujours préférable !

⁹ Voir le cours de sciences appliquées sur le magnétisme et les forces de Laplace.

¹⁰ Un paratonnerre écoule la foudre à la terre. (Rien à voir avec le tonnerre !)

Un parafoudre est en fait un limiteur de surtension, il protège une installation en déviant l'écoulement de la foudre à la terre pour éviter les appareils sensibles.



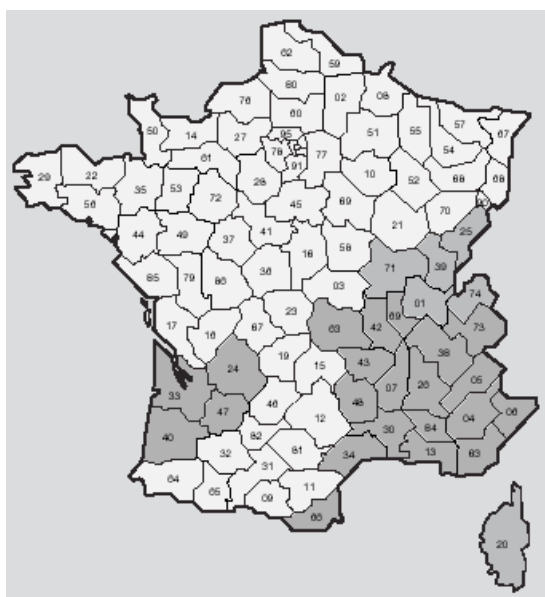
Documentation Hager

2.3.3 Choix¹¹.

La méthode de protection se déroule en deux temps.

Il faut, dans un premier temps, déterminer si l'installation d'un parafoudre est obligatoire ou non.

La procédure à suivre est décrite ci-dessous :



La **densité de foudroiement** Ng d'une région est représentée ci-contre pour la France.

C'est le nombre de coups de foudre au km² par an, est obtenue en divisant le niveau kéraunique par 10.

Le **niveau kéraunique** est le nombre de fois où le tonnerre a été entendu dans l'année, noté « Nk »

En fonction de Ng ou Nk et des caractéristiques du bâtiment on peut déterminer si l'installation d'un parafoudre est obligatoire ou non.

Caractéristique Alimentation du bâtiment	Densité de foudroiement (Ng) niveau kéraunique (Nk)	
	Ng ≤ 2,5 Nk ≤ 25 (AQ1)	Ng ≥ 2,5 Nk > 25 (AQ2)
Bâtiment équipé d'un parafoudre	obligatoire ^{(2) (3) (4)}	obligatoire ^{(2) (3) (4)}
Alimentation BT par une ligne entièrement ou partiellement aérienne ⁽⁵⁾	non obligatoire ⁽⁶⁾	obligatoire ⁽⁷⁾
Alimentation BT par une ligne entièrement souterraine	non obligatoire ⁽⁶⁾	non obligatoire ⁽⁶⁾
L'indisponibilité de l'installation et/ou des matériels concerne la sécurité des personnes ⁽¹⁾	selon analyse du risque	obligatoire

¹¹ Une application est disponible qui s'appuie sur l'indispensable publication UTE C15-443 !

Une fois que le parafoudre s'est révélé obligatoire, son choix « technique » s'effectue en prenant en compte plusieurs paramètres :

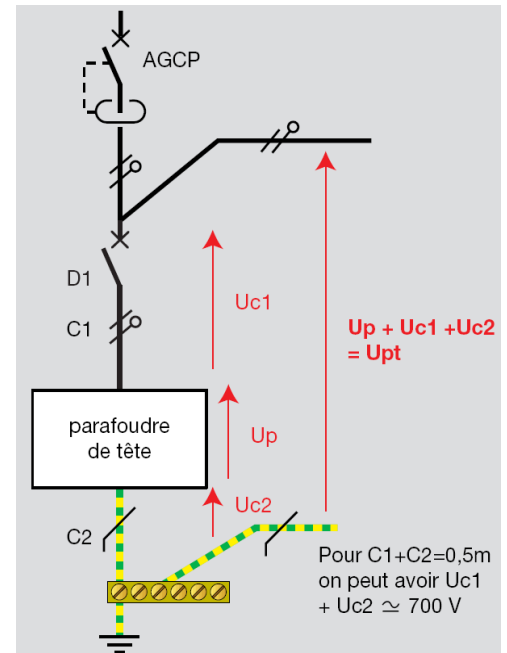
La nature du site où se situe l'installation à protéger
(localisation géographique, relief, type d'alimentation, surface, hauteur etc ...).

La sensibilité des équipements à protéger
(sensibilité, prix, conséquence ...).

2.3.4 Précaution de câblage :

Il faut bien entendu faire en sorte que la tension résultante aux bornes du parafoudre ne soit pas dangereuse pour les appareils protégés.

Voir ci-contre un exemple de précaution de câblage à respecter !

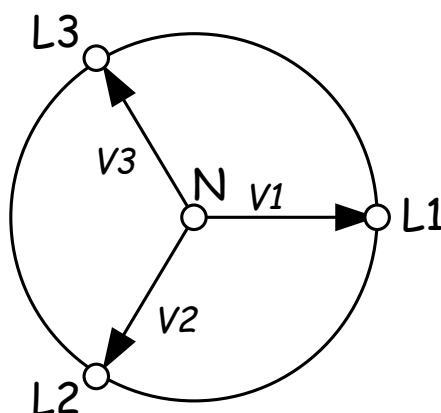


2.4 Surtensions temporaires (§ 442).

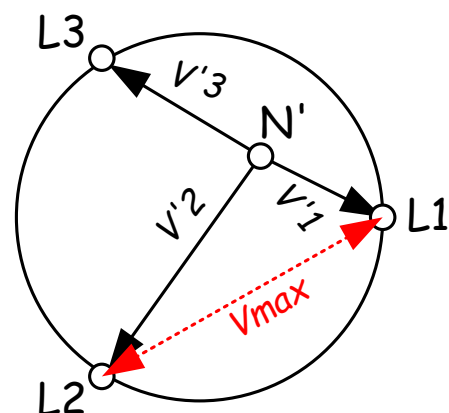
2.4.1 Définition.

Ces surtensions sont obtenues en cas de rupture du neutre ou de défaut d'isolement.

Réseau triphasé déséquilibré avec neutre



Réseau triphasé déséquilibré sans neutre

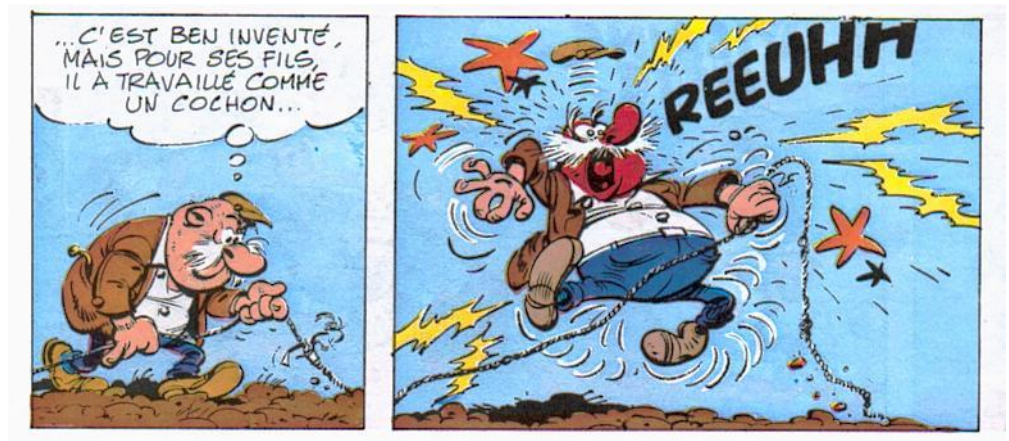


Comme dit auparavant ces surtensions apparaissent en cas de défaut, il s'agit de perturbations héritées.
(Voir à ce sujet les deux essais réalisés sur le sujet.)

2.4.2 Normalisation.

La NFC 15-100 décrit précisément les risques encourus en cas de défaut d'isolement.

Schémas de liaison à la terre



(Notes)

1 Introduction.

Il a été vu précédemment que la protection des personnes contre les contacts indirects pouvait être assurée par un contrôle efficace du niveau d'isolement de l'installation, s'il s'accompagnait d'une coupure **automatique** de l'alimentation **avant** le contact.

1.1 Remarques :

1.1.1 Domaines ...

NOTA BENE : ce document s'appuie essentiellement sur les parties de la NFC 15-100 (§4 et 5 notamment) qui traitent des schémas de liaison à la terre HORS installations et locaux spéciaux (dont les LOCAUX D'HABITATION), pour ces derniers, il faut se référer au §7.

De plus la protection des personnes contre les contacts indirects est traitée au titre §3 de la norme ...

1.1.2 Emplois de la TBTS.

Lorsque le risque est très élevé, piscine, salle d'eau (etc ...) l'alimentation se fait sous très basse tension fournie par un transformateur de sécurité. On rappelle qu'il comporte alors un écran métallique relié à la terre entre primaire et secondaire et que la tension secondaire est inférieure à la tension limite de sécurité¹ UL qui vaut 50 V. De plus l'ensemble du circuit alimenté en TBTS doit présenter une isolation de classe 2.

Matériel de classe II.

Ce matériel double isolation ne doit jamais être relié à la terre, on considère que la double isolation suffit à assurer la sécurité des personnes sans coupure automatique de l'alimentation.

1.2 Schémas de liaisons à la terre en basse tension.

1.2.1 Petit historique.

Dans les années 20/30, le nombre d'accident étant de plus en plus élevé il est décidé le 4 août 1935 de raccorder à la terre toutes les masses accessibles d'une installation. En cas de défaut d'isolement sur une phase par exemple la masse en défaut reste au même potentiel que la terre. La tension de contact est donc quasiment nulle et sans danger.

Dans un second temps (le 14 novembre 1962 !), on impose de contrôler en permanence l'isolement d'une installation afin d'améliorer l'efficacité de la décision de 1935.

Depuis, c'est la norme NFC 15-100 (Chap. 41 et suivants), sans cesse remaniée et améliorée, qui définit les règles de sécurité dans les installations du domaine de la basse tension.

1.2.2 Principes fondamentaux. (§411-1)

la protection contre les contacts indirects est assurée par : des liaisons de protection associées à la coupure automatique de l'alimentation conformément aux §411.3 à §411.6.

Il en résulte que cette mesure de protection repose sur l'association de deux conditions :

a) la réalisation ou l'existence d'un circuit - dénommé "boucle de défaut" - pour permettre la circulation du courant de défaut. La constitution de cette boucle de défaut dépend du schéma des liaisons à la terre (TN, TT ou IT). Cette condition implique la mise en œuvre de conducteurs de protection reliant les masses de tous les matériels électriques alimentés par l'installation de façon à constituer une boucle de défaut.

b) la coupure du courant de défaut par un dispositif de protection approprié dans un temps dépendant de certains paramètres tels que la tension de contact à laquelle peut être soumise une personne, la probabilité de défauts et de contacts avec les parties en défaut. La détermination du temps de coupure est basée sur la connaissance des effets du courant électrique sur le corps humain et des conditions d'influences externes.

¹ Aussi appelée tension limite conventionnelle de contact § 234-4.

Cette condition implique la présence d'un dispositif de coupure automatique dont les caractéristiques sont définies suivant le schéma des liaisons à la terre TT, TN ou IT.

(§ 411-3-2-2)²

Temps de coupure (s)	$50 \text{ V} < U_0 \leq 120 \text{ V}$		$120 \text{ V} < U_0 \leq 230 \text{ V}$		$230 \text{ V} < U_0 \leq 400 \text{ V}$		$U_0 > 400 \text{ V}$	
	alternatif	continu	alternatif	continu	alternatif	continu	Alternatif	continu
Schéma TN ou IT	0,8	5	0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1
Schéma TT	0,3	5	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

1.2.3 Définition. (§312-2)

Les schémas de liaisons à la terre sont définis en basse tension par deux lettres indiquant les situations du neutre du poste de transformation et des masses de l'installation. Le schéma conditionne la boucle de défaut, le contrôle de l'isolement et donc les mesures de protection contre les contacts indirects.

1.2.4 Méthode.

Quel que soit le schéma de liaison à la terre retenu, il est vivement conseillé de suivre la démarche suivante :

Schéma structurel ou géographique,

↳ Parcours du courant de défaut, (concept de boucle de défaut)

↳ Schéma électrique équivalent simplifié,

↳ Choix d'un dispositif pour assurer $t_d < t_{max}$

1.3 Mise à la terre et PE. (§ 5-41).

(§ 131-2-2) : En liaison avec la protection contre les contacts indirects, l'utilisation de liaisons équipotentielles constitue un principe fondamental de sécurité.

Il faut être particulièrement attentif au vocabulaire employé : on différencie les termes suivants : terre ; prise de terre ; conducteur de protection ; liaison équipotentielle ; masse ...

(Voir en fin de document).

2 Régime de neutre T-T. (§ 411-5)

Ce régime est le plus connu en raison de son utilisation dans le domaine domestique et dans les installations alimentées directement à partir du réseau de distribution publique basse tension.

2.1 Principe de protection.

2.1.1 Définition (§312-2-2).

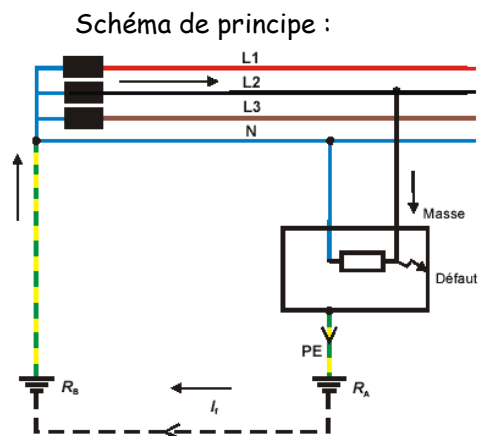
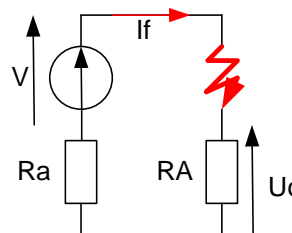


Figure 411B – Boucle de défaut en schéma TT

Le neutre du transformateur d'alimentation est relié à la terre par une prise de terre de valeur R_a .

Les masses de l'installation sont reliées à la terre par une prise de terre différente R_A .



² Attention la tension appelée U_0 dans ce tableau est la tension simple ...

2.1.2 Analyse d'un défaut.

Dès qu'un défaut d'isolement apparaît entre une phase et une masse, **reliée au conducteur de protection**, il entraîne la circulation d'un courant de défaut I_f entre phase et neutre uniquement limité par les résistances des prises de terre R_A et R_a .

Ce courant I_f est généralement faible en raison des valeurs des prises de terre (quelques ohms).

Il apparaît alors entre la masse en défaut et la terre une tension qui vaut :

$$U_c = R_A \cdot I_f$$

Si on veut assurer la protection des personnes il faut limiter cette tension à une valeur inférieure à **UL** ou respecter le temps du tableau (§ 411-3-2-2)

Conclusion : il faut un dispositif tel que : $I \text{ déclenchement} < 50/R_A$
 $T \text{ déclenchement} < 200 \text{ ms}$

Dispositif différentiel ! (§411-5-2)

2.1.3 Remarque.

Deux problèmes classiques peuvent se poser :

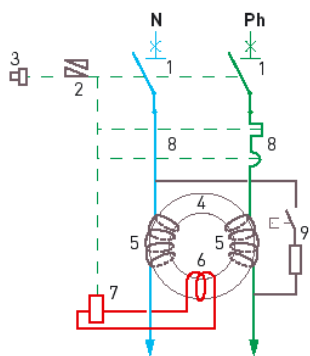
déterminer une sensibilité de DDR connaissant la valeur de la prise de terre, (utilisation de $I_{\Delta n} < 50 / R_A$.) (§ 411-5-3)

vérifier qu'un dispositif de mise à la terre assure effectivement la protection des personnes. (utilisation de $R_A < 50 / I_{\Delta n}$).

Le premier problème appartient à la phase de conception d'une installation alors que le deuxième appartient à la phase de maintenance préventive ou d'entretien.

2.2 Dispositif à courant Différentiel Résiduel. (§531-2)

2.2.1 Principe et constitution.



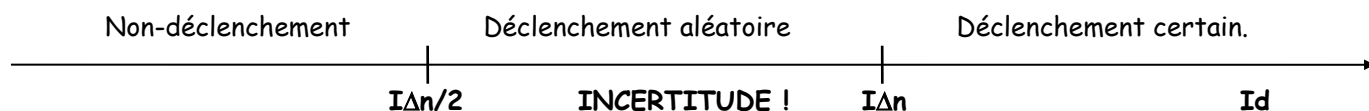
Les conducteurs de phase et du neutre sont bobinés sur un tore magnétique. En fonctionnement normal, $I_{ph} = I_n$ et il n'y a pas de champ magnétique dans le tore.

A l'apparition d'un défaut, $I_d = I_{ph} - I_n$. Ce courant I_d crée un champ magnétique B_d proportionnel à I_d .

B_d est transformé dans le circuit rouge en un courant qui alimente une bobine et donne l'ordre de déclenchement à l'appareil de coupure.

Le seuil de réglage, appelé **sensibilité** est noté : $I_{\Delta n}$.

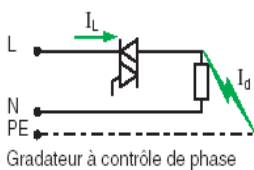
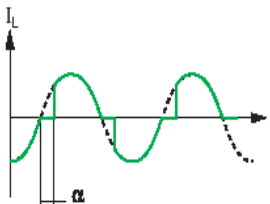
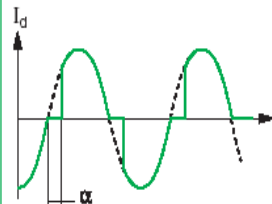
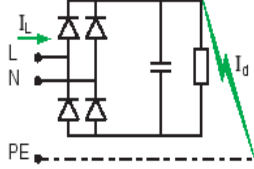
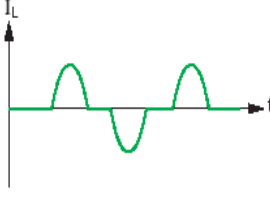
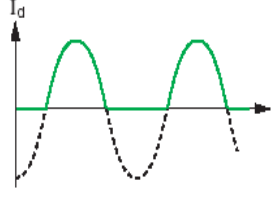
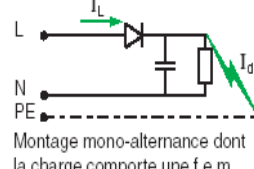
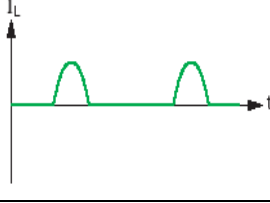
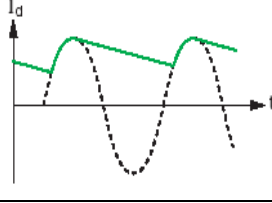
On parle de **plage de fonctionnement** pour définir la zone de déclenchement d'un DDR : (§531-2-1-3)



2.2.2 Aptitude aux fonctionnements « continus ». (§531-2-1-5)

La NFC 15-100 a classé les dispositifs différentiels en 3 types selon leur aptitude à fonctionner en présence d'une composante continue.	classe AC : différentiel sensible au seul courant résiduel alternatif
	classe A : différentiel sensible au courant résiduel alternatif, et au courant résiduel pulsé
	classe B : différentiel sensible au courant résiduel alternatif, au courant résiduel pulsé et au courant de défaut continu pur.

Remarque : Il devient donc important de se poser la question de la possibilité d'apparition de défaut « non sinusoïdal » ... Voir les exemples ci-dessous :

Types :	I en fonctionnement normal	I défaut :	Classe de DDR :
 <p>Gradateur à contrôle de phase</p>			AC ou A ou B
 <p>Montage en pont double-alternance</p>			A ou B
 <p>Montage mono-alternance dont la charge comporte une f.e.m.</p>			B

2.2.3 Choix.

Pour assurer la sécurité des personnes, il suffit de couper l'alimentation dès que la tension de contact devient supérieure à 50 V donc la sécurité est assurée si $U_c = R_A \cdot I_f < 50$, ou $I_f < 50/R_A$.

On choisit donc la sensibilité d'un DDR de manière à ce que :

$$I_{\Delta n} < 50/R_A \text{ (§ 411-5-3)}$$

Avec R_A la résistance de la prise de terre de l'installation ...

	COURANT DIFFÉRENTIEL-RÉSIDUEL MAXIMAL ASSIGNÉ DU DDR ($I_{\Delta n}$)	VALEUR MAXIMALE DE LA RÉSISTANCE DE LA PRISE DE TERRE DES MASSES (ohms)
Basse sensibilité	20 A 10 A 5 A 3 A	2,5 5 10 17
Moyenne sensibilité	1 A 500 mA 300 mA 100 mA	50 100 167 500
Haute sensibilité	$\leq 30 \text{ mA}$	> 500

(§531-2-4-2-2)

2.3 Mise en oeuvre.

2.3.1 Emplacement. (§531-2-4-2-1)

Pour toute une installation, la norme impose au minimum un DDR correctement calibré en tête. L'inconvénient majeur qui en résulte est l'absence de continuité de service (pour l'installation globale) en cas de défaut sur un départ. Il faut alors ajouter des DDR supplémentaires sur chacun des départs³.

³ (voir plus loin les problèmes de sélectivité).

On peut adapter la règle ci-dessus et supprimer le DDR de tête si :
 ceux des différents départs (équipés de DDR) se trouvent tous dans une même armoire,
 la liaison entre le disjoncteur de tête et les départs en aval (équipés de DDR) est de classe II.
 On réalise ainsi ce qu'on appelle la **sélectivité horizontale** (§535-4-2).

2.3.2 Remarque : absence de PE.

Si le conducteur de protection PE vient à être endommagé ou même supprimé, il est alors possible de protéger les personnes en installant un dispositif « **haute sensibilité** » (HS) c'est à dire tel que $I_{\Delta n} < 30 \text{ mA}$ puisque le passage de 30 mA pendant un temps très court à travers le corps humain ne présente pas de danger. Ces dispositifs HS sont recommandés dans :

- les circuits de prise de courant $I_e < 32 \text{ A}$,
- les locaux mouillés quel que soit le courant assigné d'emplois,
- les installations temporaires, chantier notamment.

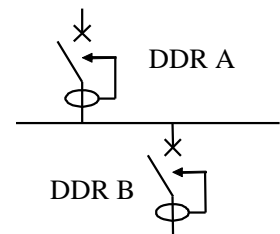
2.3.3 Sélectivité. (§535-4-3)

On a vu que la sélectivité horizontale était réalisée par l'installation d'un DDR correctement calibré sur chaque départ. (Cf TP)

Le problème de la sélectivité verticale dépend, lui des sensibilités de chacun des DDR considérés :

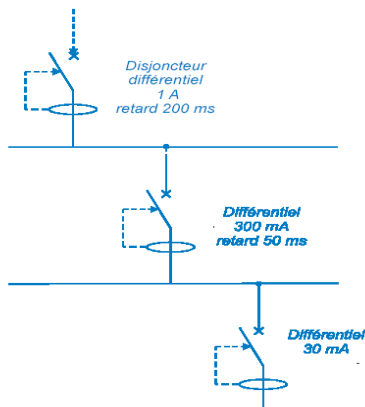
- le DDR A est de sensibilité $I_{\Delta nA}$,
- le DDR B est de sensibilité $I_{\Delta nB}$,

Les deux déclenchent sûrement au-dessus de leur sensibilité, et ne déclenchent pas en dessous de la moitié, il faut donc que : $I_{\Delta nB} < I_{\Delta nA}/2$



La NFC 15-100 considère que la sélectivité totale est assurée si les sensibilités sont dans un rapport 3 et que le dispositif amont est retardé ou « sélectif » :

$I_{\Delta nB} < I_{\Delta nA}/3$ et retard sur DDRA => sélectivité totale



Voici l'exemple proposé par la norme (figure 535F) pour illustrer la possibilité de sélectivité totale à trois niveaux.

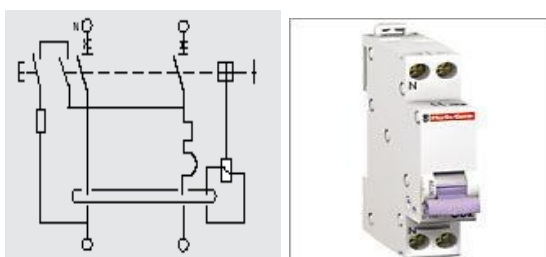
On peut remarquer que le rapport de 3 entre les différentes sensibilités est respecté d'une part et que la sélectivité chronologique est assurée par les retards introduits 50 ms et 200 ms.

Ce dernier retard n'est possible que dans le cas du régime TT avec une tension simple d'alimentation de 230 V maxi pour respecter les temps du tableau (§ [411-3-2-2](#)).

2.4 Technologie.

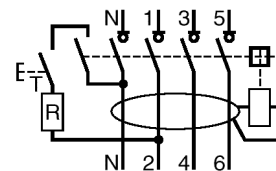
2.4.1 Dispositif modulaire ou intégré.

Sous forme modulaire ils remplissent plusieurs fonctions dont la détection différentielle.



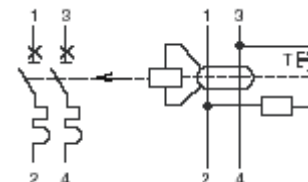
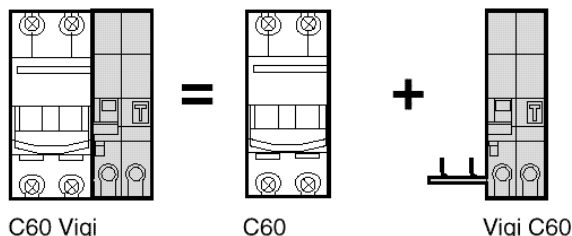
Les **disjoncteurs différentiels** assurent eux la protection des personnes (30 mA), des installations (300 mA) mais aussi la protection contre les surcharges et les courts-circuits grâce à leur dispositif magnétothermique interne.

Les interrupteurs différentiels réalisent la commande manuelle, la protection des personnes (30 mA) et des installations (300 mA) ils ont généralement une sensibilité fixe.



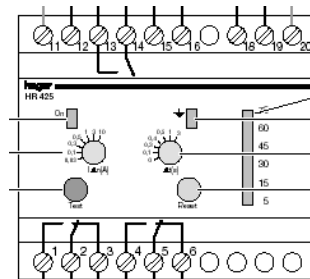
2.4.2 Bloc différentiel additif.

Sous forme de bloc additif il faut les associer à un organe de coupure automatique, généralement un disjoncteur magnétothermique. Ils intègrent dans un seul boîtier le tore de détection et le relais différentiel. Comme précédemment les sensibilités sont fixes.



2.4.3 Relais différentiel à tore séparé.

Il s'agit de composants évolués qui intègrent plusieurs fonctions :
 pré alarme : souvent $I\Delta n/2$,
 temporisation réglable,
 contact inverseur de signalisation,
 signalisation lumineuse, etc ...
 (Voir documentation spécifique)



(S531-2-1-2)

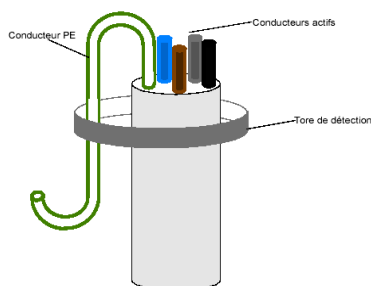


Figure 531A – Cas du double passage du PE

dans les cas où il est difficile de séparer le conducteur de protection des conducteurs actifs, câble de type 4G25 par exemple ou 5G10 comme ci contre il est autorisé de mettre en œuvre la solution présentée ci contre appelée méthode du double passage.

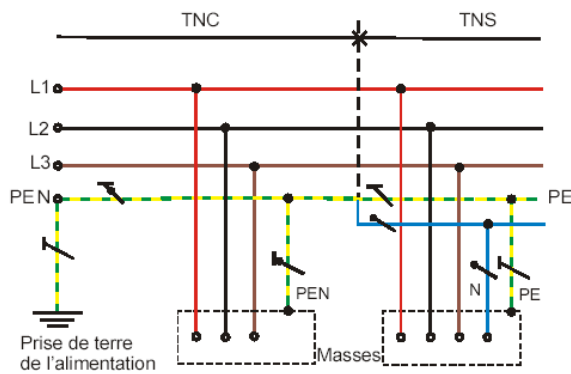
3 Régime de mise au neutre. (T-N). (§ 411-4)

Ce régime est le régime industriel par excellence en raison de sa simplicité.

3.1 Principe de protection.

3.1.1 Description. (§ 411-4-1)

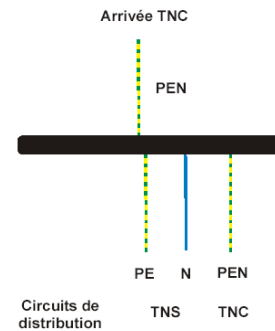
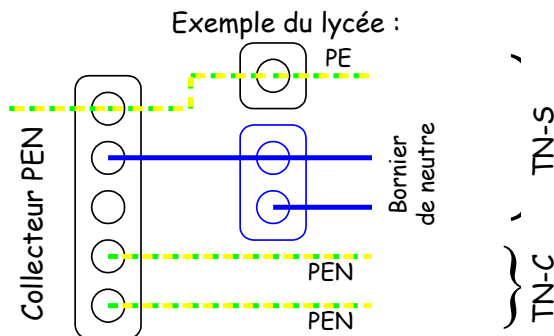
Comme précédemment le neutre du transformateur HT/BT est relié directement à la terre, mais les masses métalliques de l'installation sont reliées au point neutre par les conducteurs de protection PE (on parle de régime TN-S) ou PEN lorsque le neutre et le PE ne font qu'un (il s'agit alors du régime TN-C).



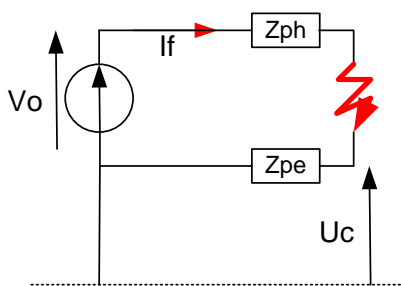
Le schéma ci-contre, issu de la norme (§312-2-1) illustre la succession des deux types de schéma TN.

Il est interdit de relier les conducteurs neutre et PE en aval d'un régime TN-S.

Ce qui signifie qu'une fois séparés, neutre et PE ne peuvent être re raccordés ensemble ...



3.1.2 Analyse d'un défaut. (§ 411-4-3)



Dès qu'un défaut d'isolement apparaît entre une phase et la masse, celui-ci n'est limité que par l'impédance des conducteurs de la phase concernée Z_{ph} et celle du conducteur de protection Z_{pe} .

Il devient un défaut phase/neutre c'est à dire un court-circuit I_{k1} ou I_{k0} .

Ce défaut entraîne une tension de contact voisine de la moitié de la tension d'alimentation simple.

Cette tension est, de toute façon, dangereuse, il faut donc éliminer le défaut dans un temps compatible avec le tableau de sécurité (§ 411-3-2-2) c'est à dire inférieur à quelques 400 ms classiquement.

Si on appelle I_m le courant de déclenchement du dispositif de protection, il faut que :

$$I_m < I_{k1} = \frac{V_o}{Z_{boucle}}$$

avec : V_o la tension simple du réseau concerné,

$Z_{boucle} = Z_{(ph+pe)}$ l'impédance de la boucle de défaut (à déterminer)

3.1.3 Détermination du courant de défaut I_{k1}^4 .

Plusieurs méthodes sont disponibles pour déterminer I_{k1} et donc pouvoir choisir I_m .

Dans la suite du document, on ne développe que la méthode conventionnelle⁵. Cette méthode fait les hypothèses suivantes :

les différents conducteurs suivent le même parcours, (longueur Ph = longueur PE)

les réactances sont négligées en dessous de 50 mm², (Z_s devient donc R_s)

la tension de source chute de 20 % lors du défaut (elle vaut donc 80% V_o),

⁴ Pour le calcul des courants de court-circuit, il faut se référer au guide UTE 15-105 (§ 434-1).

⁵ Pour les autres méthodes, se reporter au chapitre 9.

$$I_f = \frac{0,8 * V_o}{\rho * L * \left(\frac{1}{S_{ph}} + \frac{1}{S_{pe}}\right)} \text{ ou } I_f = \frac{0,8 * V_o}{\rho * L * \frac{2}{S_{ph}}} \text{ si } S_{ph} = S_{pe}$$

3.1.4 Conclusions.

En régime de **mise au neutre**, un **défaut d'isolement** se traduit par un **court-circuit** et entraîne à chaque fois une tension de contact dangereuse ! Il est donc impératif d'éliminer le défaut par coupure automatique de l'alimentation et ceci dans un délai compatible avec le tableau de sécurité c'est à dire en quelques dizaines de millisecondes.

L'appareillage de protection contre les courts-circuits (fusible ou disjoncteur) est tout à fait indiqué pour réaliser la fonction ci-dessus pour peu qu'il détecte efficacement le courant de défaut : c'est à dire qu'il déclenche assez rapidement.

Deux problèmes classiques se posent alors :

déterminer un dispositif de protection (choix d'un seuil de déclenchement instantané),

vérifier qu'un dispositif existant assure effectivement la protection des personnes.

3.2 Mise en oeuvre classique (disjoncteur).

3.2.1 Détermination de la protection.

Le problème consiste donc à déterminer le seuil de déclenchement magnétique (instantané) d'un disjoncteur de manière à ce que celui-ci permette d'éliminer le défaut. Il faut donc réaliser la condition suivante :

$$I_m = I_a < \frac{V_o}{Z_s} = \frac{0,8 * V_o}{\rho * L * \frac{2}{S_{ph}}}$$

Ce problème suppose qu'on connaisse précisément la longueur de la boucle et qu'on puisse considérer son impédance résistive (voir plus haut) ... Dans les cas contraires, on mesure l'impédance de boucle (voir en annexe) et on en déduit le seuil de déclenchement magnétique :

$$I_m = I_a < \frac{V_o}{Z_s}$$

3.2.2 Remarque : longueur inconnue ?

Le cas des circuits de prises de courant est directement lié au précédent puisque ce type de circuit est forcément de longueur incertaine (il est impossible d'interdire l'installation de rallonge par exemple) et il englobe le cas des circuits mobiles ou non fixes (canalis).

Seule l'installation d'un DDR haute sensibilité ($I_{\Delta n} < 30 \text{ mA}$) est efficace : il faut alors séparer le neutre du conducteur de protection => régime TN-S !

3.2.3 Remarque : Locaux spécifiques. (§ 531-2-3-3)

Lorsque les locaux sont à risques d'explosions (§ 424-10) ou d'incendie (§ 422-1-7), il est imposé de limiter les courants de court-circuit en insérant des DDR en guise de protection contre les contacts indirects.

3.2.4 Vérification théorique de la protection.

Cette fois ci le problème consiste à déterminer la longueur maximale de câble L_{max} qu'un dispositif de déclenchement magnétique protège efficacement.

$$L_{max} < \frac{0,8 * V_o}{\rho * I_a * \frac{2}{S_{ph}}} \text{ (avec } I_a = I_m)$$

Cette longueur peut être déterminée au [moyen de tableaux comme ceux figurant en annexe](#) et qui synthétisent les résultats des calculs ci-dessus dans des tableaux donnant la longueur maximale de câble protégée par un déclencheur magnétique donné en fonction :

de la nature du conducteur (Cu ou Al),

de la section de la phase et
du rapport des sections : $m = S_{ph} / S_{pe}$.

Exemple 1 : un disjoncteur dont le courant de déclenchement magnétique est réglé à 1250 A protège un câble «3*1*120+1*120» en cuivre.

D'après le premier tableau en annexe, la longueur protégée vaut :

$$L = 320 \text{ m.}$$

Le même câble en aluminium est lui protégé sur une longueur valant seulement :

$$L = 320 * 0,62 = 198 \text{ m.}$$

Le câble en cuivre précédent présente une section de PEN réduite de moitié, la longueur protégée vaut maintenant :

$$L = 320 * 0,67 = 214 \text{ m.}$$

Enfin, si le câble est en aluminium et présente une section réduite de moitié alors la longueur protégée vaut :

$$L = 320 * 0,42 = 134 \text{ m ...}$$

Exemple 2 : un disjoncteur de calibre 80 A et de courbe B protège une ligne de type « 4G25 » en cuivre donc et dont le PEN est de même section que les trois phases.

D'après le deuxième tableau, la longueur protégée vaut : $L = 250 \text{ m}$

Les résultats trouvés dans les tableaux peuvent différer légèrement de ceux donnés par les formules précédentes car ils tiennent compte de :

- la chaleur : (facteur 1,25 pour la résistivité),
- l'effet inductif si la section des conducteurs devient trop importante,
- la connaissance imprécise du seuil de déclenchement magnétique (+ 20 %).

3.2.5 Remèdes.

Lorsque les longueurs dépassent celle autorisée par le déclencheur magnétique, il faut :
soit augmenter le courant de défaut I_f ,
soit diminuer le courant de déclenchement magnétique I_m ,

ce qui donne les solutions suivantes :

- augmentation des sections $S_{ph} + S_{pe}$ ou S_{pe} seul,
- réalisation d'une liaison équipotentielle supplémentaire (qui diminue donc Z_{pe}),
- changement de disjoncteur ou réglage de I_m à une valeur plus faible (attention à la sélectivité !),
- installation d'un DDR comme décrit auparavant.

3.2.6 Autres moyens.

Il est possible d'assurer la protection des personnes en régime de mise au neutre en utilisant des fusibles pour détecter le défaut et couper l'alimentation. Pour cela on procède comme suit :

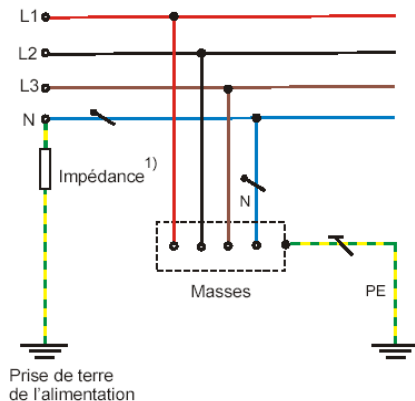
- on détermine le courant I_f grâce aux caractéristiques des conducteurs,
- on choisit le calibre et la courbe d'un fusible **de manière à éliminer I_f en moins de t_{cmax}** .

Inversement, connaissant la courbe de fusion d'un dispositif à fusible, il est possible de déterminer le courant qui entraîne un temps de fusion t_{fu} compatible avec t_{cmax} . Avec ce courant on détermine alors la longueur de câble protégée.

4 Régime de neutre impédant (ou isolé). (§ 411-6)

4.1 Principe de protection.

4.1.1 Description. (§312-2-3).



Dans ce type de schéma⁶, le neutre du transformateur d'alimentation est isolé de la terre ou relié à celle-ci par une impédance élevée ...

Les masses de l'installation sont reliées à la terre par l'intermédiaire d'un conducteur de protection PE.

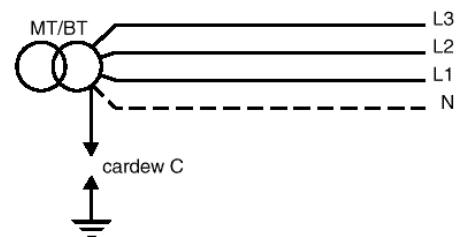
Il est possible de distribuer ou non le neutre on parle alors de régime ITAN (déconseillé) ou ITSN.

4.1.2 Problème des surtensions.

Il s'agit du premier régime où le neutre est isolé de la terre ce qui veut dire qu'une surtension d'origine atmosphérique risque de porter le potentiel du neutre à une valeur dangereuse pour les utilisateurs. Il y a donc nécessité de limiter les surtensions pouvant apparaître sur le réseau en aval du transformateur.

On utilise pour cela des limiteurs de surtension qui agissent comme des varistances (résistances variant en fonction de la tension qui leur est appliquée).

Le choix de ces limiteurs dépend du constructeur, le critère principal étant bien entendu la valeur de la tension d'amorçage (voir l'étude des protections contre les surtensions).



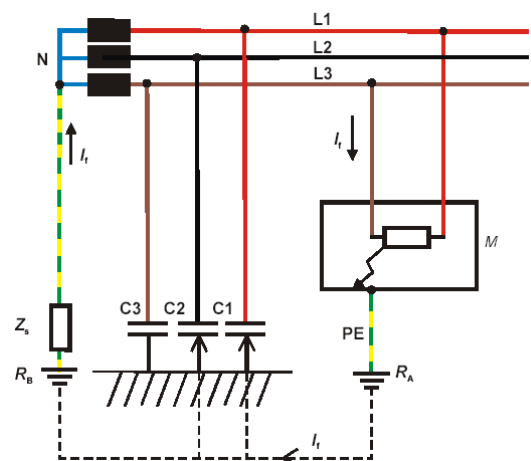
4.2 Etude d'un défaut simple.

4.2.1 Hypothèses et calculs.

On considère pour la suite que le neutre de l'installation est soit impédant (résistance neutre/terre installée connue).

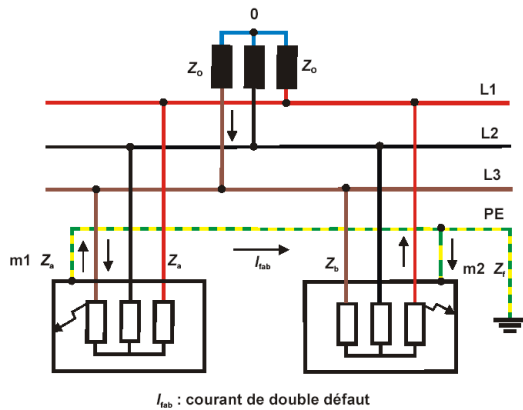
Le premier défaut d'isolement n'est jamais dangereux car le courant de défaut qui apparaît est très faible et entraîne donc une tension de contact très faible (de l'ordre du volt).

Cela permet d'éviter la coupure au premier défaut et donc d'assurer la continuité de service, mais il faut chercher à localiser et éliminer ce défaut, avant qu'un deuxième ne survienne. (voir plus loin la mise en œuvre)



Le deuxième défaut (§ 411-6-4), en revanche, doit être éliminé dans un temps compatible avec le tableau de sécurité (§ 411-3-2-2) c'est à dire inférieur à quelques 400 ms classiquement.

⁶ le plus ancien !



Si les masses sont interconnectées les règles du régime TN s'appliquent :

$$I_a < \frac{V_o}{2 * Z_{s'}}$$
 si le neutre est distribué,

$$I_a < \frac{U}{2 * Z_s}$$
 si le neutre n'est pas distribué.

avec $Z_{s'}$ constitué des conducteurs neutre et PE.

Si il existe plusieurs masses non interconnectées (prises de terre différentes) les règles du régime TT s'appliquent.

4.2.2 Conclusions.

On vient de voir qu'un défaut d'isolement n'est pas dangereux, il n'est donc pas nécessaire de l'éliminer. (Dans le cas d'un régime de neutre impédant, afin que la tension de contact reste inférieure à 50 V, il faut quand même vérifier que :

$$R_a < 50 / I_f$$

Pour éliminer le deuxième défaut, il faut qu'on connaisse précisément la longueur de la boucle et qu'on puisse considérer son impédance résistive (voir plus haut) ... Dans les cas contraires, on mesure l'impédance de boucle (voir en annexe) et on en déduit le seuil de déclenchement magnétique :

$$I_a < \frac{V_o}{2 * Z_{s'}}$$
 si le neutre est distribué ou :

$$I_a < \frac{U}{2 * Z_s}$$
 si le neutre n'est pas distribué.

Pour vérifier théoriquement de la protection, il suffit de déterminer la longueur maximale de câble L_{max} qu'un dispositif de déclenchement magnétique protège efficacement, on applique la méthode conventionnelle :

$$L_{max} < \frac{0,8 * V_o}{2 * \rho * I_a * \frac{2}{S_{ph}}} \text{ (ITAN)} \text{ ou } L_{max} < \frac{0,8 * U}{2 * \rho * I_a * \frac{2}{S_{ph}}} \text{ (ITSN)}$$

4.3 Mise en oeuvre.

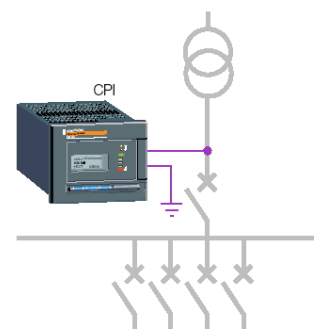
Le seul intérêt du régime de neutre isolé est qu'il « prévient » de l'apparition d'un défaut dangereux ! Encore faut-il **détecter et signaler** le premier défaut afin de pouvoir le **localiser (et l'éliminer)** avant qu'un deuxième apparaisse. La norme précise : (§ 411-6-5)

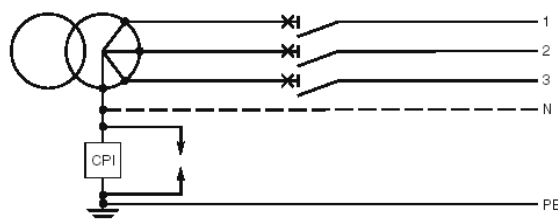
« Les dispositifs de contrôle et de protection suivants peuvent être utilisés :

- contrôleurs permanents d'isolement ;
- dispositifs de recherche de défaut ;
- dispositifs de protection contre les surintensités ;
- dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel. »

4.3.1 Signalisation. (§ 532-4)

La détection est basée sur l'injection entre le réseau (neutre) et la terre d'un courant continu ou alternatif de très basse fréquence. L'appareil qui réalise cette injection est un **contrôleur permanent d'isolement** : CPI. En mesurant alors la tension entre le neutre et la terre il peut déduire l'impédance d'isolement et avec un seuil correctement choisi indiquer lorsque cet isolement est insuffisant.



**Contrôle :**

Injection de tension alternative de fréquence 2,5 Hz entre la terre et le réseau.

Mesure de l'isolement à partir du courant injecté. XM200 effectue une mesure de la résistance d'isolement globale du réseau et de sa capacité par rapport à la terre.

Deux seuils déterminés par l'utilisateur : un seuil de prévention Sp et un seuil de défaut Sd.

Signalisation du défaut fugitif par un voyant et mémorisation de sa valeur.

Le clavier de dialogue permet :
 l'introduction des seuils,
 l'affichage de la capacité de couplage à la terre,

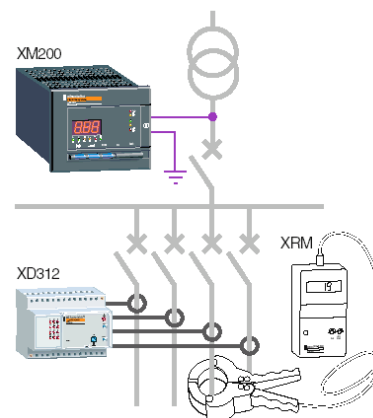
4.3.2 Localisation

Le CPI ayant détecté un défaut sur le réseau il faut alors localiser celui-ci précisément de manière à pouvoir intervenir sur le départ concerné sans perturber les autres. On utilise alors des pinces ampère métriques accordées sur la fréquence du courant injecté par le CPI (ou à l'aide d'un générateur annexe).

Description du fonctionnement :**La recherche automatique :**

Elle consiste à détecter les défauts permanents ou fugitifs et à localiser le départ défaillant sans intervention humaine.

Le détecteur XD312 détecte et localise le défaut, ce dispositif de recherche signale si les défauts détectés sont fugitifs ou permanents. Des tores, associées à l'appareil, sont placés sur les départs (jusqu'à 12). Ils captent le signal BF de recherche émis par le CPI.

**La recherche manuelle :**

Elle s'effectue avec le récepteur mobile Vigilohm System XRM. Celui-ci est associé à sa pince ampèremétrique et capte le signal BF de recherche émis par le CPI Vigilohm System.

La recherche manuelle complète et affine la recherche automatique.

La pince ampèremétrique est déplacée le long du départ défaillant pour trouver l'endroit exact du défaut.

5 Annexes.**5.1 Synthèse.**

ATTENTION
Pour chaque régime,
le raccordement des masses métalliques au PE est
obligatoire et indispensable
à la surveillance de l'isolement d'une installation.

!!!

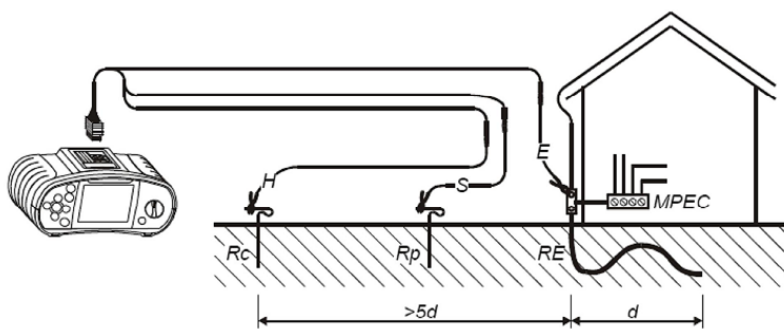
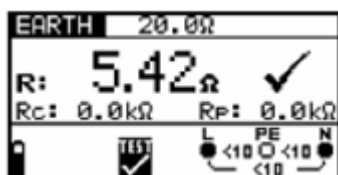
Cette synthèse est sommaire et suppose bien assimilées toutes les notions vues auparavant.

Schéma de liaison à la terre :	Exploitation	Protection	Caractéristiques
T-T	Coupure au premier défaut Test périodique des DDR	Dispositif différentiel (Au moins un en tête d'installation)	Défaut Id faible Simplicité de mise en oeuvre et d'exploitation
Mise au neutre	Coupure au premier défaut Modification = vérification	Disjoncteur ou fusible	Economique mais Défaut = CC !!! Risque d'incendie
Neutre isolé ou impédant	Signalisation du premier défaut Elimination Coupure au deuxième défaut	(Dispositif différentiel) ou Disjoncteur ou fusible	Continuité de service Personnel qualifié Cher !!!

5.2 Contrôle des prises de terre.

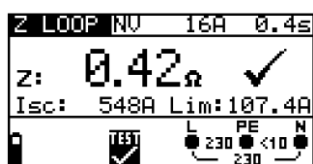
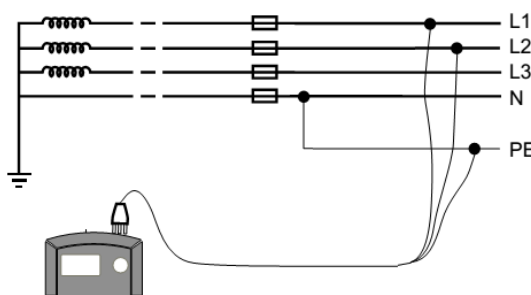
5.2.1 Mesure dite « des 3 piquets ».

La norme NFC 15-100 propose une procédure de mesure d'une prise de terre qui est mise en oeuvre dans certains contrôleurs de la manière suivante :



5.2.2 Evaluation de la boucle.

La méthode précédente est lourde à mettre en oeuvre on lui préfère très souvent une méthode plus simple dite d'évaluation de la boucle. Cette méthode consiste à mesurer la valeur de la boucle de défaut, on considère alors qu'on obtient une valeur par excès de la résistance de la prise de terre.



Il s'agit d'une méthode volt-ampèremétrique⁷, après avoir injecté un courant dans la boucle à contrôler, l'appareil mesure différentes tensions et en déduit l'impédance qui se situe sur le parcours du courant.

5.2.3 Ce qu'il faut savoir !!!

SLT	Remarque	Déclench.	Moyen	Condition	NFC 15-100	
TT	Circuits fixes	1 ^{er} défaut	DDR	$I\Delta n < 50/R_a$	411-5-3	
	Circuits prises			30 mA		
TN	Circuits fixes		DDR	DPCC	$I_a < V_o/Z_s$	411-4-3
	Circuits prises			30 mA		
	Risque d'incendie			300 mA		
ITAN	1 prise de terre	2 ^{ème} défaut	DPCC	$I_a < V_o/(2*Z_s')$	411-6-4 a)	
	2 prises de terre			DDR	$I\Delta n < 50/R_a$	411-6-4 b)
ITSN	1 prise de terre		DPCC	$I_a < U/(2*Z_s)$	411-6-4 a)	
	2 prises de terre			DDR	$I\Delta n < 50/R_a$	411-6-4 b)

⁷ Voir le cours de sciences appliquées ...

Annexes : Longueurs maximales protégées :

Section nominale des conducteurs	Courant de réglage du fonctionnement instantané de disjoncteur I_m (A)																			
	mm ²	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400	500	560	630	700	800	875	1000	1120	1250
1,5	100	79	63	50	40	31	25	20	16	13	10	9	8	7	6	6	5	4	4	4
2,5	167	133	104	83	67	52	42	33	26	21	17	15	13	12	10	10	8	7	7	7
4	267	212	167	133	107	83	67	53	42	33	27	24	21	19	17	15	13	12	11	11
6	400	317	250	200	160	125	100	80	63	50	40	36	32	29	25	23	20	18	16	16
10			417	333	267	208	167	133	104	83	67	60	53	48	42	38	33	30	27	27
16				427	333	267	213	167	133	107	95	85	76	67	61	53	48	43	43	43
25					417	333	260	208	167	149	132	119	104	95	83	74	67	67	67	67
35						467	365	292	233	208	185	167	146	133	117	104	93	93	93	93
50							495	396	317	283	251	226	198	181	158	141	127	127	127	127
70								417	370	333	292	267	233	208	187	187	187	187	187	187
95									452	396	362	317	283	263	263	263	263	263	263	263
120										457	400	357	320	320	320	320	320	320	320	320
150											435	388	348	348	348	348	348	348	348	348
185												459	411	411	411	411	411	411	411	411

Coefficient correcteur Cu/Al et $m = S_{ph}/S_{pe}$ ⁸

Circuit	Nature du conducteur	m = S _{phase} /S _{PE} (ou PEN)			
		m = 1	m = 2	m = 3	m = 4
3P + N ou P + N	Cuivre	1	0,67	0,50	0,40
	Aluminium	0,62	0,42	0,31	0,25

Simplification Courbe B :

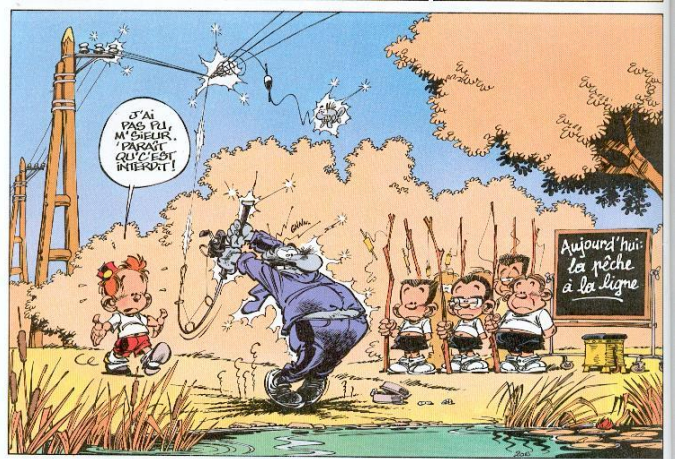
S _{ph}	Courant assigné des disjoncteurs type B (A)															
mm ²	1	2	3	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
1,5	1200	600	400	300	200	120	75	60	48	37	30	24	19	15	12	10
2,5		1000	666	500	333	200	125	100	80	62	50	40	32	25	20	16
4			1066	800	533	320	200	160	128	100	80	64	51	40	32	26
6				1200	800	480	300	240	192	150	120	96	76	60	48	38
10					800	500	400	320	250	200	160	127	100	80	64	
16						800	640	512	400	320	256	203	160	128	102	
25							800	625	500	400	317	250	200	160		
35								875	700	560	444	350	280	224		
50									760	603	475	380	304			

Simplification Courbe D :

S _{ph}	Courant assigné (A)																
mm ²	1	2	3	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	
1,5	429	214	143	107	71	43	27	21	17	13	11	9	7	5	4	3	
2,5	714	357	238	179	119	71	45	36	29	22	18	14	11	9	7	6	
4		571	381	286	190	114	71	80	46	36	29	23	18	14	11	9	
6			857	571	429	286	171	107	120	69	54	43	34	27	21	17	14
10				952	714	476	286	179	200	114	89	71	57	45	36	29	23
16					762	457	286	320	183	143	114	91	73	57	46	37	
25						714	446	500	286	223	179	143	113	89	71	57	
35							625	700	400	313	250	200	159	125	80	100	
50								848	543	424	339	271	215	170	136	109	

⁸ Il faut multiplier la longueur max trouvée initialement par le coefficient correcteur ...

Formation à l'habilitation



(Notes)

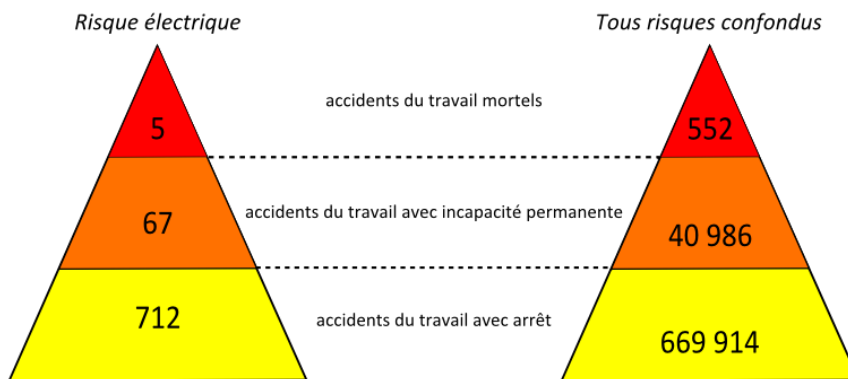
1 Accidents d'origine électrique.

1.1 Bilan.

1.1.1 Constat.

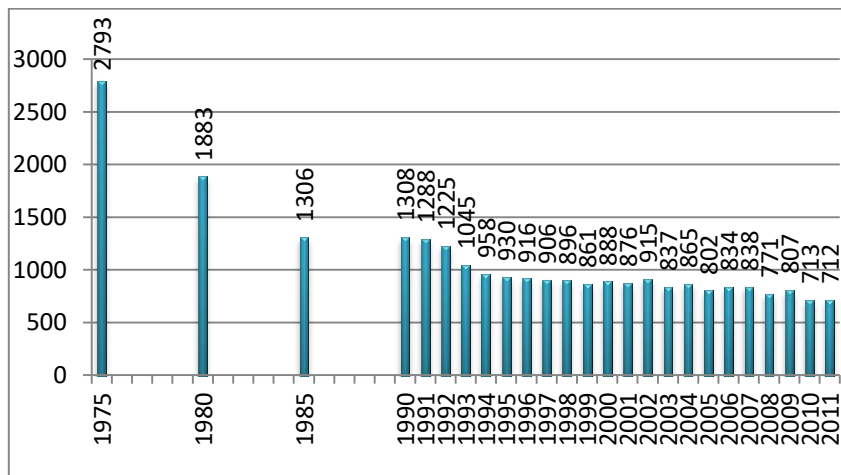
En 2011, les accidents du travail (AT) d'origine électrique représentent **0,1% des accidents du travail** enregistrés par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS).

Toutefois, en termes de gravité, ils sont **8,5 fois plus mortels** que l'ensemble des risques professionnels et **près d'1 décès sur 100** est lié à l'électricité.

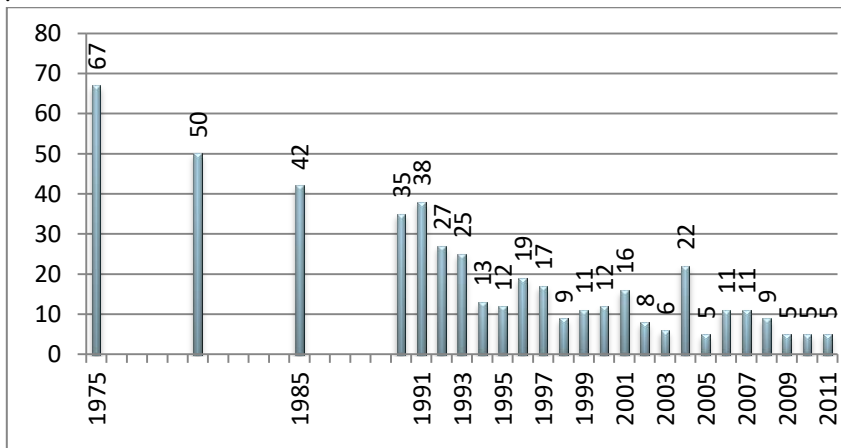


1.1.2 Historique.

Les accidents d'origine électrique ayant entraîné un arrêt de travail sont en diminution depuis une quarantaine d'année :

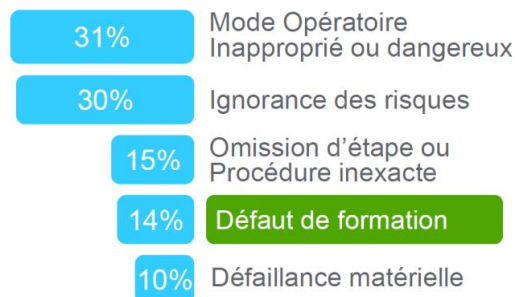


D'autre part, les accidents d'origine électrique ayant entraîné un décès ont une répartition plus aléatoire mais qui semble se stabiliser.



1.1.3 Moyens de prévention.

Selon une enquête de l'INRS¹, les causes des accidents du travail d'origine électrique sont de plusieurs types :



Hormis les défaillances matérielles qui relèvent en partie des constructeurs, les autres facteurs sont « remédiables » ! C'est l'un des buts de votre formation.

1.2 Responsabilités.

1.2.1 Code du travail ...

En termes de responsabilités, la loi est claire depuis 2010. Le code du travail a été modifié afin de contribuer à améliorer la lutte contre le risque électrique. Le code définit les responsabilités des maîtres d'ouvrage et des employeurs ...

Le maître d'ouvrage² est responsable de la conception et de la réalisation des installations électriques des bâtiments destinés à recevoir des travailleurs pour qu'il n'y ait pas de risque d'électrocution, d'incendie, de brûlure ou d'explosion ...

L'employeur³ (ou le chef d'établissement) est responsable de l'entretien et de la surveillance des locaux, de la formation des opérateurs ...

Il a aussi les obligations d'un maître d'ouvrage en ce qui concerne les modifications ou adjonctions d'installations électriques.

1.2.2 Conduite à tenir selon la NFC 18510 (§ 13-3) ...

La conduite à tenir en cas d'accident d'origine électrique est la suivante :

PROTEGER, sans s'exposer soi-même ...

Supprimer le risque (mise hors tension arrêt d'urgence),

ALERTER les secours en étant clair dans la description de la situation :

Téléphone et adresse du lieu de l'accident (cf Instructions de Sécurité),
nombre et état des victimes ...

SECOURIR dans la mesure de ses capacités (sauveteur secouriste du travail bienvenu !!)

soustraire la victime ...

1.2.3 Conduite à tenir selon l'UTE 18511.

En cas d'accident il est impératif d'agir comme suit:

Protéger afin d'éviter un nouvel accident pour soi ou pour les témoins.

Secourir l'accidenté dans la mesure de ses moyens (secouriste ou non).

Alerter les secours internes ou les services publics : pompiers SAMU etc ...

¹ Institut National de Recherche et de Sécurité.

² Décret 2010-1017

³ Décret 2010-1016.

1.3 INSTRUCTIONS PERMANENTES DE SECURITE

Ces instructions sont impératives dans tous les locaux à risques électriques.

Avant manipulation

HORS TENSION

- 1) Vérifier la mise hors tension de l'installation. Aucun raccordement ou câblage ne doit être exécuté sous tension.
- 2) Faire valider le montage et/ou le câblage par le professeur.
- 3) Les raccordements à la source d'énergie se font en dernier lieu. Source hors tension.
- 4) Aucun élève n'est autorisé à intervenir sur un poste de travail autre que le sien sauf cas d'urgence

Pendant manipulation

SOUS TENSION

- 5) La mise en service de l'alimentation en énergie du montage est impérativement exécutée en présence du professeur.
- 6) L'utilisation et l'exploitation des systèmes devront se faire suivant les instructions permanentes de sécurité spécifiques à chacun d'eux.
- 7) Tout témoin d'une situation non prévue, anormale ou dangereuse doit stopper l'opération en cours et prévenir l'enseignant responsable. Utiliser immédiatement le dispositif d'arrêt d'urgence le plus proche.
- 8) Toute modification de câblage ou de raccordement (effectuée hors tension) implique obligatoirement la vérification par le professeur.

Après manipulation

HORS TENSION

- 9) Le démontage du poste de travail ne pourra se faire qu'après le passage du professeur qui l'aura mis hors tension.

Tout manquement à ces consignes entraînera l'arrêt de l'activité et la mise à l'écart de la zone de travail.

Nom de l'élève :

date:

Signature
avec la mention
«Lu et approuvé »

l'élève

les parents de l'élève

1.4 Les chocs électriques avec contact.

1.4.1 Effets du courant électrique traversant l'homme

Des expériences (sur des lapins) ont montré que plusieurs paramètres doivent être considérés pour prévoir la réaction d'un corps au passage d'un courant.

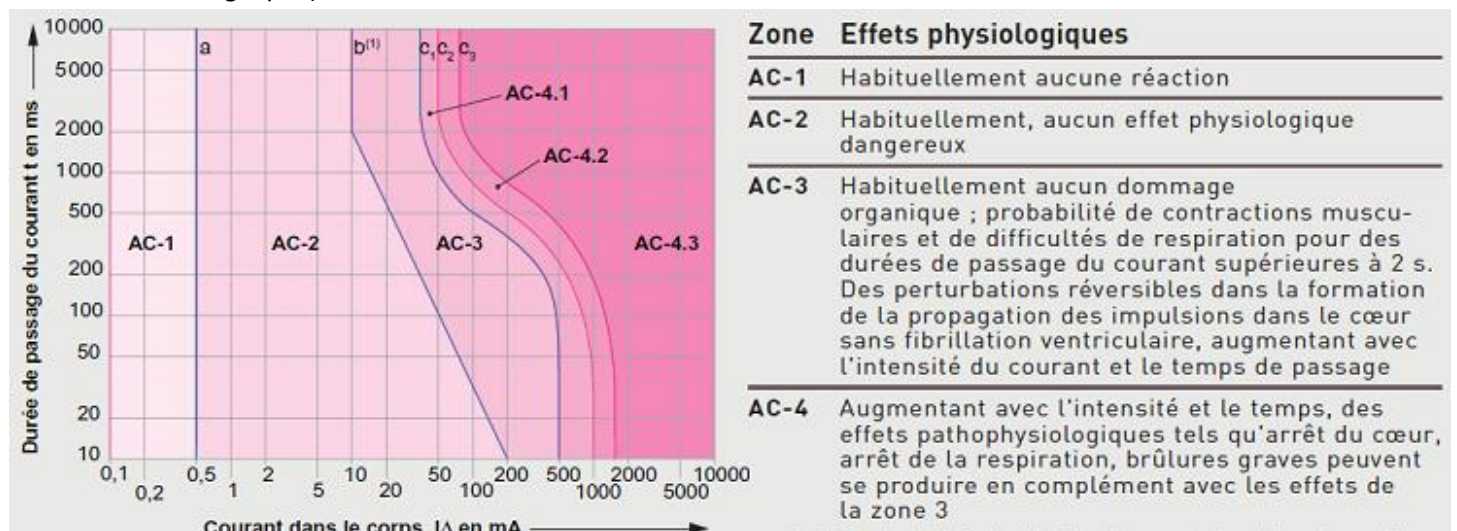
La **valeur du courant** qui traverse une personne est le premier paramètre qui vient à l'esprit mais il dépend généralement de la tension de contact et de la résistance du corps humain. Or, si la tension de contact est un paramètre maîtrisable, la résistance du corps humain en est un qui varie énormément en fonction :

- des conditions extérieures (humidité, port de chaussure etc ...),
- du parcours du courant (passage par le cœur ou non),
- de la condition physique de la personne considérée.

Le **temps de contact** est lui aussi à prendre en compte puisqu'il caractérise la quantité d'énergie apportée au corps ($Q = R_h \cdot I^2 \cdot t$).

Enfin le **type de courant**, alternatif ou continu produit des effets différents, on considère que le courant continu est moins dangereux, en fait, il produit des effets différents (électrolyse par exemple).

1.4.2 Illustration graphique.



Les influences conjuguées de l'intensité d'un courant et de son temps de passage dans un corps sont représentées ci-dessus.

Précisions sur les termes suivants :

- la **tétanisation** entraîne la crispation des muscles (phénomène de non-lacher),
- l'**asphyxie** ou **paralysie respiratoire** atteint le diaphragme,
- la **fibrillation cardiaque** entraîne la mort de l'opérateur,
- une personne **électrisée** peut et doit être secourue,
- une personne **électrocutée**, est médicalement reconnue comme morte.

1.4.3 Tensions limites de sécurité (§ 234-4).

(Aussi appelée tension limite conventionnelle de contact)

La norme **NFC 15 100** définit la tension limite conventionnelle de sécurité (en alternatif 50 Hz) en dessous de laquelle une tension de contact est considérée comme non dangereuse si elle est supportée indéfiniment.

Elle est fixée dans la norme à $U_l=50$ V en alternatif ($U_l=120$ en =) sauf cas contraire.

1.4.4 Electrification par contact direct (§ 231-2).

La première cause est le **contact direct** d'une personne avec un conducteur actif (le neutre en est un !) et la terre ou avec deux conducteurs actifs différents.

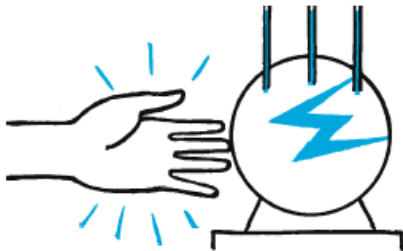


La norme NF C 15-100 définit le contact direct comme suit :

"contact de personnes ou d'animaux domestiques ou d'élevage avec des parties actives".

1.4.5 Electrification par contact indirect (§ 231-3).

La deuxième est le contact avec la masse d'un appareil électrique (sous tension suite à un défaut d'isolement) et la terre ou avec deux masses en défaut d'isolement. On parle alors de **contact indirect**.



La norme NF C 15-100 définit le contact indirect comme suit :

"contact de personnes ou d'animaux domestiques ou d'élevage avec des masses mises sous tension par suite d'un défaut d'isolement".

1.4.6 Procédure de protections.

Les moyens de protection à mettre en oeuvre sont **totale**ment différents.

Les **contacts indirects** en revanche font suite à un défaut d'isolement.

Ils peuvent donc être prévenus par la surveillance permanente **du niveau d'isolement** de l'installation et par un **déclenchement automatique**.

Pour cela on se réfère au chapitre 8 consacré à l'étude des schémas de liaison à la terre : « régimes du neutre ».

Les **contacts directs**, ne peuvent être prévenus que par un **comportement précis** ainsi qu'une bonne **connaissance des risques électriques**.

Pour cela on se réfère au chapitre 7 consacré à la formation en vue de l'habilitation. Pour toute opération d'ordre électrique et surtout pour le comportement à adopter, il faut se référer au document suivant :

NFC 18-510

1.5 Risques électriques sans contact.

Il ne faut pas oublier que le courant électrique peut être dangereux sans traverser le corps humain, simplement par les conséquences de certains défauts.

Un **court-circuit** développe une énergie thermique telle qu'il peut y avoir fusion de métal et projection de particules à très haute température ce qui peut engendrer un début d'incendie ou entraîner des brûlures graves.

L'arc électrique dégage aussi de l'énergie lumineuse concentrée en ultra-violet dont les effets sur l'œil ne sont pas négligeables, car ils peuvent aveugler de manière irrémédiable le personnel victime.

1.6 Prévention.

1.6.1 NFC 18510.

La **formation à l'habilitation** s'appuie sur la norme **NFC 18510** qu'il est impératif de consulter.

C'est **LE TEXTE** de référence dans le domaine !!!

En cours sera distribuée une synthèse au format A3.

Le document qui suit est un intermédiaire pédagogique qui développe la synthèse mais ne dispense pas de la découverte approfondie de la norme. C'est une aide à la lecture de celle-ci !

Par soucis de clarté, les aspects haute tension (HTA) et travaux sous tension (TST) sont volontairement laissés de côté pour ne pas surcharger le document. Le cas échéant, il « suffit » de se référer à la norme.

Quand il est fait référence à « la norme », il s'agit de la NFC 18510, il en est de même pour les références précédées d'un § ...

1.6.2 Historique.

La NFC 18510 fait suite à divers textes dont les publications UTE 8510 et UTE 18530.
Elle est en vigueur depuis janvier 2012.

C'est le code du travail qui établit les règles à respecter pour assurer la sécurité des personnes travaillant en présence de risque électrique.

Les textes fondateurs sont :

le décret du 14 novembre 1962
le décret du 14 novembre 1988
le décret du 22 septembre 2010

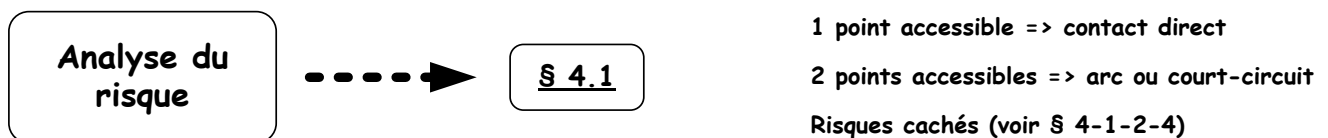
2 Principes de l'habilitation.

2.1 Analyse du risque. (§ 4-1).

2.1.1 Analyse.

L'analyse du risque électrique doit précéder TOUTE OPERATION d'ORDRE ELECTRIQUE ou d'ORDRE NON ELECTRIQUE afin de définir et de mettre en place, lors des OPERATIONS, les mesures de prévention appropriées pour la protection des personnes et des biens.

D'abord :



De manière simpliste mais la plupart du temps efficace l'analyse du risque consiste à observer la zone où doit se dérouler l'opération et à détecter la présence de **points accessibles**⁴ potentiellement sous tension.

Bien évidemment, cette observation doit se compléter d'une analyse des risques induits par les modes opératoires envisagés (§ 4-1-2-3) ce qui sous-entend une parfaite **prévision du déroulement de l'opération** avec ses aléas ... Voir pour plus de précisions l'annexe B de la norme : « Eléments d'analyse des opérations ».

Enfin, **cette analyse du risque doit être maintenue** pendant toute la durée des opérations ...

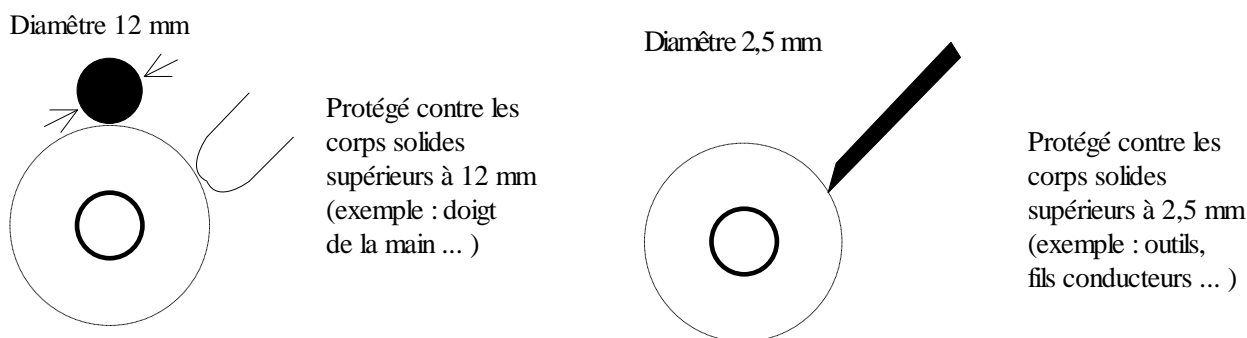
2.1.2 Indices de protection (et points accessibles ...).

L'indice de protection attribué à un matériel caractérise alors la capacité de protection qu'assure une enveloppe contre la pénétration :

de corps solides étrangers (ou de personnes), de IP 0X (non protégé) à IP 6X (fil de $\Phi > 1\text{mm}$),
de l'eau avec des effets nuisibles, de IP X0 (idem) à IP X8 (immersion prolongée).

On considère en basse tension ($U < 1000\text{ V}$) que les enveloppes **d'indice au moins IP 2X** assurent la protection contre les contacts directs car elles empêchent la pénétration d'objets gros comme le pouce, (il existe d'ailleurs un pouce articulé étalon normalisé). (En haute tension l'indice requis est IP 3X).

⁴ Voir les indices de protection « IP » plus loin dans le document ...



2.1.3 Conséquences.

Si l'**analyse** du risque met en évidence un risque lié à la proximité d'un ou plusieurs points sous tension accessibles, il faut décider de l'organisation des opérations qui doivent avoir lieu dans cet environnement afin de **prévenir le risque**.

Trois possibilités peuvent apparaître qui doivent être envisagées dans l'ordre de priorité lié au danger croissant ci-contre :

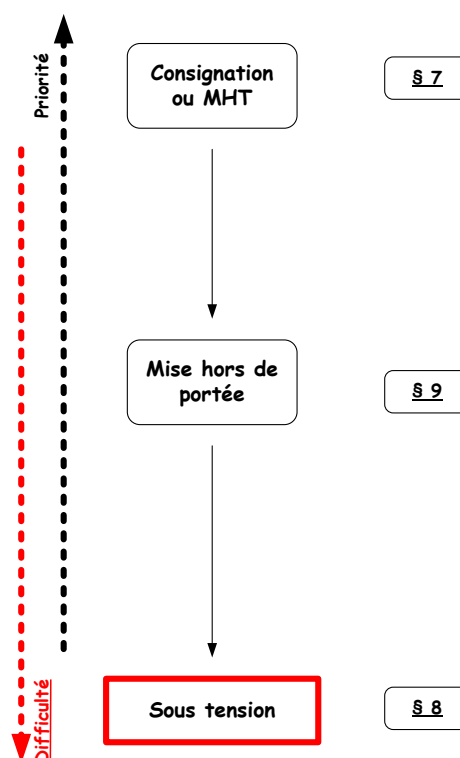
- 1) S'il y a possibilité de consigner la zone d'opération hors tension (voir § 7), on le fait ...

Sinon ...

- 2) S'il y a possibilité de se mettre hors de portée par : **isolation, obstacle ou éloignement** (voir § 9), on le fait ...

Sinon ...

- 3) Il faut travailler sous tension ... Voir § 8 non abordé dans ce document !



2.2 Environnement. (§ 6).

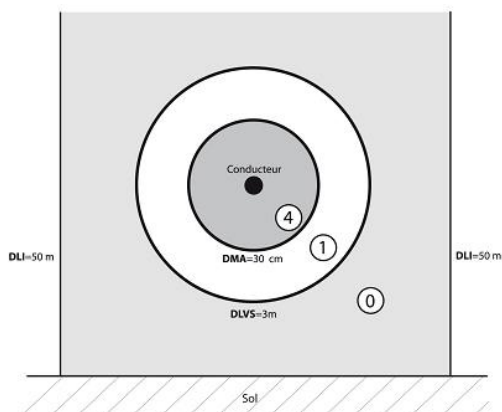
2.2.1 Présentation.

L'environnement des pièces nues sous tension est défini de manière très précise. Les définitions occupent 15 pages de la norme : zone d'investigation, zone de voisinage simple, zone de voisinage renforcée, zone de travaux, distance d'approche, distance d'approche corrigée, distance de tension, distance de garde ...

Ne sont retenus dans ce document allégé que les zones les plus importantes.

Il faut se référer aux § indiqués pour parfaire votre formation.

2.2.2 Voisinages.



Le **voisinage** est la zone dans laquelle débute la mise en œuvre des mesures de prévention de façon à supprimer ou, à défaut, réduire le risque d'origine électrique. (§ 6-2-4).

Zone 1 : zone de voisinage simple,
il est indispensable d'analyser le risque !

Zone 4 : zone de voisinage renforcé.
il est indispensable d'organiser la prévention !

2.2.3 Zone de travail. (§ 3-5-4)

C'est la zone située sur un **OUVRAGE**, une **INSTALLATION** ou dans leur **ENVIRONNEMENT**, dans laquelle le ou les **OPERATEURS** sont amenés à évoluer avec les outils, équipements et matériels. Cette zone est définie lors de la préparation du travail et délimitée

Cette zone n'est accessible qu'aux personnes autorisées.

(Les emplacements de travail où sont essayés des matériels sont appelés des **laboratoires** ou des **plates-formes d'essais** UTE 18510 § 258.)

2.2.4 Local d'accès réservé aux électriciens. (§ 3-5-7).

Il s'agit d'un **local** ou emplacement contenant des parties d'**OUVRAGE** ou d'**INSTALLATION** comportant des pièces nues susceptibles d'être sous tension et accessibles dans lequel au moins l'une des conditions ci-après existe :

- la protection contre les contacts directs n'est pas assurée par construction (en basse tension seulement) ;
- la protection contre les contacts directs est assurée par **ELOIGNEMENT** ...
- la protection contre les contacts directs est assurée par **OBSTACLE** ...

Les **locaux d'accès réservés aux électriciens** sont les volumes contenus dans une enceinte quelconque et pouvant contenir des pièces nues sous tension dont le degré d'isolation en basse tension est inférieur à IP2X, c'est à dire n'assurant pas la protection contre les contacts directs. Ils sont signalés par un triangle jaune explicite (tête de mort, éclair etc. ...).

Au cours de travaux ou d'interventions, le personnel peut être amené à s'approcher de pièces nues sous-tension dans un local réservé aux électriciens. Pour tenir compte de cette possibilité, on définit, en basse tension, les **deux zones d'environnement** (§ 6-2-4) ci-dessous :

2.3 Opérations. (§ 3-4).

C'est une activité exercée, soit directement sur les **OUVRAGES** ou les **INSTALLATIONS** électriques, soit dans un **ENVIRONNEMENT** électrique. Elle peut être de deux natures :

- **OPERATION d'ORDRE ELECTRIQUE** ;
- **OPERATION d'ORDRE NON ELECTRIQUE**.

2.3.1 Essai.

OPERATION destinée à s'assurer du bon fonctionnement ou de l'état électrique, mécanique ou autre d'un **OUVRAGE** ou d'une **INSTALLATION** électrique.

2.3.2 Mesurage (tension, courant, puissance).

OPERATION destinée à mesurer des grandeurs électriques, ou des grandeurs physiques (distance, température ou autres)

Une mesure (ou mesurage) électrique doit s'effectuer sous tension mais pas forcément au voisinage (utilisation de pince ampère métrique par exemple ...).

2.3.3 Vérification (continuité, isolement, rotation).

OPERATION destinée à s'assurer qu'un OUVRAGE ou une INSTALLATION est conforme à un référentiel.

2.3.4 Manœuvre (ouverture, fermeture, inversion).

OPERATION conduisant à un changement de la configuration électrique d'un OUVRAGE, d'une INSTALLATION ou de l'alimentation électrique d'un MATERIEL. Les MANŒUVRES sont effectuées au moyen d'appareillages spécialement prévus à cet effet, tels qu'interrupteurs, disjoncteurs, sectionneurs, ponts, etc.

NOTE Les manœuvres comprennent les manœuvres d'exploitation, les manœuvres de consignation, et les manœuvres d'urgence.

2.3.5 Surveillance. (§ 4-3-1-6).

La surveillance de sécurité électrique est mise en œuvre chaque fois que les mesures de prévention doivent être renforcées par la surveillance effective des OPERATEURS ou des personnes non habilitées mais autorisées à pénétrer dans une zone à risque électrique. La surveillance confiée à un SURVEILLANT DE SECURITE ELECTRIQUE consiste à guider les actions d'une tierce personne et à s'assurer que cette dernière respecte les mesures de prévention et les instructions de sécurité.

Lorsqu'une surveillance spécifique est nécessaire, elle doit être clairement définie en lieu et en temps, et de préférence lors de la préparation du travail.

Toute personne habilitée peut être désignée par un responsable pour être surveillant de sécurité électrique.

Le surveillant doit se consacrer uniquement à cette fonction lorsque celle-ci lui est assignée. (§ 4-5-2-10).

2.3.6 Intervention. (§ 10-1) - Dépannage.

Une INTERVENTION BT est une OPERATION d'ORDRE ELECTRIQUE simple du domaine BT ou TBT, de courte durée, effectuée sur un MATERIEL électrique ou sur une partie de faible étendue d'une INSTALLATION ou encore sur les annexes des OUVRAGES de transport ou de distribution d'énergie.

Toute opération qui ne répond pas aux critères ci-dessus doit être assimilée à un TRAVAIL.

Une intervention est une opération de courte durée (?) sur une partie seulement d'un ouvrage (?) : dépannage, remplacement de fusible etc ... Ces opérations ne sont pas forcément planifiées, c'est à dire qu'il peut y avoir prise de décision pendant l'intervention : **mesurages, essai, vérification**.

En basse tension on définit deux types d'intervention :

les **interventions générales** (maintenance, mise en service, connexions avec présence de tension § 10-3) ;

les **interventions élémentaires** (remplacements, raccordements ou ré armements § 10-4).

2.3.7 Travail. (§ 3-4-16)

Un travail est une opération dont le but est de réaliser, modifier, entretenir ou réparer un ouvrage électrique. Cette opération est obligatoirement préparée à l'avance par un chargé de travaux (voir plus loin), contrairement à l'intervention (voir plus loin). Elle est de plus précédée d'un ordre.

En cas d'imprévu (ou de changement de programme !), le travail doit être interrompu et le responsable (chargé de travaux) prévenu.

Direction de travaux (§ 3-1-12).

Outre la direction effective des travaux, cela consiste à assurer la sécurité des personnes dirigées, on parle alors de **sécurité collective**.

2.3.8 Consignation. (§ 3-4-10).

C'est la procédure d'ordre électrique destinée à assurer la protection des personnes et des OUVRAGES ou des INSTALLATIONS contre les conséquences de tout maintien accidentel ou de toute apparition ou réapparition intempestive de tension sur ces OUVRAGES ou ces INSTALLATIONS.

La consignation électrique d'un ouvrage permet d'assurer l'absence de tension de manière certaine, elle protège notamment contre les retours accidentels de la tension.

A retenir les cinq étapes obligatoires :

- * Séparation et condamnation,
- * Identification de la zone de travail et VAT (suivie de MALT et en CC).

On fait une distinction entre consignation et « mise hors tension » en l'absence de MALT et en CC. La mise hors tension ne garantit pas contre le retour de tension ... (§ 3-4-12).

2.4 Formation et habilitation.

2.4.1 Définition. (§ 5-1-2)

L'habilitation est la reconnaissance, par l'EMPLOYEUR, de la capacité d'une personne placée sous son autorité à accomplir, en sécurité vis-à-vis du risque électrique, les tâches qui lui sont confiées.

L'habilitation n'est pas directement liée à la classification professionnelle, elle atteste d'une formation (information des risques encourus et du comportement à adopter dans certaines situations) réussie. Elle est matérialisée par un document établi et signé par « l'employeur utilisateur », et l'habilité et daté du jour de sa délivrance.

L'HABILITATION est obligatoire pour : (§ 5-1-3)

- effectuer toutes OPERATIONS sur des OUVRAGES ou des INSTALLATIONS électriques ou dans leur VOISINAGE ;
- surveiller les OPERATIONS sur des OUVRAGES ou des INSTALLATIONS électriques ou dans leur VOISINAGE ;
- accéder sans surveillance aux LOCAUX ET EMPLACEMENTS D'ACCES RESERVE AUX ELECTRICIENS.

L'habilitation peut toujours être remise en cause ! (§ 5-4)

L'HABILITATION doit être examinée au moins une fois par an et chaque fois que cela s'avère nécessaire en fonction des modifications du contexte de travail de l'intéressé [...]

A l'issue de cet examen, l'HABILITATION est soit maintenue, soit modifiée, soit suspendue.

Si des besoins de formation sont exprimés ou constatés, ils doivent être satisfaits au moyen d'un recyclage ou d'un complément de formation.

2.4.2 Niveaux de tension. (§ 3-3-2)

Le comportement à adopter pour assurer la sécurité des personnes dépend avant tout des **niveaux de tension** considérés, on parle aussi de **domaines de tension**. Ceux-ci sont rappelés ci-dessous :

Domaines de tension		Valeur de la tension nominale U_n exprimée en volts	
		en courant alternatif	en courant continu lisse (1)
Très basse tension (domaine TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse tension (domaine BT)		$50 < U_n \leq 1\ 000$	$120 < U_n \leq 1\ 500$
Haute	Domaine HTA	$1\ 000 < U_n \leq 50\ 000$	$1\ 500 < U_n \leq 75\ 000$
Tension	Domaine HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

(1) Le courant continu lisse est celui défini conventionnellement par un taux d'ondulation non supérieur à 10 % en valeur efficace, la valeur maximale de crête ne devant pas être supérieure à 15 %. Pour les autres courants continus, les valeurs des tensions nominales sont les mêmes que pour le courant alternatif.

On parle aussi dans le cas de la TBT de : TBTS, TBTP et de TBTF voir en annexe.

2.4.3 Définition des niveaux d'habilitation. (§ 5-7-2)

La responsabilité de chacun face aux risques électriques dépend de la formation reçue, on parle de niveau d'habilitation. Un niveau d'habilitation se définit au moyen de combinaisons de lettres et d'indices qui ont la signification indiquée dans le tableau suivant:

Tableau des habilitations. (§ 5-7-2-5)

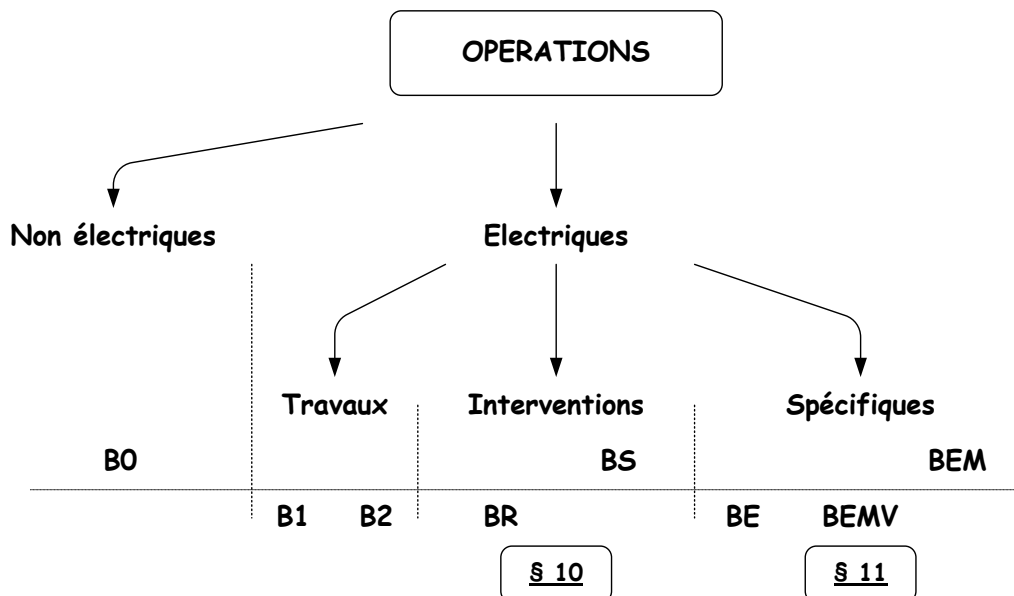
1 ^{er} caractère Domaine de tension (Voir 5.7.2.2)	Tensions	B : basse tension (BT) et très basse tension (TBT) H : haute tension
2 ^{ème} caractère Type d'opération (Voir 5.7.2.3)	Travaux d'ordre non électrique	0 : pour exécutant ou chargé de chantier
	Travaux d'ordre électrique	1 : pour exécutant 2 : pour chargé de travaux
	Interventions BT	R : intervention BT générale S : intervention BT élémentaire
	Consignation	C : pour un charge de consignation électrique.
	Opérations spécifiques	E : Essai, Mesurage, Vérification ou Manœuvre
	Opérations photovoltaïques	P : Opération photovoltaïque
3 ^{ème} caractère Lettre additionnelle (Voir 5.7.2.4)	Complète, si nécessaire, les travaux	V : travaux réalisés dans la zone de voisinage renforcé HT (zone 2) ou travaux d'ordre électrique hors tension dans la zone de voisinage renforcé BT (zone 4) : T : travaux sous tension N : nettoyage sous tension X : opération spéciale
Attribut (Voir 5.7.2.5)	Complète, si nécessaire, les caractères précédents	Ecriture en clair du type d'opération, d'essai, de mesurage, de vérification ou de manœuvre d'un opérateur

Lettre X, pour indiquer que le titulaire peut effectuer, sous certaines conditions, des OPERATIONS «spéciales» n'entrant pas dans les désignations précédentes, mais répondant à des besoins particuliers préalablement définis dans une INSTRUCTION DE SECURITE.

Cette HABILITATION doit avoir un caractère exceptionnel.

2.4.4 Symboles d'habilitation utilisés. (§ 5-7-2-6).

Tous les symboles d'habilitation ne sont pas utilisés. Voici les principaux avec les opérations correspondantes :



Les habilitations BO, BS et BEM relèvent de l'exécution répétitive d'un geste connu alors que les autres font appel à plus de réflexion ...

2.5 Qui ?

2.5.1 Définitions des personnels habilités. (NFC 18510 § 3-1 et § 4-5)

Les personnels habilités (ou non) pour effectuer certaines tâches électriques ou non (**mais sur ordre uniquement**) se répartissent en plusieurs groupes auxquels correspondent des niveaux d'habilitation précis :

On les retrouve sur les documents suivants, il s'agit de :

L'exécutant électricien ou non (§ 4529) peut effectuer les travaux d'ordre électriques ou les manœuvres qui lui ont été demandés (par un chargé de travaux) et il veille à sa propre sécurité. (Niveau 1 : B1, H1 ...).

Le chargé de travaux (§ 4525) dirige des travaux, assure sa propre sécurité ainsi que celle du personnel sous ses ordres et peut désigner un surveillant de sécurité électrique pour le suppléer.

Le chargé de chantier (§ 4528), c'est l'équivalent d'un chargé de travaux pour les opérations d'ordre non électrique. Il peut être habilité ou non.

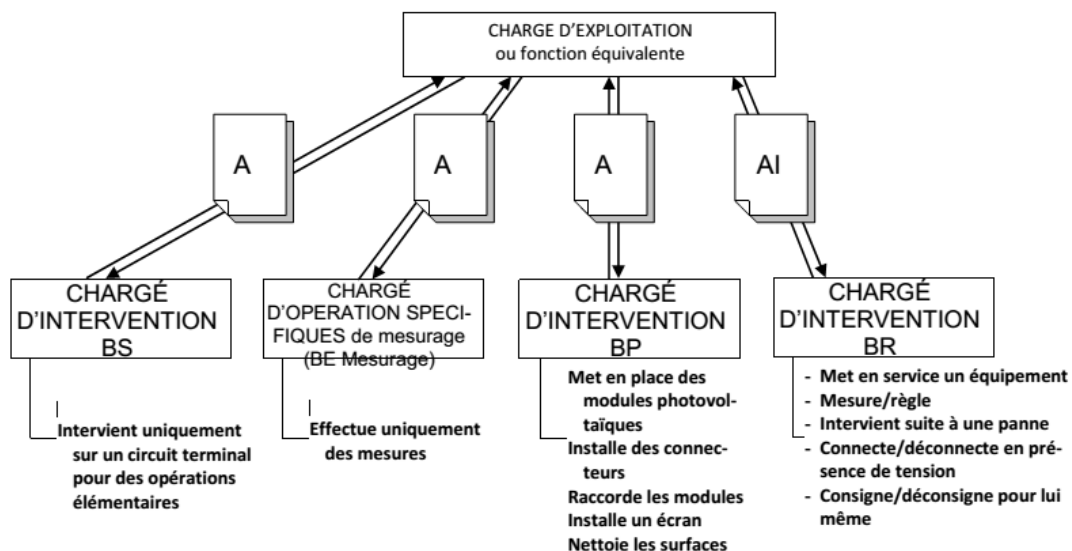
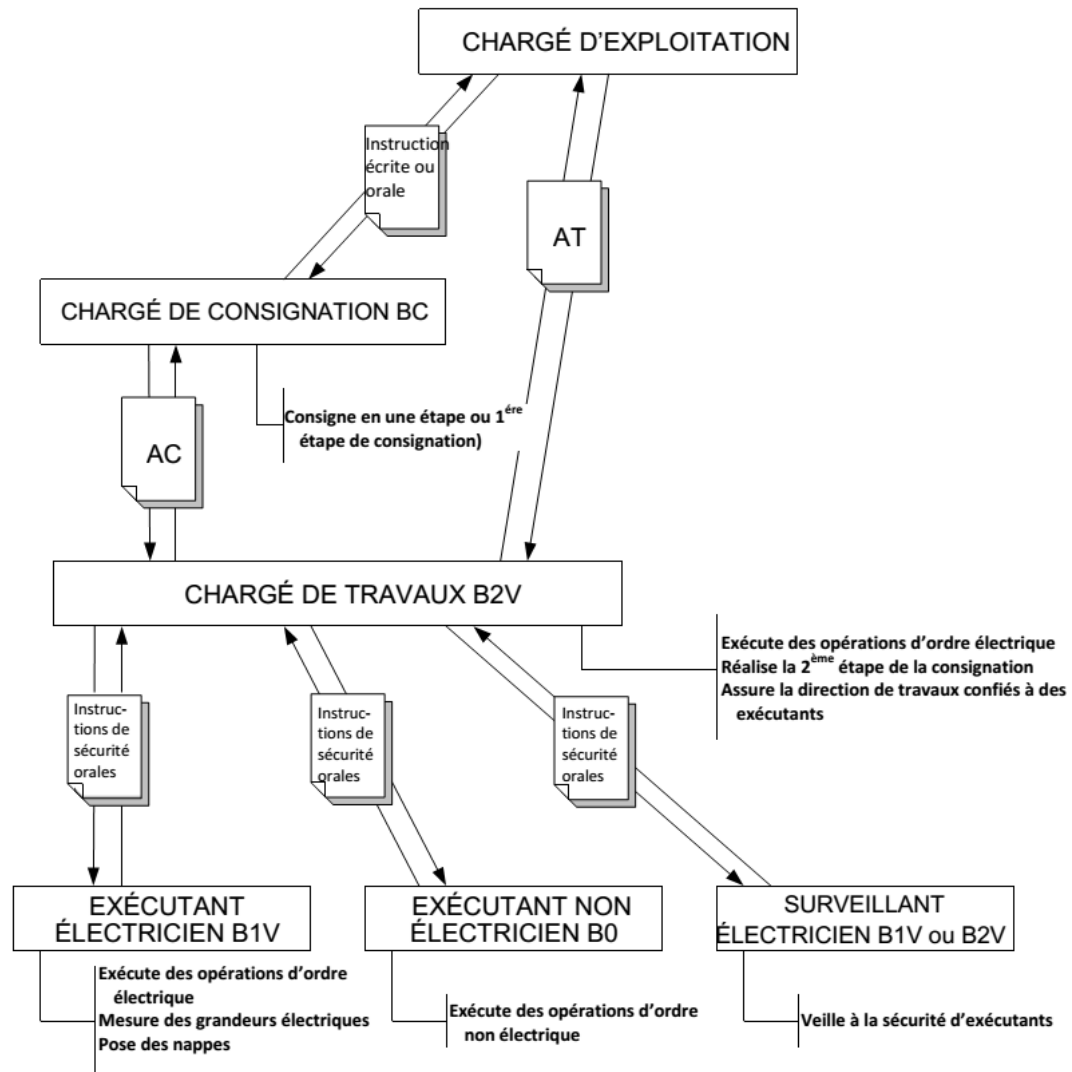
Le chargé d'intervention (§ 4526) se différencie de l'exécutant par le fait qu'il peut procéder à des interventions (voir leur définition plus loin) Il est « chargé de travaux et de consignation » pour lui-même et ce doit être un électricien.

Enfin, **le chargé de consignation** (§ 4524) effectue ou fait effectuer la consignation d'un ouvrage sur les ordres du **chargé d'exploitation**. (comme pour les B2 ou BR).

BC pour lui-même et les personnes travaillant sous ses ordres.

2.5.2 Responsabilités et avis.

L'habilitation est en fait un transfert de responsabilité qui se traduit par des échanges constants d'ordres de travail et d'avis de fin d'opération. Ces échanges sont structurés et doivent être respectés ! Ils sont synthétisés de manière générale ci-dessous :



Documentation extraite du référentiel de formation à la prévention des risques

OT : Ordre de Travail.

AI : Autorisation d'Intervention.

§ 7-3-2-2-1 :

AT : Autorisation de Travail.

AC : Attestation de Consignation.

Ces deux derniers documents sont obligatoirement écrits et transmis en main propre en deux exemplaires.

2.6 Matériel de sécurité. (UTE 18510 § VA et NFC 18510 § 3-6).

Afin d'effectuer au mieux une opération sur une installation il est nécessaire de disposer de matériel de sécurité permettant de protéger efficacement l'opérateur et le personnel environnant contre les risques de contact direct ou les risques de court-circuit.

Il va de soi que le matériel sommairement décrit ci-après doit répondre à des normes de sécurité précises comme le niveau d'isolation par exemple et doit être **vérifié, manipulé et entretenu avec le plus grand soin et cela, quel que soit le niveau d'habilitation !**

2.6.1 Equipements de protection individuels (E.P.I.). (UTE C 18 530 § 101)

En règle générale, l'ensemble du corps de l'opérateur doit être protégé contre les risques de contact avec une partie active d'une part et il faut éviter au maximum les risques de court-circuit accidentel causé par des parties métalliques non isolées (outillage par exemple). C'est pour cela qu'il est recommandé de ne pas porter d'objets ou de pendentifs métalliques aux poignets ou autour du cou (chaînettes, gourmettes sont donc à enlever).

Les vêtements couvrant tout le corps (sauf tête et mains) ne doivent pas comporter de partie métallique (fermeture éclair par exemple) et ne doivent pas être en tissu risquant de fondre sous l'effet d'un arc ou de propager une flamme (nylon proscrit).

Les gants isolants (au sens de la norme) protègent contre les électrisations, mais doivent être protégés le cas échéant contre les attaques mécaniques par des sur-gants en cuir siliconés.

Contre les effets d'un arc électrique éventuel (projections de métal en fusion, UV) **une visière anti-UV** permet de protéger efficacement les yeux, elle sera donc obligatoirement utilisée dès qu'il y aura risque de court-circuit et donc même en TBT ! (Une batterie 12 volt 100 Ah peut fournir 800 A en cas de court-circuit ...)

Le casque indispensable pour les travaux extérieurs n'est pas obligatoire en intérieur s'il n'y a pas de risques de choc, il est alors remplacé par une coiffe isolante.

2.6.2 Equipements individuels de sécurité. (E.I.S.)

Les chaussures de sécurité assurent l'isolation par rapport aux sols conducteurs mais peuvent être remplacées par **un tapis isolant** qui protège contre les contacts « fortuits » (!), c'est à dire accidentels et furtifs : un fil qui se décâble.

Les outils isolants font de même partie des équipements individuels de sécurité.

2.6.3 Équipements collectifs de sécurité. (E.C.S.)

Lorsque l'opérateur est amené à pénétrer dans la zone dite de voisinage, ce qui impose que son habilitation comporte la lettre V, **il est obligé de s'en protéger en la supprimant** (à moins d'être habilité T). La protection se fait généralement par habillage au moyen **d'écrans de protection**, souvent des nappes isolantes fixées par des pinces en bois. (On peut utiliser des tôles métalliques épaisses si elles sont raccordées à la terre). Cet habillage s'effectue avec les EPI classiques.

Attention : on considère comme travail ou intervention au voisinage toute mise en situation au cours de laquelle l'opérateur (ou ses outils) peut, intentionnellement, ou non, pénétrer dans la zone dite de voisinage. Il faut donc prendre en compte : les gestes réflexes, les mouvements accidentels et autres ... **La zone de voisinage est donc souvent étendue au-delà de 30 cm en basse tension.**

Souvent l'opérateur doit identifier sa zone de travail pour interdire son accès au reste du personnel car celle-ci est dangereuse. Il utilise alors **le matériel de balisage** mis à sa disposition (banderoles, filets,

bannières, écriteaux etc ...) et, si besoin est, il doit empêcher l'accès à cette zone au moyen d'obstacles matériels (chaîne, barrières etc ...) :

2.6.4 Vérificateur d'absence de tension (VAT).

Un **vérificateur d'absence de tension** est un appareil permettant de vérifier qu'une partie de circuit est effectivement séparée de toutes sources de tension même « cachées » comme celle provenant de batteries d'accumulateurs ou de condensateur chargé. Il ne s'agit pas d'un appareil de mesure et son utilisation doit se cantonner à la fonction pour laquelle il est conçu (et vice versa, un multimètre ne peut pas servir de vérificateur d'absence de tension !). Il doit de plus être vérifié **avant et après** chaque utilisation. En BT ils doivent être manipulés avec des gants isolants s'il y a voisinage.

La vérification s'effectue **entre tous les conducteurs actifs et la terre.** (§ 7-1-2-5).

2.6.5 Mise A La Terre et en Court-Circuit (MALT & CC)

Ces dispositifs ne sont obligatoires qu'à partir de la BTB, ou dans les cas bien particuliers suivants :

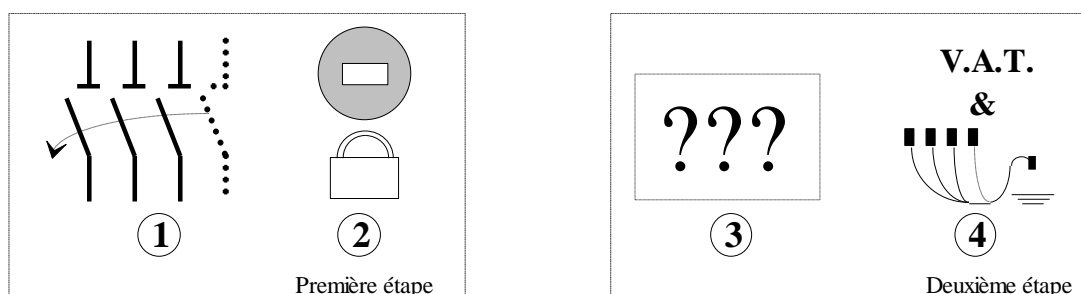
risque de tensions induites,
présence de condensateurs,
câbles longs ...

3 Opérations (travaux) hors tension.

3.1 Consignation.

3.1.1 Généralités.

La consignation est indispensable au bon déroulement des travaux hors tension et parfois pour les interventions de dépannage. Une consignation comporte deux étapes voir plus haut, la première est obligatoirement réalisée par une personne habilitée BC, la deuxième peut en revanche être réalisée par un B2 ou un BC en respectant une procédure bien particulière.



Lorsqu'une consignation ne comporte pas les opérations 3 ou 4 ci-dessus on parle de « mise hors tension » (§ 7-2).

La MISE HORS TENSION est autorisée pour des OPERATIONS d'ORDRE NON ELECTRIQUE dans l'ENVIRONNEMENT de CANALISATIONS ISOLEES, lorsque la CONSIGNATION n'est pas techniquement possible sans destruction de la canalisation.

La MISE HORS TENSION est autorisée pour réaliser une INTERVENTION BT ELEMENTAIRE dans le cadre du 10.4.

La MISE HORS TENSION permet de réduire le risque électrique. Elle n'est pas suffisante pour garantir la sécurité des personnes. Elle doit, obligatoirement, être accompagnée de mesures compensatoires déterminées à partir de l'analyse du risque électrique.

3.1.2 Première étape.

La séparation de l'ouvrage s'effectue :

sur tous les conducteurs actifs de manière certaine,
à l'aide de dispositifs ayant la fonction sectionnement,

(le retrait de fusibles ou de prise de courant constitue une séparation certaine de même que le débrogage d'un disjoncteur débrogable !)

La condamnation en position d'ouverture comprend :

la signalisation explicite d'interdiction de manœuvrer, **(obligatoire !)**

l'immobilisation mécanique si possible.

Remarque (§ 10-3-3-2) : dans le cadre d'une intervention la condamnation peut se cantonner à maintenir les appareils de séparation ouverts en vue de l'opérateur si l'accès à la zone de travail est limité aux seuls intervenants.

3.1.3 Deuxième étape.

L'identification de l'ouvrage permet d'être certain que les travaux seront effectués sur l'ouvrage séparé et sur lui seul, elle s'effectue sur schéma et sur site quand c'est possible. Cette identification est importante et elle est renouvelée dès qu'un autre opérateur intervient par exemple lors de :

la remise d'attestation de consignation	: BC => B2,
la remise d'ordre de travail	: B2 => B1 ou B0,
la désignation de surveillance	: B2 ou BR => B1 ou B0

La Vérification d'Absence de Tension doit s'effectuer le plus près possible du lieu de travail. Elle est immédiatement suivie de la **Mise A La Terre et en Court -Circuit** (bien respecter l'ordre de ces opérations qui permettent d'éviter les conséquences d'un retour accidentel de tension.

3.1.4 Remarques. (§ 7-1-5-1).

En présence de condensateurs (étage intermédiaire d'un onduleur par exemple) ceux-ci doivent être déchargés avant l'intervention.

La MALT et en CC non obligatoire en BTA le devient lorsqu'il y a risque de tension induite, de ré alimentation ou présence de condensateurs. (Un condensateur initialement déchargé peut très bien se charger lentement et cacher une tension qui deviendrait dangereuse après la VAT ...)

3.1.5 Déconsignation (§ 7-1-4).

Les opérations de DECONSIGNATION sont généralement conduites dans l'ordre inverse des opérations de CONSIGNATION.

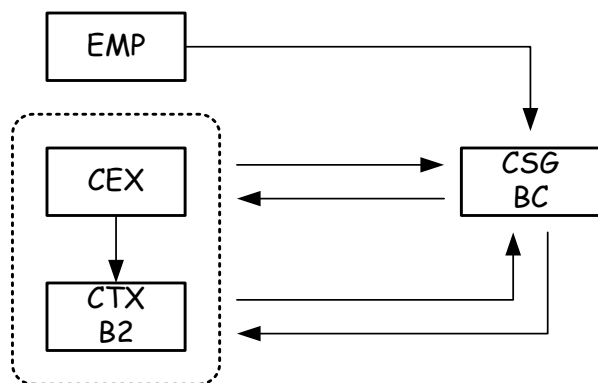
Dans le cas d'une CONSIGNATION EN UNE ETAPE, après réception du ou des AVIS DE FIN DE TRAVAIL, le CHARGE DE CONSIGNATION doit déconsigner l'OUVRAGE ou l'INSTALLATION en procédant aux opérations suivantes :

- dépose des mises en court-circuit, puis des mises à la terre ;
- retrait de la CONDAMNATION de l'organe de SEPARATION ;
- fermeture de l'organe de SEPARATION en accord avec le CHEF D'ETABLISSEMENT ou le CHARGE D'EXPLOITATION ELECTRIQUE.

Dans le cas d'une CONSIGNATION EN DEUX ETAPES, une fois que le CHARGE DE TRAVAUX a terminé son travail proprement dit, il dépose les mises en court-circuit, les mises à la terre en commençant par l'extrémité côté conducteur actif, puis remet l'AVIS DE FIN DE TRAVAIL au CHARGE DE CONSIGNATION.

Le CHARGE DE CONSIGNATION réalise ensuite les opérations de dé condamnation et referme l'organe de SEPARATION, en accord avec le CHEF D'ETABLISSEMENT ou le CHARGE D'EXPLOITATION ELECTRIQUE.

3.1.6 Rôles du chargé de consignation.



On trouve ci-contre les différents les trajets administratifs encadrant une consignation ...

3.2 Rôles de l'exécutant. (§ 7-4-10)

Un travail est une opération préparée à l'avance, en cas d'imprévu, même sans danger apparent, le travail doit cesser et le chargé de travaux doit être prévenu immédiatement.

3.2.1 Travaux électriques.

L'opérateur (B1 au minimum) doit :

- avoir reçu un ordre et suivre les instructions du chargé de travaux.
- respecter la zone de travail qui lui a été désignée par le chargé de travaux.
- veiller à sa propre sécurité et utiliser des outils adaptés.
- rendre compte des difficultés rencontrées notamment en cas d'imprévu !
- ne pas revenir dans la zone de travail une fois ses tâches terminées.

3.2.2 Non électriques.

Les consignes sont alors les mêmes que ci-dessus mais avec les modifications suivantes :

- L'habilitation n'est pas nécessaire mais la formation si !
- les ordres sont donnés par un B2 ou un chargé de chantier,

3.3 Rôles du chargé de travaux. (§ 7-4-6)

3.3.1 Généralités.

Le chargé de travaux, habilité B2, effectue les opérations qui lui sont confiées et notamment :

il doit assurer la sécurité collective du personnel placé sous ces ordres.

Le fait d'avoir la charge de la sécurité collective pendant toute la durée du travail conditionne son comportement **avant, pendant et après l'exécution d'un travail.** Cette fonction est particulièrement délicate puisque c'est sur le chargé de travaux que repose la sécurité ...

3.3.2 Avant le début des travaux.

- Les opérations suivantes sont obligatoires, elles font partie de **la préparation du travail.** Il faut :
- analyser tous les risques électriques (voisinage notamment !),
 - vérifier les habilitations,
 - mettre en place la surveillance nécessaire,
 - s'assurer du matériel de sécurité, de l'outillage, et des schémas de l'ouvrage,
 - attendre l'attestation de consignation,
 - organiser la chronologie des phases de travail,
 - donner les instructions aux exécutants :
 - nature des travaux,
 - identification de la zone de travail et des zones dangereuses (balisage),

précautions à respecter (comportement en cas d'imprévu) ...
réaliser ou faire réaliser la deuxième étape de consignation si besoin est,

3.3.3 Pendant ...

Puis, le chargé de travaux doit :
assurer la surveillance du personnel en permanence,
effectuer le travail demandé :
exécuter le travail proprement dit ...
veiller à la bonne exécution du travail.

Remarque.

En cas d'orage, toutes les opérations d'ordre électrique doivent être interrompues si l'installation est alimentée en extérieur par un réseau aérien (même une partie seulement).

3.3.4 Après la fin des travaux.

Enfin, le chargé de travaux doit :
vérifier visuellement le travail effectué,
contrôler le rangement de la zone de travail,
évacuer le personnel et signifier la fin du travail,
donner son avis de fin de travail au chargé de consignation.

4 Travaux au voisinage.

4.1 Principes.

4.1.1 Décret du 14 novembre 1988.

I définit entre autres les conditions OBLIGATOIRES à respecter pour assurer la protection des travailleurs « dans les établissements qui mettent en oeuvre des courants électriques ».

Section III : Protection des travailleurs contre les risques de contact avec des conducteurs actifs ou des pièces conductrices habituellement sous tension (contact direct).

Mise hors de portée des conducteurs actifs et des pièces conductrices sous tension.

Article 16

I. - Dans les locaux et sur les emplacements de travail, aucune partie active ne doit se trouver à la portée des travailleurs, sauf dans les cas mentionnés aux articles 21 à 28.

Cette interdiction s'applique également à tout conducteur de protection reliant à une prise de terre le conducteur neutre ou le neutre de la source d'alimentation.

II. - La condition imposée par le I ci-dessus peut être satisfaite ...

soit par le seul éloignement des parties actives,
soit par l'interposition d'obstacles efficaces,
soit par isolation.

III. - Les dispositions du I ne s'appliquent pas aux parties actives des circuits alimentés par une source dont l'impédance limite le courant ou l'énergie de décharge à des valeurs équivalentes à celles obtenues par une impédance de protection.

Le décret du 14 novembre 1988 exige trois mesures permettant de prévenir les contacts directs avec des conducteurs actifs. Ces mesures semblent similaires et ont toutes comme finalité d'empêcher physiquement le contact que ce soit par **éloignement**, par **isolation** ou au moyen **d'obstacles**.

4.1.2 Eloignement.

Cette mesure est claire, elle consiste à mettre de la distance entre les personnes et les parties actives accessibles. Par exemple limiter à 2,3 m la distance au sol des parties actives (en basse tension) surplombant un

local. Un autre exemple : les lignes de distribution haute tension acheminent l'énergie dans des câbles non isolés, la sécurité est cependant assurée par éloignement.

4.1.3 Isolation.

Les parties actives sont recouvertes par construction d'un isolant répondant aux impératifs des normes (tenue diélectrique de 20 000 V par exemple).

Les matériels se répartissent alors en quatre classes d'isolation :

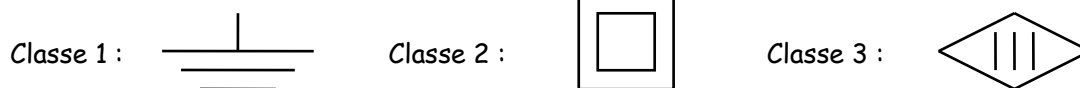
En **classe 0** l'isolation est réalisée par construction mais les parties métalliques ne sont pas raccordées à la terre, il n'est donc pas possible d'assurer la protection préventive contre les contacts indirects.

La **classe 1** se caractérise par l'isolation simple (construction) et par la mise à la terre des parties métalliques (le symbole de terre doit figurer sur l'appareil).

On parle de double isolation ou de **classe 2** lorsque les conducteurs actifs sont isolés deux fois comme par exemple un câble isolé dans une canalisation elle aussi isolante.

Une dernière classe existe, un peu improprement appelée **classe 3** puisqu'elle assure la protection par l'utilisation de la Très Basse Tension de Sécurité (TBTS) ce qui diffère des isolations précédentes.

(Voir plus loin la définition de la TBTS.)



4.1.4 Obstacles

La mise hors de portée au moyen d'obstacles réalisée par des barrières et des enveloppes est destinée à empêcher matériellement à toutes personnes d'entrer en contact avec les parties actives.

Ecrans.

Les écrans peuvent être isolants ou non.

Ils doivent interdire toute approche à moins de 10 cm si $U < 500$ V (BTA) et 20 cm si $U < 1000$ V (BTB) lorsqu'il s'agit de grillage dont l'indice est inférieur à IP 2X.

(Si l'écran est conducteur il doit de plus être mis à la terre comme lors d'une opération de consignation.)

Si l'écran est isolant, comme un film plastique (isolant au sens de la norme) par exemple, il n'y a pas de distance minimale, c'est à dire qu'on peut envelopper les parties nues sous-tension (voir la pose et la dépose d'écran dans la partie habilitation).

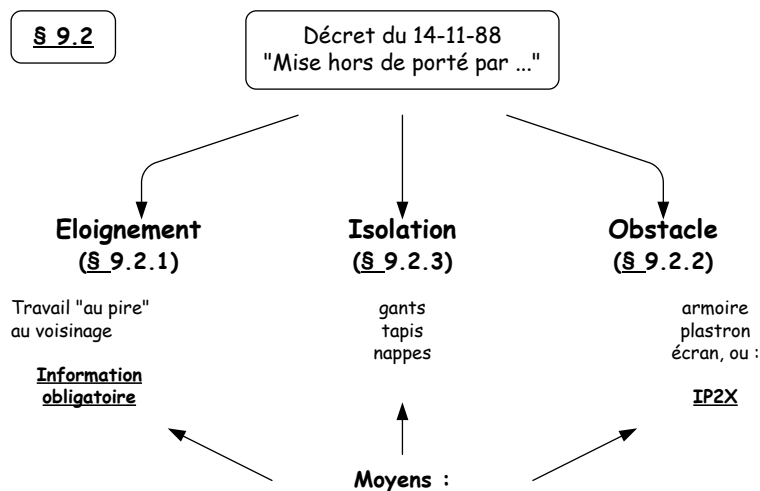
Balisage.

Ce problème sera revu par la suite, on peut cependant dire dès maintenant que, si, en cours d'intervention, un opérateur habilité se déplace, et ne fait plus obstacle à l'entrée sur sa zone de travail, il doit baliser celle-ci afin d'informer le reste du personnel et surtout de lui en interdire l'accès.

4.1.5 Conclusion.

Toutes les dispositions décrites ci-dessus sont facilement mises en oeuvre dans les locaux d'usage général qui ne présentent pas de risques électriques particuliers. En revanche, cela devient nettement plus problématique dans ceux où les risques électriques existent par « fonction » : les laboratoires et plates-formes d'essai par exemple.

Le décret du 14 novembre 1988 prévoit plusieurs dérogations, en fonction des locaux notamment, la principale condition à remplir pour déroger aux mesures ci-dessus est de respecter certaines consignes constituant la formation à l'habilitation.



La suppression du voisinage est fondée en fait sur les notions précédentes :

ELOIGNEMENT - ISOLATION - OBSTACLE !!!

Rester en dehors de la zone de voisinage souvent dur à respecter en l'absence de surveillance !

Supprimer momentanément le voisinage au moyen d'EPI.

Installer des écrans permettant d'éliminer le voisinage pendant un certain temps.

C'est le chargé de travaux qui choisit le moyen le plus approprié. (si la pose d'écran est plus complexe que le port des E.P.I. on choisira le deuxième moyen par exemple.)

4.2 Répartitions des tâches.

4.2.1 Rôles de l'exécutant. (§ 9-8-8)

Un travail est une opération préparée à l'avance, en cas d'imprévu, même sans danger apparent, le travail doit cesser et le chargé de travaux doit être prévenu immédiatement.

Pour les travaux électriques, l'opérateur (B1V au minimum) doit :

avoir reçu un ordre et suivre les instructions du chargé de travaux.

respecter la zone de travail qui lui a été désignée par le chargé de travaux.

veiller à sa propre sécurité :

porter des EPI si nécessaire (c'est le chargé d travaux qui décide),

utiliser des outils adaptés.

rendre compte des difficultés rencontrées notamment en cas d'imprévu !

ne pas revenir dans la zone de travail une fois ses tâches terminées.

4.2.2 Rôles du chargé de travaux. (§ 9-8-5)

Le chargé de travaux, habilité B2, effectue les opérations qui lui sont confiées et notamment :

il doit assurer la sécurité collective du personnel placé sous ces ordres.

C'est lui qui a en charge de supprimer ou faire supprimer le voisinage de la manière qu'il a décidé suite à l'analyse du risque et à l'organisation des tâches.

Il désigne un surveillant de sécurité.

5 Interventions⁵ et essais (§ 11-1).

5.1 Principes.

⁵ Voir la définition ci-dessus ...

Les personnes chargées des interventions doivent :

être habilitées BR ou BS selon le type et être désignées (par le chargé d'exploitation) pour effectuer l'intervention,
connaître parfaitement le fonctionnement de l'équipement, (schémas + pratique),
disposer d'appareils de mesure, de vérification et d'outils adaptés,
assurer leur sécurité ainsi que celle des exécutants mis sous leur responsabilité,

Elles sont amenées lors des interventions à effectuer des essais ou des mesures de vérification.

5.2 Interventions générales.

5.2.1 Dépannage. (§ 73)

Une intervention de dépannage comprend trois étapes.

La première consiste à **rechercher** et à **localiser** les défauts, c'est la plus dangereuse puisqu'elle nécessite souvent la présence de tension. L'intervenant peut alors effectuer les opérations suivantes :

Mesurages sans ouverture des circuits,
Insertion de shunt normalisé si $I_n < 50 \text{ A}$ (autorisée en BTA et TBT),
Débranchement ou re branchement **hors ou sous tension** de conducteurs,
circuits forcément protégés contre les surintensités,
section inférieure à 6 mm^2 pour la puissance,
à 10 mm^2 (?) pour le contrôle ou les mesurages,
conducteurs sous tension isolés au fur et à mesure !!!

Remarque :

le risque de court-circuit (arc électrique, projection) doit être pris en compte même en TBT !!

La seconde consiste à **éliminer** les défauts découverts, cette action peut être réalisée hors tension donc :

consignation (un opérateur BR peut l'effectuer sur la partie d'équipement le concernant),
travaux, (voir les règles énoncées auparavant)
déconsignation et vérification de la sécurité avant de passer à la troisième étape.

La troisième et dernière étape consiste, elle, à **régler et vérifier le fonctionnement de l'équipement** après réparation, en principe cette étape nécessite la remise sous tension. En fin d'intervention il faut prévenir l'exploitant des opérations effectuées.

5.2.2 Connexions en BTA. (§ 74)

Une opération de connexion sur un ouvrage de BTA est un branchement sous tension voir plus haut.

5.3 Interventions élémentaires.

5.3.1 Remplacement. (§75)

(Là, je n'ai pas d'inspiration !!! se référer au recueil d'instructions générales.)

5.4 Opérations spécifiques.

Les ESSAIS, les MESURAGES, les VERIFICATIONS et les MANŒUVRES décrits dans cet article sont des OPERATIONS d'ORDRE ELECTRIQUE exécutées sur des OUVRAGES ou des INSTALLATIONS électriques de toutes tensions. Ces OPERATIONS ne sont pas destinées à modifier les OUVRAGES ou les INSTALLATIONS.

5.4.1 Essais et vérification (§ 83 et § 84).

Ils sont régis par les mêmes règles. Il est à noter que dans les laboratoires et sur les plates-formes d'essais, les conditions imposent que les opérations « dangereuses » soient effectuées dans **une zone d'essais matérialisée et signalée !**

5.4.2 Mesures. (§ 82)

Les mesures de grandeurs électriques s'effectuent suivant la procédure des travaux (hors ou sous tension) ou des interventions selon les cas :

utilisation de pinces ampère métriques ou de voltmètres : habilitation B1 obligatoire,
mise en oeuvre d'oscilloscopes : BR ou B1 dirigé par un BR ou un B2.

Les prescriptions vues plus haut concernant les travaux et les interventions sont donc applicables.

Les appareils utilisés doivent être aux normes en vigueur dans le pays concerné.

En cas de voisinage obligatoire, mesure de tension par exemple, il est nécessaire de se protéger : EPI.

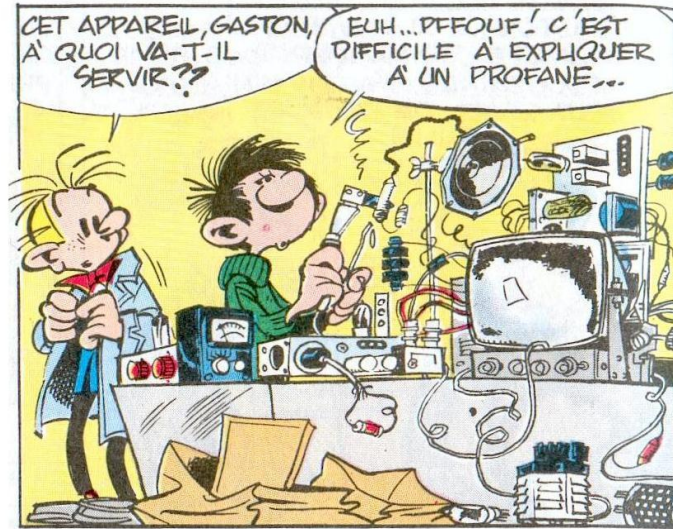
Mesure au secondaire d'un transformateur de courant avec pinces ampère métriques, il faut alors :

raccorder l'appareil à la pince,

introduire la pince autour du conducteur et fermer progressivement,

interrompre la continuité du circuit secondaire après avoir ouvert et retiré la pince uniquement.

Systeme automatisé



(Notes)

1 Présentation.

Ce document est un préliminaire à la partie automatisme de la formation.

Elle introduit les grandes notions nécessaires à la bonne compréhension d'un système automatisé : boucle, entrées, sorties, traitement.

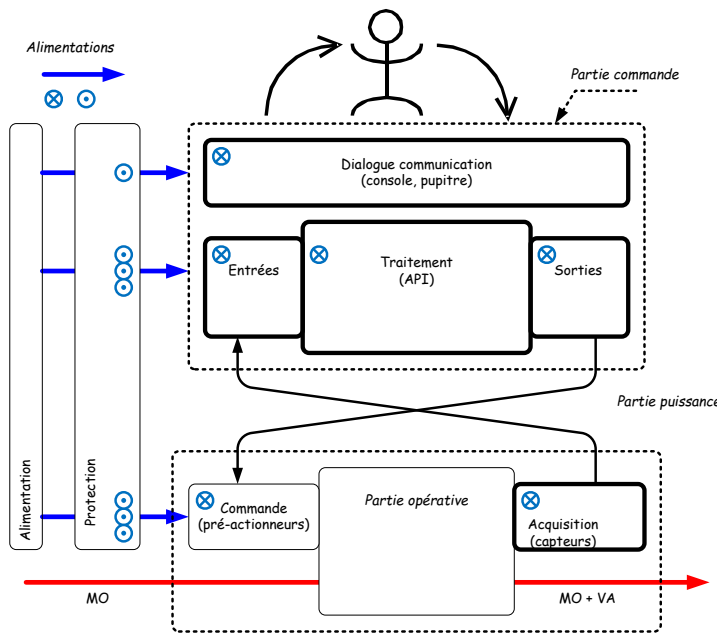
Elle se poursuit par une synthèse des connaissances indispensables concernant les bases de technologie et le choix des automates industriels.

L'ensemble de ces éléments est développés dans les chapitres suivants et surtout dans les séances de travaux pratiques qui vous préparent à la conduite des projets de deuxième année.

2 Structures.

2.1 Notion de boucle.

2.1.1 Synoptique.



2.1.2 Description.

Un système automatisé peut se représenter grosso modo comme sur le synoptique ci-contre.

On y retrouve toujours :

Une partie opérative.

Des capteurs qui donnent des informations sur les états de cette PO.

Un API reçoit ces informations sur ses entrées et qui, après traitement, actualise ses sorties.

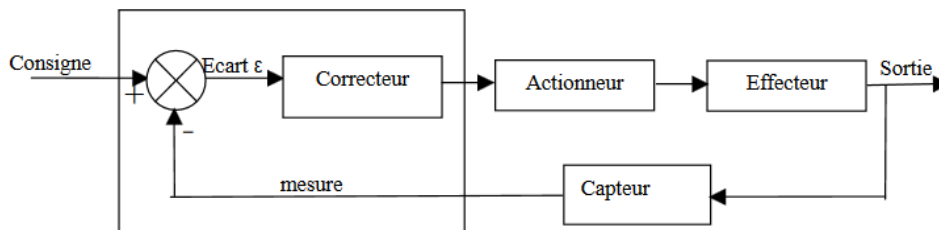
La PO est alors commandée en fonction de l'état des sorties grâce aux pré-actionneurs.

Et la boucle est « bouclée » !!!

La partie dialogue, qu'il s'agisse d'un pupitre ou d'un écran de supervision, fait la liaison avec l'utilisateur.

2.1.3 Asservissement.

Lorsqu'une grandeur de la PO doit suivre « en permanence » une consigne variable en fonction du temps on parle d'asservissement et on représente la boucle fermée concernée par cette grandeur de la manière suivante :



Enfin, le cas particulier où la consigne est une constante s'appelle une régulation.

2.1.4 Notion d'entrée et de sortie.

Attention, il faut toujours faire référence à un composant quand on parle d'entrée ou de sortie.

On raccorde toujours une sortie d'un composant sur une entrée d'un autre composant ...

La sortie d'un capteur est raccordée sur l'entrée d'un automate ...

La sortie d'un API peut être raccordée sur l'entrée d'un variateur ...

Ordre/compte-rendu/consigne/information.

2.1.5 Traitements.

Combinatoire	:	Sorties = fonctions des entrées
Séquentiel	:	Sorties = fonctions des entrées ET des sorties
Régulation asservissement	:	Séquentiel rapide entre une sortie et une entrée

2.2 Types d'information.

2.2.1 Analogique.

Les informations provenant de la PO sont physiques donc **analogiques** (voir ce terme en SPC).
Comme le traitement ne s'effectue pas en analogique, il faut que ces informations soient :
comparées à des seuils et on obtient des grandeurs **Tout Ou Rien (TOR)**.
converties en nombre et on obtient des **informations numériques**.

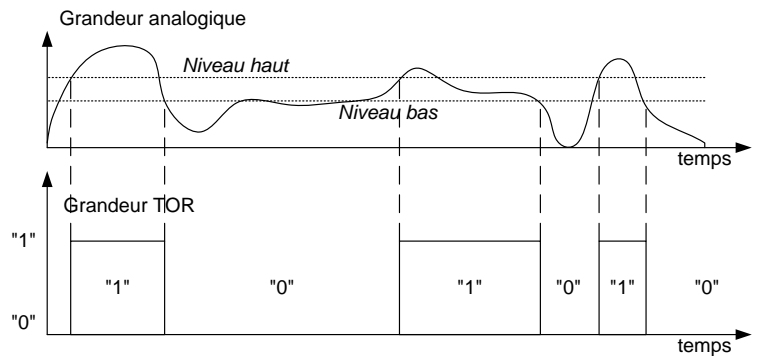
2.2.2 TOR¹.

Les grandeurs Tout Ou Rien sont toutes le résultat de la comparaison d'une grandeur analogique avec une référence qui se traduit par : vrai ou faux, < ou >, bas ou haut ...

Soit deux niveaux logiques :

« 0 » ou « 1 »

Pratiquement on observe forcément une différence entre les transitions ↑ et ↓
comme ci-contre =>



2.2.3 Numérique².

Les grandeurs numériques sont les représentations d'une grandeur analogique sous la forme d'une succession de bits ...

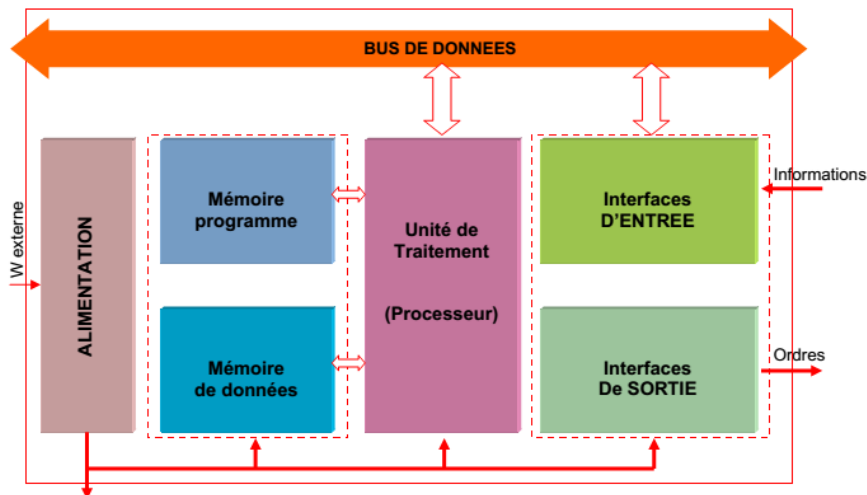
Ces bits peuvent : être physiquement « côte à côte » => représentation parallèle.

Se suivre dans le temps => représentation série.

Dans le dernier cas il faut un bout de programme pour reconstituer le mot représentant le nombre.

3 Automate industriel.

3.1 Architecture.



3.2 Entrée/sortie TOR.

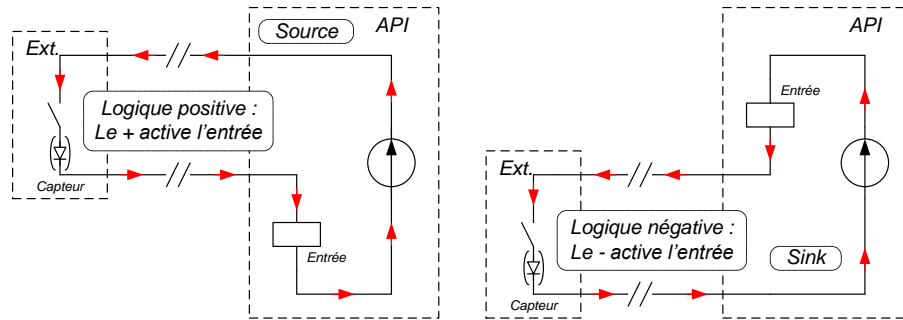
3.2.1 Logiques.

Les composants électroniques capteurs comme automates sont construits avec des transistors PNP ou NPN qui sont par nature unidirectionnels (le courant n'y circule que dans un sens).

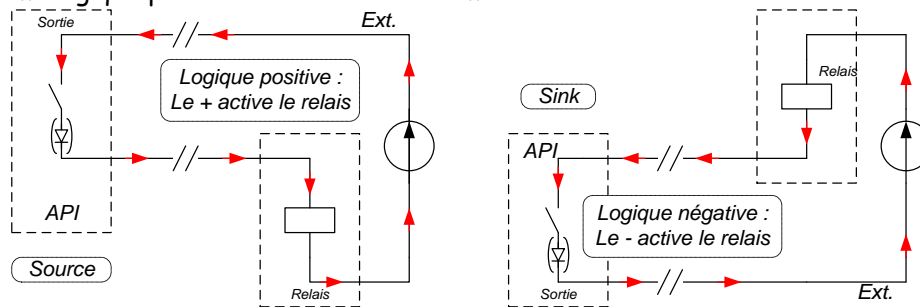
Il devient alors impératif de faire attention au sens de parcours du courant lorsqu'on associe deux composants électroniques. Le schéma de principe ci-dessous définit les deux manières de faire qu'on appelle logique positive ou négative :

¹ Voir le cours sur les détecteurs pour plus de détails ...

² Voir le cours sur l'information numérique pour plus de détails : Chapitre 23.

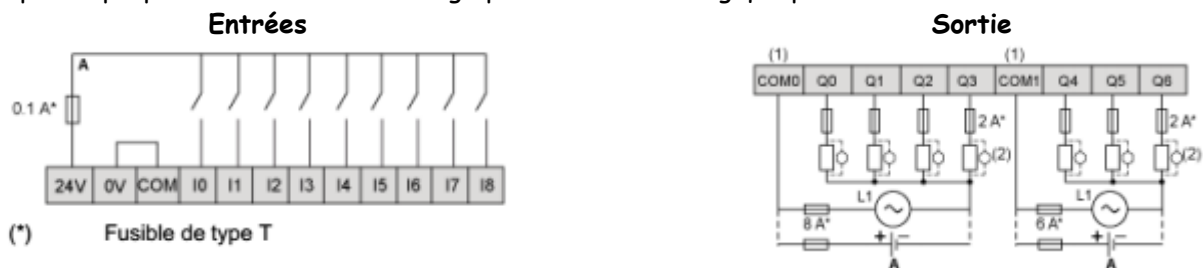


On retrouve la même logique pour les sorties d'un automate :



3.2.2 Raccordements.

Exemple de proposition schéma de câblage pour un M221 en logique positive :



3.3 Entrée/sortie analogique.

3.3.1 Introduction.

Les signaux analogiques provenant d'un capteur, doivent être conditionnés et convertis en signaux numériques. Cette conversion est faite par un **convertisseur analogique numérique (CAN)** située au niveau de l'automate (module E/S analogiques). En effet, le microprocesseur d'un l'automate ne peut traiter que des valeurs numériques ou binaires.

On distingue principalement 3 types de signaux d'entrée analogiques : les signaux type tension, courant et résistance (mesure température). (<https://www.automation-sense.com>)

3.3.2 Caractéristiques.

La caractéristique d'une entrée ou d'une sortie analogique se définit par deux paramètres :

La plage : c'est l'étendue des valeurs que peut prendre la grandeur analogique.

Voir TSX AEY 414 ci-contre =>

On retrouve les trois types : tension, courant ou résistance ...

Les valeurs peuvent être positive ou négative !

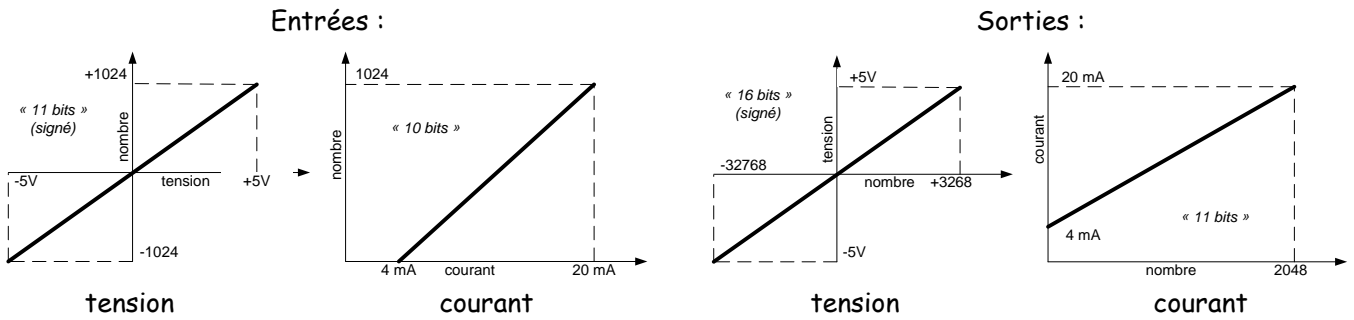
Attention la pleine échelle (PE) vaut « valeur max - valeur min » !
(exemple : 0/+10V, -5v/+5V, 0/20 mA, 4/20 mA ...).

La résolution : c'est le nombre de bits utilisés pour coder la grandeur.

Attention, si le nombre est signé cela enlève un bit pour coder la grandeur !
(entre 10 et 16 bits).

- +/- 10 V
- 0 à 10 V
- +/- 5 V
- 0 à 5 V
- 1 à 5 V
- 0 à 20 mA
- 4 à 20 mA
- 13 à +63 mV
- 0 à 400 ohms
- 0 à 3 850 ohms
- Thermosonde
- Thermocouple

La précision (ou le quantum) vaut : $Précision = \frac{PE}{2^{résolution}}$



3.3.3 Entrée analogique dédiée.

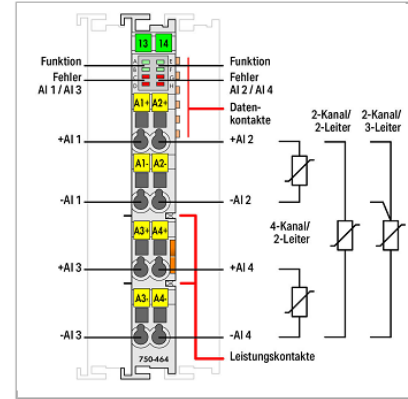
Sur l'exemple ci-contre on a un module d'entrée analogique du constructeur Wago.

Il est dédié à l'acquisition des températures à l'aide de sonde de type 2 fils ou 3 fils.

L'alimentation interne de l'automate se charge de fournir la tension nécessaire au fonctionnement de la sonde.

Une mesure du courant circulant dans la sonde permet de déduire la valeur de la résistance (et donc de la température) qu'il suffit alors de coder en un mot.

Le module d'entrée sert de conditionneur comme cela est vu dans le chapitre sur les capteurs³ ...



(750-464)

3.3.4 Sortie PWM/PTO.

Pour information, il existe des sorties à transistors rapides qui permettent de bénéficier des fonctions :

- PWM : Pulse Width Modulation Modulation de largeur d'impulsion : « fausse sortie analogique ».
- PTO : Pulse Train Output Sortie à train d'impulsion : positionnement par nombre d'impulsion.

3.4 Communication.

3.4.1 Adressage.

D'après la norme IEC 61131-3 :

%	Attribut	type	i.j.k
I:	Entrée	X: boolean	i: numéro de voie
Q:	Sortie	B: 8 bits	j: numéro de carte
M:	mémoire	W: 16 bits	k: numéro de rack
K:	constante	D: 32 bits	
		F: flottant	

La norme indique un nom symbolique associé à une adresse logique qui permet de structurer l'appellation des différentes entrées et sorties d'un automatisme :

- %IX0.4 = %IO.4 (entrée TOR n°4 d'un API)
- %IW0.1 (entrée Analogique n°1 d'un API)
- %QW1.2 (sortie analogique n°2 d'un API)
- %MD20 Mot double interne n°20.

3.4.2 Ecriture dialogue ...

Pour la communication, un automate nécessite plusieurs « ports » bidirectionnels, certains sont natifs d'autres doivent être ajoutés sous forme de module ou de passerelle.

- Communication de programmation : port USB (avec ou sans adaptation).
- Supervision/Dialogue : port Ethernet.
- Dialogue PO/Capteur : Coupleur Bus AS-i.
- Dialogue interne machine : Module communication CANOpen.

3.5 Choix.

3.5.1 Principes généraux.

Le choix d'un automate est industriellement guidé par des considérations économiques. Chaque entreprise a ses habitudes et a investi en matériel et en formation dans une marque et parfois même une famille d'automate. Les programmeurs et/ou les agents de maintenance sont alors efficaces pour assurer les mises au point et les dépannages.

³ Chapitre 24.

Les considérations plus technologiques arrivent ensuite : E/S (nombre et type), communication, fonctions spéciales ... Pour les prendre en compte, les fabricants proposent de plus en plus des configurateur en ligne qui permettent de structurer correctement une installation mais cela ne dispense pas de faire els analyses qui suivent ...

3.5.2 Inventaire des entrées et sorties.

Entrée :	TOR : logique (<>0 ?), rapide (comptage) ...	nombre ?
	Analogique : Type (V/I), résolution ...	nombre ?
	Dédiée	nombre ?
Sortie	TOR : logique (<>0 ?), rapide (PWM/PTO) ...	nombre ?
	Analogique : Type (V/I), résolution ...	nombre ?

3.5.3 Option-Modules.

Type de bus

Ethernet + CANopen

Ethernet + Modbus

Modbus

Modbus + CANopen

3.5.4 Sécurité.

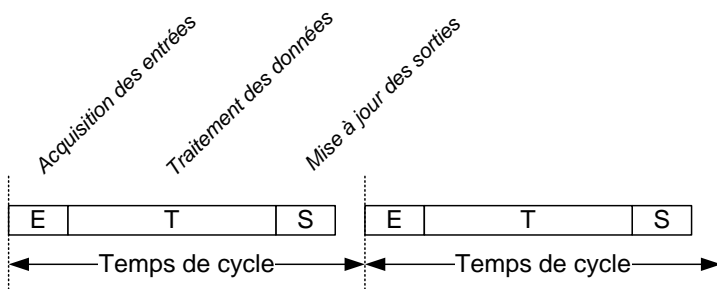
Voir le chapitre sur la sécurité machine⁴ ...

4 Programmation.

4.1 Fonctionnement du programme.

4.1.1 Cycle de traitement.

Un automate fonctionne de manière cyclique en 3 temps :



Acquisition des entrées :
mémoire stockage de l'état de la PO.

Traitement :
calcul des sorties (fonction des entrées).

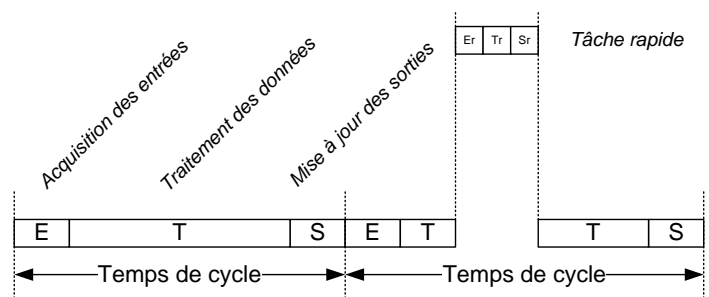
Affectation des sorties :
écriture des sorties pour action sur la PO.

Une information peut donc prendre 2 temps de cycle avant d'avoir une action sur la PO ...

4.1.2 Interruption.

Parfois une donnée à besoin d'être traitée plus rapidement, on parle alors de tâche événementielle ou de tâche « rapide ».

Elle « coupe la parole » au traitement en venant s'insérer dans celui-ci ...



Ce type de fonctionnement est forcément court par rapport au temps de cycle et prioritaire. Il est réservé aux tâches de comptage rapide par exemple si les impulsions d'un codeur ont une fréquence dont la période est supérieure au temps de cycle ...

4.1.3 Chien de garde.

Il faut ajouter au temps de cycle précédent un traitement interne TI qui permet à l'automate d'effectuer des opérations d'auto contrôle et de mise à jour de paramètres ...

Souvent une sortie peut être affectée à cette surveillance interne du fonctionnement. Elle est fermée si l'automate est alimenté et fonctionne correctement et elle s'ouvre en cas de problème (temps de traitement trop long % temps de cycle par exemple ...).

4.1.4 Traitement multitâches.

Savoir que ça existe ...

⁴ Chapitre 35.

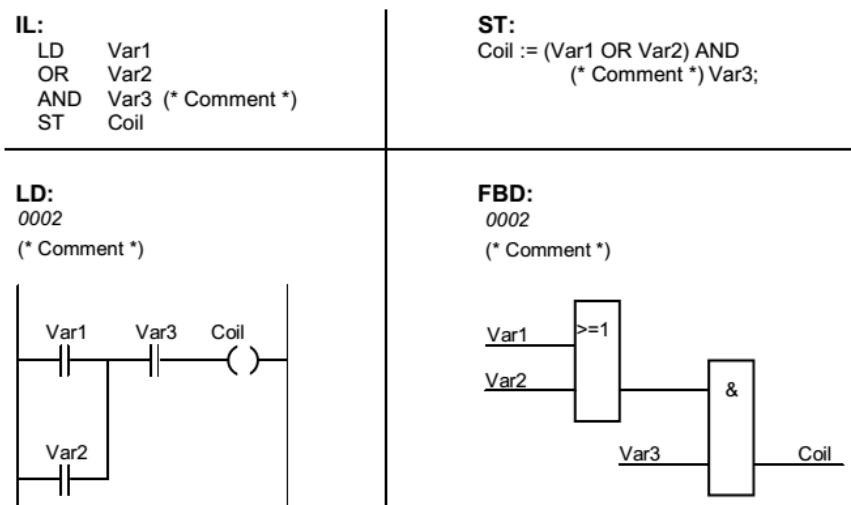
4.2 Langages.

L'essentiel de vos connaissances dans ce domaine viendra de votre implication en séance de TP !!!

4.2.1 Synthèse.

Langage	Avantages	Inconvénients
Ladder	Très visuel pour un bon électricien car proche du schéma électrique !	Comme pour le schéma, il faut être organisé !
Liste d'instruction	Existe souvent en transposition du précédent. A renseigner obligatoirement pour être lisible par un utilisateur !	Pas visuel du tout donc assez difficile à lire dès que le programme devient long et complexe.
Bloc fonction	Très visuel pour un bon automaticien qui connaît ses fonctions logiques !	Rapidement illisible si les équations logiques s'alourdissent.
Grafcet	Aperçu très simple du fonctionnement séquentiel de la machine. Gestion simplifiée des modes de marches et d'arrêt.	Pas toujours disponible dans l'industrie.
Structuré	Lisible quand il est associé à un organigramme, on le réserve surtout à la programmation d'algorithme ou de robotique.	Souvent du domaine de la programmation électronique.

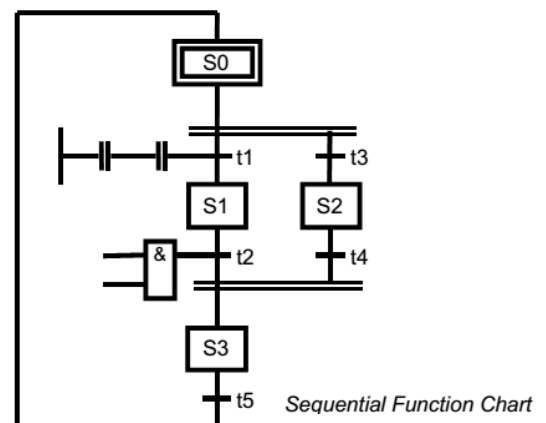
4.2.2 Comparaison (IEC 61131-3 : 7.2).



4.2.3 SFC : Sequential Flow Chart => Grafcet.

Figure 2.2 IEC61131-3 =>

Steps S0, S1 and S3 are processed sequentially.
S2 can be executed alternatively to S1.
Transitions t1 to t5 are the conditions which must be fulfilled before proceeding from one step to the next.



Voir le cours spécifique⁵ consacré à ce langage ...

⁵ chapitre 27

Logique



(Notes)

1 Variables binaires et fonctions logiques.

1.1 Introduction.

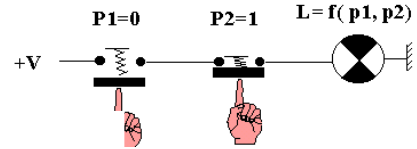
1.1.1 Définitions.

On appelle **variable binaire** une variable pouvant prendre deux valeurs notées "0" et "1".

☞ Exemples : Contact électrique ouvert et fermé, niveau de tension haut et bas (ex : + 5 V et 0 V), courant nul et non nul (ex : 0 mA et 20 mA).

On appelle **fonction logique** (ou booléenne) une fonction de variables binaires. Une fonction logique peut prendre deux valeurs notées "0" et "1".

☞ Exemple : L'état de la lampe L est une fonction logique des variables P1 et P2 liées aux boutons poussoirs.



1.1.2 Définition d'une fonction logique.

Une fonction logique est définie par une table donnant, pour l'ensemble des combinaisons des états logiques des variables d'entrées, la valeur correspondante de la fonction. Cette table est appelée **table de vérité**.

☞ Exemple de table de vérité.

Entrées			Sortie
a	b	c	f(a,b,c)
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

La table de vérité d'une fonction logique est composée d'autant de lignes qu'il y a de combinaisons possibles des variables d'entrée.

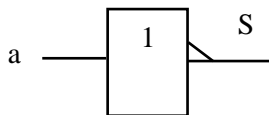
Le nombre des combinaisons possibles est égal à : 2^n (avec n : nombre de variables d'entrées).

Avec deux variables, il y a $2^2 = 4$ combinaisons. Avec trois variables, il y a $2^3 = 8$ combinaisons. Avec quatre variables, il y a $2^4 = 16$ combinaisons, etc.

Les combinaisons sont énumérées en comptant en **binaire naturel**. Ceci évite les oublis !

1.2 Opérateurs logiques fondamentaux.

1.2.1 Opérateur logique "Complément" (NON / NOT).

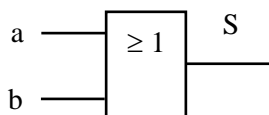


Expression algébrique : $S = \bar{a}$.

$S = \bar{a}$ se lit S égal "complément de a" ou "a barre" ou "Non a".

$\bar{0} = 1$	$\bar{1} = 0$	$\bar{\bar{a}} = a$	$\bar{\bar{\bar{a}}} = \bar{a}$
---------------	---------------	---------------------	---------------------------------

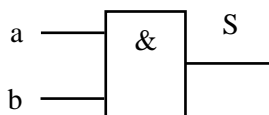
1.2.2 Opérateur "Somme" (OU / OR) : noté par un signe "+".



Expression algébrique : $S = a + b$.

$0 + 0 = 0$	$0 + 1 = 1$	$1 + 0 = 1$	$1 + 1 = 1$
-------------	-------------	-------------	-------------

1.2.3 Opérateur "Produit" (ET / AND) : noté par un point ".".

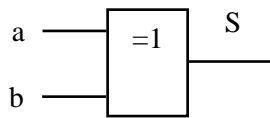


Expression algébrique : $S = a \cdot b$.

$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot 1 = 0$	$1 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

1.3 Fonction logique "OU exclusif" (XOR).

La fonction logique "OU exclusif" est une fonction souvent utilisée.



Elle s'écrit sous la forme : $S = a \oplus b$.

Cette fonction peut s'exprimer également en fonction des opérateurs NON, ET, OU :

$$S = a \oplus b = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$$

Remarque : La sortie S est à l'état "1" si le nombre des variables d'entrée à l'état "1" est impair et à l'état "0" si le nombre des variables d'entrée à l'état "1" est pair.

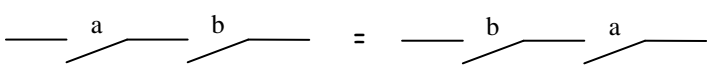
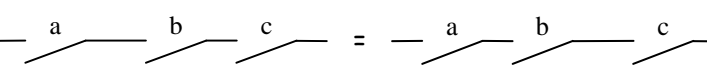
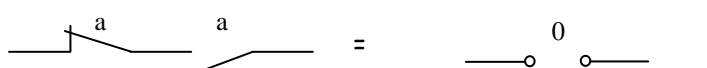
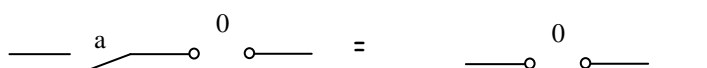
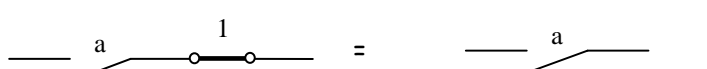
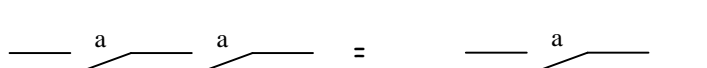
2 Propriétés de l'algèbre de Boole.

2.1 L'opérateur logique "Somme" OU.

Propriété	Exemple	Illustration électrique
Commutativité	$a + b = b + a$	
Associativité	$a + (b + c) = (a + b) + c$	
Complémentarité	$\bar{a} + a = 1$	
Elément absorbant	$a + 1 = 1$	
Elément neutre	$a + 0 = a$	
Idempotence ¹	$a + a = a$	

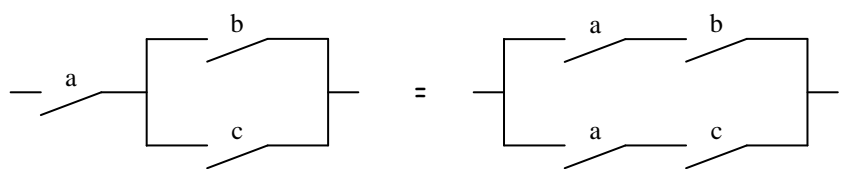
¹ En algèbre binaire, il n'y a pas de coefficient

2.2 L'opérateur logique "Produit" (ET).

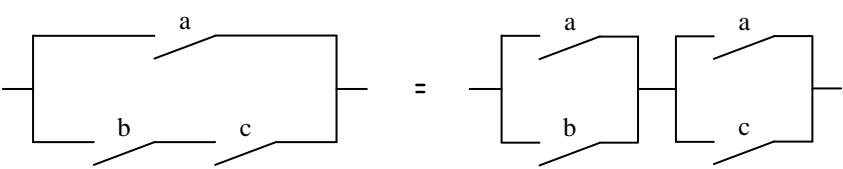
Propriété	Exemple	Illustration électrique
Commutativité	$a \cdot b = b \cdot a$	
Associativité	$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$	
Complémentarité	$\bar{a} \cdot a = 0$	
Élément absorbant	$a \cdot 0 = 0$	
Élément neutre	$a \cdot 1 = a$	
Idempotence ²	$a \cdot a = a$	

2.3 Autres propriétés.

2.3.1 Distributivité du produit logique par rapport à la somme logique.

Exemple	Illustration électrique
$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$	

2.3.2 Distributivité de la somme logique par rapport au produit logique.

Exemple	Illustration électrique
$a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$	

Nota Bene : Cette propriété de distributivité est interdite en algèbre classique !

² En algèbre binaire, il n'y a d'exposant.

2.3.3 Absorption.

a) Propriété d'absorption de la somme logique.

Exemple	Illustration électrique
$a \cdot (a + b) = a$	

↳ Démonstration mathématique : $a \cdot (a + b) = \underbrace{a \cdot a}_{=a} + a \cdot b = a + a \cdot b = a \cdot \underbrace{(1 + b)}_{=1} = a \cdot 1 = a$

b) Propriété d'absorption du produit logique.

Exemple	Illustration électrique
$a + a \cdot b = a$	

↳ Démonstration mathématique : $a + a \cdot b = a \cdot \underbrace{(1 + b)}_{=1} = a \cdot 1 = a$

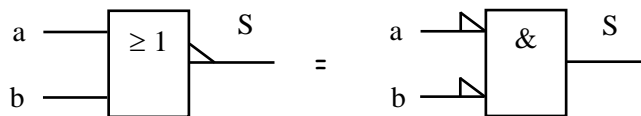
2.4 Théorèmes de De Morgan.

2.4.1 Premier théorème.

Le complément d'une somme logique de variables est égal au produit logique des compléments de ces variables.

$$\overline{a + b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$$

↳ Conséquence :

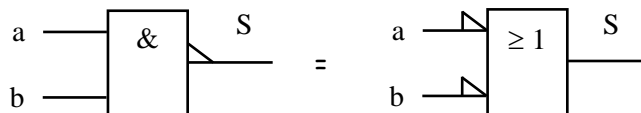


2.4.2 Deuxième théorème.

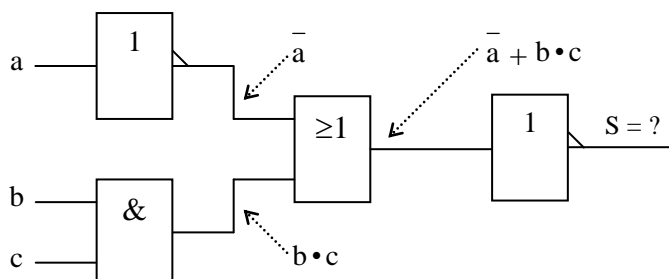
Le complément d'un produit logique de variables est égal à la somme logique des compléments de ces variables.

$$\overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$$

↳ Conséquence :



2.4.3 Application : Recherche de l'équation logique de la sortie S.



$$\begin{aligned}
 S &= \overline{a + b \cdot c} \\
 &= \bar{a} \cdot \bar{b \cdot c} \quad \text{↳ Application du théorème 1} \\
 &= a \cdot (\bar{b} + \bar{c}) \quad \text{↳ Application du théorème 2}
 \end{aligned}$$

3 Représentation d'une fonction logique.

3.1 Expression algébrique.

A partir d'une table de vérité, on peut exprimer la fonction logique correspondante sous la forme d'une somme de produit de variables (somme canonique). Ainsi, chaque monôme (produit) prend la valeur "1" pour une combinaison particulière où la fonction vaut "1" et "0" pour toutes les autres.

Exemple : Ecrivons l'expression de la sortie F définie par la table de vérité suivante.

a	b	c	F	
0	0	0	1	$\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	1	$\bar{a} \cdot b \cdot c$
1	0	0	1	$a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$
1	0	1	0	
1	1	0	1	$a \cdot b \cdot \bar{c}$
1	1	1	0	

L'équation logique est donc : $F = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + a \cdot b \cdot \bar{c}$.

Après simplification³ on obtient l'équation logique suivante : $F = a \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c$.

3.2 Schéma électrique à contacts.

3.2.1 Représentation.

Il s'agit de la représentation de la fonction logique sous la forme d'un schéma électrique développé.

Dans ce schéma électrique, les variables d'entrée sont représentées par des contacts normalement ouverts et les variables d'entrée complémentées par des contacts normalement fermés.

Variables d'entrée	Symbole horizontal	Symbole vertical
Contact à fermeture, appelé aussi normalement ouvert ou NO (Normally Opened). Passage du courant seulement s'il est actionné.		
Contact à ouverture, appelé aussi normalement fermé ou NC (Normally Closed). Passage du courant seulement s'il n'est pas actionné.		

La (ou les) variable(s) de sortie peuvent être des lampes ou des bobines de relais ou de contacteur.

Variables de sortie	Symbole horizontal	Symbole vertical
Lampe ou voyant de signalisation		
Bobine de commande de relais ou de contacteur		

* Nota Bene : Le sens de lecture d'un schéma électrique s'effectue : - de la gauche vers la droite;
- ou du haut vers le bas.

³ Voir la partie simplification plus loin.

3.2.2 Exemple : Schéma électrique représentant la fonction logique F.

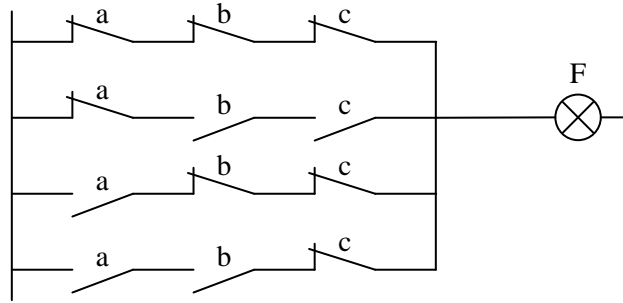


Schéma développé
AVANT simplification.

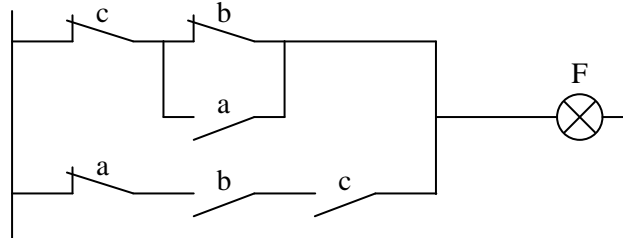


Schéma développé
APRÈS simplification.

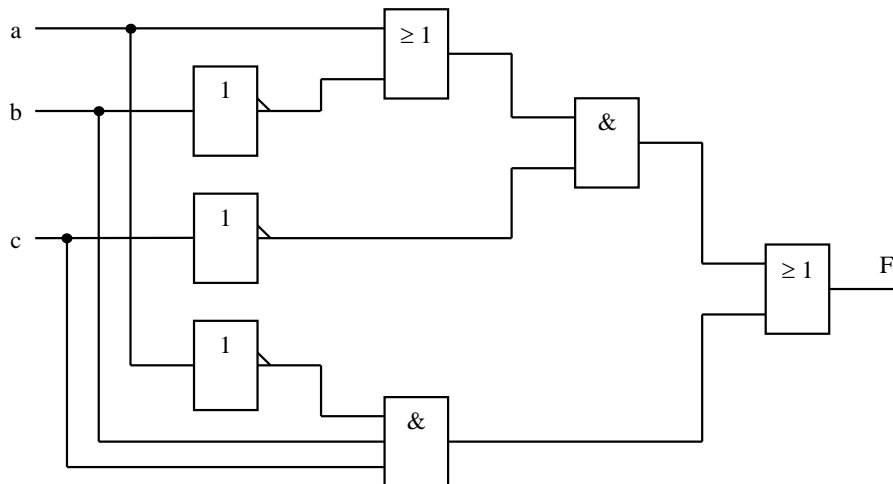
3.3 Logigramme.

3.3.1 Représentation.

Une fonction logique peut également être représentée graphiquement par un **logigramme**.

Cette représentation graphique s'effectue en utilisant les symboles des opérateurs "somme" et "produit" associés à des traits (niveau actif "1") ou des "triangles" (niveau actif "0") indiquant le niveau actif des variables sur lesquelles on effectue l'opération.

3.3.2 Exemple : Logigramme représentant la fonction logique F.

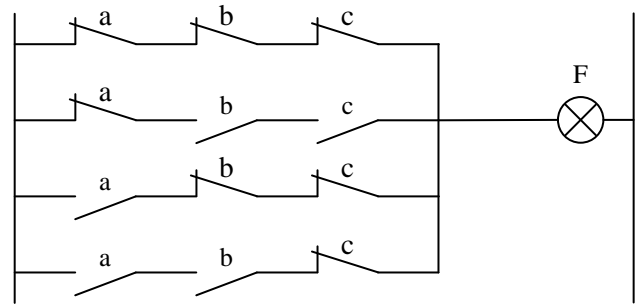


* Nota Bene : La lecture d'un logigramme s'effectue de la gauche vers la droite.

4 Simplifications.

Obtenir une forme "minimale" de l'expression d'une fonction logique, c'est à dire l'équation logique comportant le nombre minimal de termes et le nombre minimal de variables dans chaque terme.

Ceci permet de faciliter la conception, la réalisation, la maintenance et l'évolution ultérieure de la commande des systèmes automatisés, en simplifiant notamment l'écriture des programmes.



4.1 Méthode directe.

4.1.1 Principe.

Cette méthode consiste à repérer dans la table de vérité les produits élémentaires qui ne diffèrent que d'une seule variable. Ces produits sont donc indépendants de cette variable.

4.1.2 Exemple.

Soit la fonction F définie par la table de vérité proposée ci-dessous.

	a	b	c	F	
1 →	0	0	0	1	$\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$
	0	0	1	0	
	0	1	0	0	
	0	1	1	1	$\bar{a} \cdot b \cdot c$
5 →	1	0	0	1	$a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$
	1	0	1	0	
	1	1	0	1	$a \cdot b \cdot \bar{c}$
	1	1	1	0	

On constate que les lignes 1 et 5 donnent F à l'état "1" quel que soit l'état de la variable "a".

L'équation logique peut donc s'écrire : $F = \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot \bar{c}$.

4.1.3 Remarque.

Cette méthode est une méthode "intuitive" qui nécessite de l'expérience de la part de l'utilisateur.

4.2 Méthode de simplification algébrique.

4.2.1 Principe.

Cette méthode consiste à "manipuler" les équations logiques, en utilisant les propriétés de l'algèbre de Boole (voir chapitre 2 du Document Ressource intitulé " Les fonctions logiques. Notions d'algèbre de Boole").

4.2.2 Exemple.

$$\begin{aligned}
 F &= \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + a \cdot b \cdot \bar{c} \\
 &= \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot (\bar{a} + a) + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot \bar{c} \\
 &= \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot \bar{c} \\
 &= \bar{c} \cdot (\bar{b} + a \cdot b) + \bar{a} \cdot b \cdot c \\
 &= \bar{c} \cdot (\bar{b} + a) \cdot (\bar{b} + b) + \bar{a} \cdot b \cdot c \\
 &= \bar{c} \cdot (\bar{b} + a) + \bar{a} \cdot b \cdot c
 \end{aligned}$$

⇒ Car $\bar{a} + a = 1$.

⇒ Distributivité de la somme logique par rapport au produit logique.

⇒ Car $\bar{b} + b = 1$.

4.2.3 Remarque.

L'utilisation des propriétés de l'algèbre de Boole n'est pas forcément facile. Cette méthode nécessite une certaine réflexion et beaucoup d'entraînement. Elle prend d'autant plus de temps que l'équation est compliquée.

4.3 Utilisation des tableaux de Karnaugh.

4.3.1 Construction d'un tableau de Karnaugh.

☞ Un tableau de Karnaugh est une grille qui comporte autant de cases qu'il y a de lignes dans la table de vérité. Chaque case du tableau correspond à une combinaison des variables d'entrées.

Ces combinaisons sont placées dans l'ordre du codage *GRAY* (ou code binaire réfléchi) afin que les produits adjacents se trouvent dans des cases voisines (ou dans les cases extrêmes).

• Exemple pour la fonction F :

F		00	01	11	10
0					
1					

☞ Une fois le tableau construit, on note dans la case correspondante la valeur de la fonction pour chaque combinaison des variables d'entrée. Autrement dit, on transpose les états logiques de la table de vérité.

• Exemple pour la fonction F :

F		a b			
		00	01	11	10
0		1	0	1	1
c					
1		0	1	0	0

4.3.2 Description de la méthode de simplification.

☞ On recherche les **groupements maximum de 1, 2, 4, 8, ... , 2^n cases voisines** pour trouver les différents termes de la fonction simplifiée.

Chaque groupement de 2^n cases doit être en **ligne**, en **colonne**, en **carré** ou en **rectangle**.

• Exemple pour la fonction F :

F		a b			
		00	01	11	10
0		1	0	1	1
c					
1		0	1	0	0

☞ Pour chaque groupement, on élimine les variables qui changent d'état logique.

• Exemple pour la fonction F :

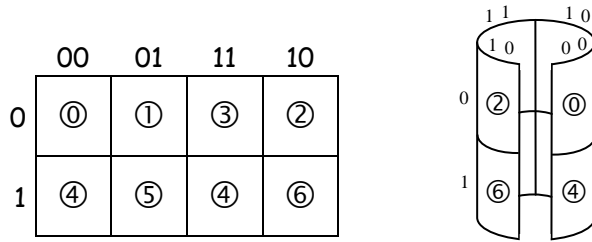
F		a b			
		00	01	11	10
0		1	0	1	1
c					
1		0	1	0	0

$a \cdot /c$ (rouge)
 $/b \cdot$ (bleu)
 $/a \cdot b \cdot$ (vert)

☞ On effectue enfin l'addition logique de tous les termes résultants des groupements.

On obtient alors l'équation logique simplifiée : $F = a \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c$.

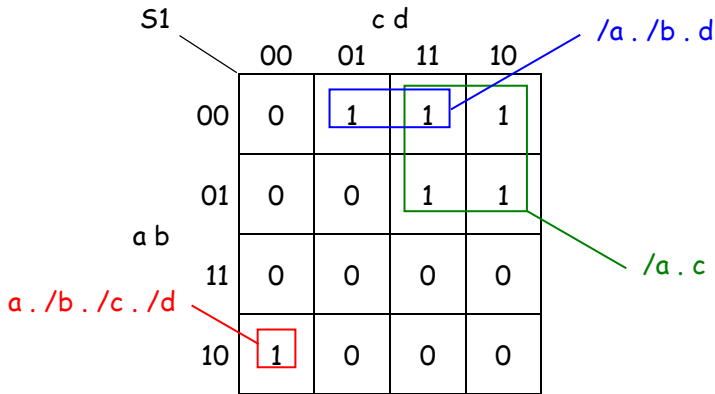
Remarque : Notez qu'une case de la colonne extrême gauche du tableau est adjacente à la case de la colonne extrême droite de la même ligne. On considère donc le tableau de Karnaugh comme un cylindre d'axe vertical.



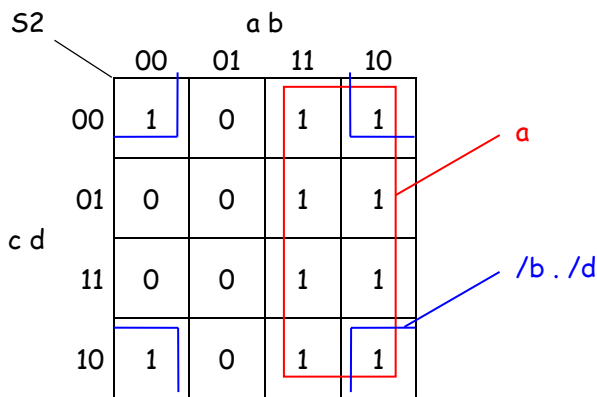
Les cases "0" et "2" sont adjacentes.

Il en est de même pour les cases "4" et "6".

4.3.3 Exemples de simplification d'une fonction logique à quatre variables.



$$S1 = \bar{a} \cdot c + \bar{a} \cdot b \cdot d + a \cdot \bar{b} \cdot c \cdot \bar{d}$$



$$S2 = a + \bar{b} \cdot \bar{d}$$

4.3.4 Cas des fonctions incomplètement définies.

Dans la pratique, il arrive que certaines combinaisons des variables ne puissent jamais exister. Il est donc possible d'utiliser ces combinaisons pour simplifier la fonction logique.

Ces combinaisons interdites sont appelées des conditions "disponibles" à la simplification et sont notées par la superposition d'un "1" et d'un "0" par le symbole "Ø" dans la table de vérité ou de Karnaugh. En effet, quelle que soit la valeur donnée à la fonction logique, le résultat ne sera pas modifié puisque la combinaison correspondante ne se produira jamais.

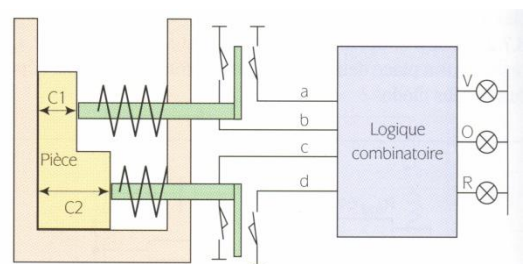
Exemple d'application : Système de contrôle semi-automatique de pièces d'usinage.

Un opérateur positionne les pièces usinées dans un support adapté. La mesure des cotes C1 et C2 est réalisée à l'aide de deux palpeurs de précision, munis chacun de deux capteurs de position.

Le résultat du test est affiché par l'allumage d'un voyant :

- vert "V" : cotes correctes = pièce bonne;
- orange "O" : cote(s) trop grande(s) = pièce à reprendre;
- rouge "R" : cote(s) trop petite(s) = pièce irrécupérable.

Chaque palpeur ne peut actionner qu'un seul capteur à la fois.



Quand la cote est correcte, les contacts associés au palpeur ne sont pas actionnés. Autrement dit, les capteurs "a", "b", "c" et "d" donnent l'information logique "0", lorsque la mesure de la cote est correcte.

Table de vérité.

Entrées				Sorties		
a	b	c	d	V	O	R
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	∅	∅	∅
0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	∅	∅	∅
1	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	1	∅	∅	∅
1	1	0	0	∅	∅	∅
1	1	0	1	∅	∅	∅
1	1	1	0	∅	∅	∅
1	1	1	1	∅	∅	∅

Equations logiques.

$$V = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \bar{d}$$

$$O = a \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot d$$

$$R = b + c$$

		c d			
		00	01	11	10
a b	V	00	01	11	10
	00	1	0	∅	0
	01	0	0	∅	0
	11	∅	∅	∅	∅
10	0	0	∅	0	

		c d			
		00	01	11	10
a b	O	00	01	11	10
	00	0	1	∅	0
	01	0	0	∅	0
	11	∅	∅	∅	∅
10	1	1	∅	0	

		c d			
		00	01	11	10
a b	R	00	01	11	10
	00	0	0	∅	1
	01	1	1	∅	1
	11	∅	∅	∅	∅
10	0	0	∅	1	

4.3.5 Remarques.

La méthode des tableaux de Karnaugh est une méthode graphique qui permet de simplifier de manière méthodique (en suivant des étapes bien définies) une équation logique.

Si les règles de simplification sont respectées, cette méthode donne toujours l'expression minimale de la fonction logique.

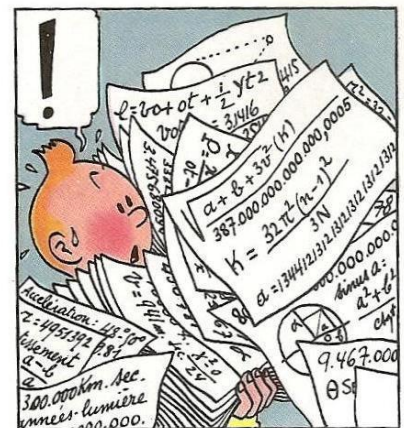
Au-delà de six variables d'entrée, la simplification au moyen des tableaux de Karnaugh devient quasiment impossible à utiliser.

5 Tableau de synthèse.

Fonction	Schéma développé	Table de vérité	Equation logique	Symbole logique (norme CEI 617-12)															
OUI		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	S	0	0	1	1	$S = a$										
a	S																		
0	0																		
1	1																		
NON		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	a	S	0	1	1	0	$S = \bar{a}$										
a	S																		
0	1																		
1	0																		
ET		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	$S = a \cdot b$	
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
OU		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	$S = a + b$	
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
NAND (NON ET)		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$S = \overline{a \cdot b}$	
a	b	S																	
0	0	1																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
NOR (NON OU)		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	$S = \overline{a + b}$	
a	b	S																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	0																	
XOR OU exclusif		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$S = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$ $= a \oplus b$	
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
NXOR ET inclusif (NON XOR)		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	$S = \bar{a} \cdot \bar{b} + a \cdot b$ $= a \odot b$	
a	b	S																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	

(Notes)

Information numérique



(Notes)

1 Les systèmes de numération.

1.1 Présentation.

1.1.1 Définition.

Tout nombre réel se décompose en fonction des puissances entières de la base de son système de numération. Un nombre N de "n" chiffres s'écrira donc :

$$N_{(b)} = a_{n-1} \cdot b^{n-1} + a_{n-2} \cdot b^{n-2} + \dots + a_1 \cdot b^1 + a_0 \cdot b^0.$$

avec b : base du système de numération,

a_i : symboles du système de numération dont il existe "b" espèces.

Par exemple, le nombre décimal 2019 s'écrit : $2019_{(10)} = 2 \cdot 10^3 + 0 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 9 \cdot 10^0$.

La base d'un système de numération correspond au nombre de chiffres (ou de symboles) différents qu'utilise ce système de numération.

1.1.2 Les principaux systèmes de numération.

Système	Base	Symboles	Poids
Binaire	2	0, 1	2^n
Décimal	10	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	10^n
Hexadécimal	16	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F	16^n

1.1.3 Tableau récapitulatif des principaux systèmes de numération utilisés dans les systèmes automatisés.

Décimal	Binaire naturel	Hexadécimal
0	0000 0000	00
1	0000 0001	01
2	0000 0010	02
3	0000 0011	03
4	0000 0100	04
5	0000 0101	05
6	0000 0110	06
7	0000 0111	07
8	0000 1000	08
9	0000 1001	09
10	0000 1010	0A
11	0000 1011	0B
12	0000 1100	0C
13	0000 1101	0D
14	0000 1110	0E
15	0000 1111	0F
16	0001 0000	10

1.2 Méthodes de conversion.

1.2.1 Conversion d'un nombre en base quelconque en nombre décimal.

Pour convertir un nombre d'une base quelconque en son équivalent décimal, on le développe en somme de puissance de la base.

$$\begin{aligned} \text{Conversion binaire - décimal : } 11010_{(2)} &= 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \\ &= 1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1 \\ &= 16 + 8 + 0 + 2 + 0 \\ &= 26_{(10)} \end{aligned}$$

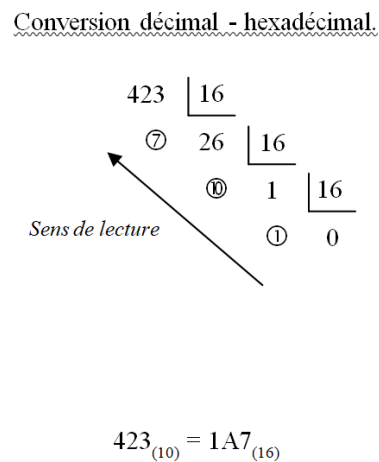
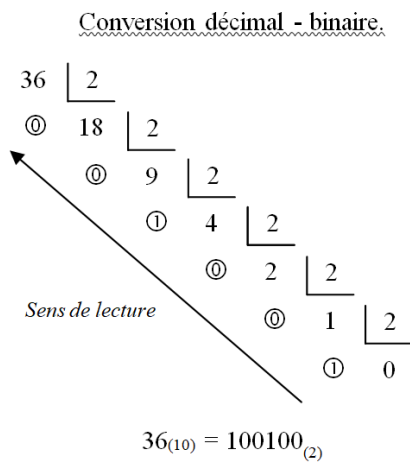
$$\begin{aligned} \text{Conversion hexadécimal - décimal : } 2AF_{(16)} &= 2 \cdot 16^2 + A \cdot 16^1 + F \cdot 16^0 \\ &= 2 \cdot 256 + 10 \cdot 16 + 15 \cdot 1 \end{aligned}$$

$$= 512 + 160 + 15$$

$$= 687_{(10)}$$

1.2.2 Conversion d'un nombre décimal en nombre en base quelconque.

Pour convertir un nombre décimal en une base quelconque, on divise le nombre par la base, puis le quotient ainsi obtenu par la base, etc. ... Le nombre cherché est donné par les restes successifs.



1.2.3 Conversion binaire - hexadécimal.

Le nombre binaire à convertir est divisé en groupe de 4 bits (en partant de la droite), puis on substitue à chaque groupe son chiffre hexadécimal équivalent.

$$00101100_{(2)} = ?_{(16)}$$

$\underbrace{0010}_{2}$

$\underbrace{1100}_{C}$

1.2.4 Conversion hexadécimal - binaire.

Chaque chiffre hexadécimal est remplacé par son équivalent binaire de 4 bits.

$$C7_{(16)} = ?_{(2)}$$

\underbrace{C}_{1100}

$\underbrace{7}_{0111}$

1.3 Données numériques.

1.3.1 Taille et noms usuels.

L'unité de base en numération physique est le **Bit** qui ne peut prendre que 2 valeurs : « 0 » ou « 1 ».

Un groupement de 8 bits est un **Octet** (ou **Byte**) qui peut donc prendre 256 valeurs différentes entre « 0 » et « 255 » en décimal.

$$00000000 < 01011100 (=72) < 11111111$$

Le bit le plus à **droite** est celui qui pèse le **moins lourd**, c'est le **Less Significant Bit : LSB**.

Le bit le plus à **gauche** est celui qui pèse le **plus lourd**, c'est le **Most Significant Bit : MSB**.

Pour augmenter le nombre de valeurs possibles, on utilise des mots de plusieurs octets, classiquement :

un mot contient	2 octets soit	16 bits	65535 valeurs possibles
un mots double	4 octets soit	32 bits	plus de 4 millions de valeurs ...

1.3.2 Signe.

Il est parfois utile de manipuler des entiers relatifs (c'est-à-dire prenant des valeurs négatives). On réserve alors le **bit de gauche** pour indiquer le signe du mot : « 0 » pour positif et « 1 » pour négatif, on parle de nombre signé.

Attention, dans le cas des nombres signés, le **MSB** devient l'avant dernier bit à gauche !

$$11111111 (= -127) < 11011100 (= -72)$$

alors que

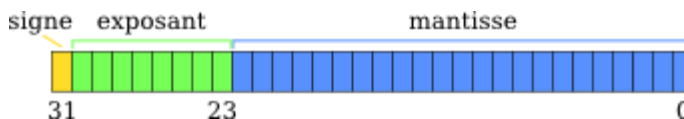
$$01011100 (= 72) < 01111111 (= 127)$$

1.3.3 Virgule.

Pour représenter un nombre à virgule (rationnel) on utilise la norme IEEE 754-1985 (équivalente à la norme CEI 559) qui définit tout nombre rationnel en :

$$\text{Nombre} = \text{signe} * \text{mantisse} * 2^{\text{exposant}}$$

Sans entrer dans les détails, on formate les nombres « à virgule » sur 4 octet comme suit :



1.3.4 Caractères.

Le code ASCII permet d'associer des caractères à des valeurs comme dans le tableau ci-dessous :

Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char
0	0	[NULL]	32	20	[SPACE]	64	40	@	96	60	`
1	1	[START OF HEADING]	33	21	!	65	41	A	97	61	a
2	2	[START OF TEXT]	34	22	"	66	42	B	98	62	b
3	3	[END OF TEXT]	35	23	#	67	43	C	99	63	c
4	4	[END OF TRANSMISSION]	36	24	\$	68	44	D	100	64	d
5	5	[ENQUIRY]	37	25	%	69	45	E	101	65	e
6	6	[ACKNOWLEDGE]	38	26	&	70	46	F	102	66	f
7	7	[BELL]	39	27	'	71	47	G	103	67	g
8	8	[BACKSPACE]	40	28	(	72	48	H	104	68	h
9	9	[HORIZONTAL TAB]	41	29	)	73	49	I	105	69	i
10	A	[LINE FEED]	42	2A	*	74	4A	J	106	6A	j
11	B	[VERTICAL TAB]	43	2B	+	75	4B	K	107	6B	k
12	C	[FORM FEED]	44	2C	,	76	4C	L	108	6C	l
13	D	[CARRIAGE RETURN]	45	2D	-	77	4D	M	109	6D	m
14	E	[SHIFT OUT]	46	2E	.	78	4E	N	110	6E	n
15	F	[SHIFT IN]	47	2F	/	79	4F	O	111	6F	o
16	10	[DATA LINK ESCAPE]	48	30	0	80	50	P	112	70	p
17	11	[DEVICE CONTROL 1]	49	31	1	81	51	Q	113	71	q
18	12	[DEVICE CONTROL 2]	50	32	2	82	52	R	114	72	r
19	13	[DEVICE CONTROL 3]	51	33	3	83	53	S	115	73	s
20	14	[DEVICE CONTROL 4]	52	34	4	84	54	T	116	74	t
21	15	[NEGATIVE ACKNOWLEDGE]	53	35	5	85	55	U	117	75	u
22	16	[SYNCHRONOUS IDLE]	54	36	6	86	56	V	118	76	v
23	17	[ENG OF TRANS. BLOCK]	55	37	7	87	57	W	119	77	w
24	18	[CANCEL]	56	38	8	88	58	X	120	78	x
25	19	[END OF MEDIUM]	57	39	9	89	59	Y	121	79	y
26	1A	[SUBSTITUTE]	58	3A	:	90	5A	Z	122	7A	z
27	1B	[ESCAPE]	59	3B	;	91	5B	[	123	7B	{
28	1C	[FILE SEPARATOR]	60	3C	<	92	5C	\	124	7C	|
29	1D	[GROUP SEPARATOR]	61	3D	=	93	5D	]	125	7D	}
30	1E	[RECORD SEPARATOR]	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	[UNIT SEPARATOR]	63	3F	?	95	5F	_	127	7F	[DEL]

Certains langages de programmation offre la possibilité de manipulation sur les caractères en utilisant ce code.

1.3.5 Synthèse intermédiaire.

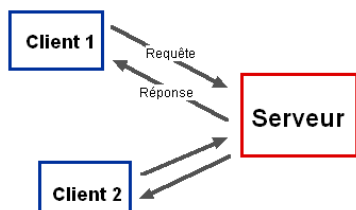
Type général	Nom usuel	Objet langage sur API Schneider	Taille (octets, bits)	Valeur mini	Valeur maxi	Précision relative (%) / chiffres significatifs
Booléen	Bool		1 mot	false	true	0 %
	Bit	Bit : %Mi	1 bit	0	1	0 %
Octet, non signé	Byte	Byte : %MBi	1 octet = 8 bits	0	2 ⁸ -1= 255	1 / 2 ⁸ = 0,39 %
Mot, non signé	Word	Word : %MWi	2 octets = 16 bits	0	2 ¹⁶ -1= 65535	1 / 65536 = 15 ppm
Entier, signé	Integer			-2 ¹⁵ = -32768	2 ¹⁵ -1= 32767	
Double mot, non signé	DWord	DWord : %MDi	4 octets = 32 bits	0	2 ³² -1= 4 294 967 296	1 / 2 ³²
Entier long, signé	LongInt			-2 ³¹ = -2 147 483 648	2 ³¹ -1= 2 147 483 647	
Quadruple mot, signé	QWord		8 octets = 64 bits	-2 ⁶³	2 ⁶³ - 1	1 / 2 ⁶³
Réel : « à virgule flottante »	Single	Real : %MFi	4	-3,4. 10 ³⁸ -1,17. 10 ⁻³⁸	+1,17. 10 ⁻³⁸ +3,4. 10 ³⁸	~ 6 chiffres significatifs
	Double		8	± 5,0. 10 ⁻³²⁴	± 1,7. 10 ⁻³⁰⁸	~ 16 chiffres significatifs
	Extended		10	± 3,4. 10 ⁻⁴⁹³²	± 1,1. 10 ⁴⁹³²	~ 20 chiffres significatifs
Caractère	Char		1	Voir codes ASCII		/
Chaîne de caractères	String	%MBi:n	n			/

Document d'un collègue du Lycée Palissy (merci à lui).

2 Architecture réseau.

2.1 Topologie.

2.1.1 Modèle client/serveur.



Le fonctionnement est le suivant :

Le client émet une requête vers le serveur grâce à son adresse et le port, qui désigne un service particulier du serveur.

Le serveur reçoit la demande et répond à l'aide de l'adresse de la machine client et son port.

En général on trouve des architectures du type client/serveur.

Les postes clients envoient des requêtes au serveur qui retourne une réponse.

2.1.2 Technologie point à point ou en bus.



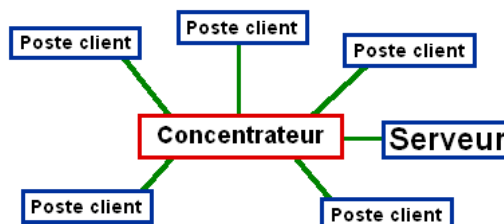
Voir le bus de terrain : ModBus ...

Une solution "simple" consiste à exploiter les fonctions de réseau poste à poste intégrées aux systèmes d'exploitation les plus courants (par exemple Window.....). Dans ce type d'architecture, il n'y a pas de serveur dédié. Tout poste qui fournit un service à un autre devient serveur.

Exemple : Sur le disque dur de chaque machine est créé un ou plusieurs "dossiers partagés" accessibles à tout moment par les autres.

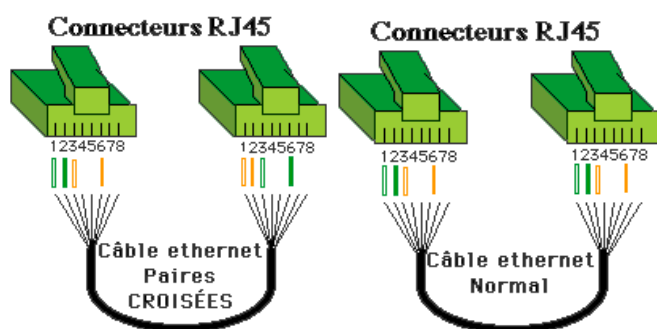
2.1.3 Etoile.

La topologie la plus courante pour un réseau local est une **topologie en étoile** selon le schéma ci-contre.



2.2 Supports.

2.2.1 Filaire.



En cuivre ces câbles contiennent 4 paires torsadées qui peuvent transmettre la voix, la vidéo et les données.

On distingue les normes :

- 10 base T : 10 MB/s ; 1 paire
- 100 base T : 100 MB/s 2 paires
- 1000 base T : 1GB/s 4 paires

La longueur est limitée à 100 m.

Pour éviter les perturbations électro-magnétiques, il est recommandé de :

- séparer les circuits « puissance » et « données » en les espaçant d'une dizaine de cm,
- croiser les circuits perpendiculairement si besoin ...
- utiliser des câbles blindés,

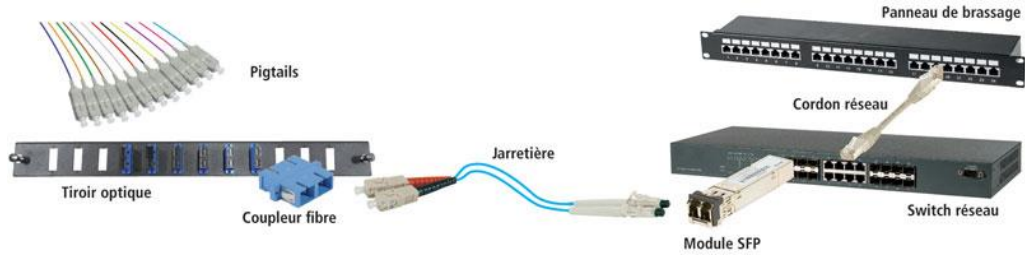
2.2.2 Optique.

La fibre optique est constituée d'un fil en verre dans lequel l'information numérique circule sous forme de lumière. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Longueur de transmission > à 2000 m.
- Vitesse environs 4100 x supérieure au cuivre.
- Insensibilité aux perturbations électro magnétiques

En revanche elle est relativement fragile.

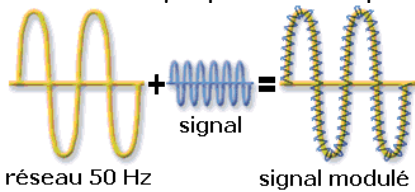
Le raccordement optique est généralement réservé aux parties amont d'un réseau :



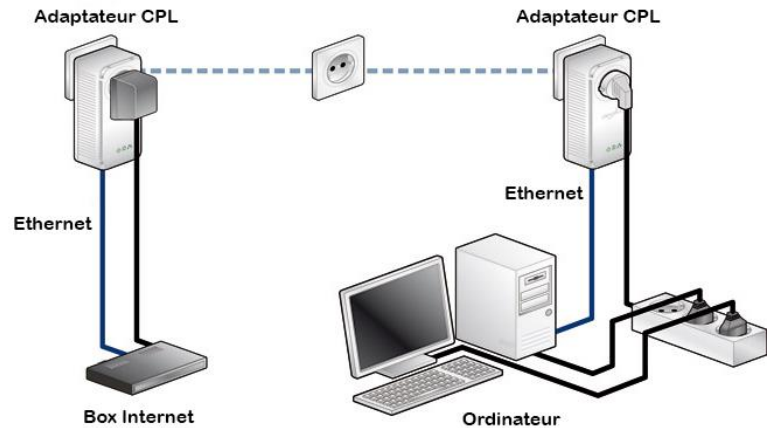
Le module SFP ci-dessus sert de convertisseur cuivre/optique.

2.2.3 CPL.

Les liaisons par courant porteur consistent à superposer un signal haute fréquence à la tension 50Hz du réseau de distribution classique pour le transport.



Les adaptateurs CPL ou coupleur mixent ou filtrent pour envoyer ou récupérer les données.



On peut s'attendre à une portée efficace de 300 m environs pour un débit de 200 Mb/s

2.2.4 Radio.

Les liaisons radio WiFi et Bluetooth ont l'avantage certain de l'absence de câblage mais ...

Sans entrer dans les détails, voici les avantages et inconvénients de chacune de ces deux technologies :

Technologie	Bluetooth	WiFi
Portée	< à 10 m (en fait qq m)	< à 100 m (en fait 30 m)
Vitesse	2 Mb/s	< à 54 Mb/s
Topologie	Etoile	Etoile
Sécurité	Faible	moyenne
Utilisation	Objet connecté	Mini réseau locaux

2.3 Composants.

2.3.1 Hub=Concentrateur.

C'est simplement une multiprise qui duplique une requête sur l'ensemble des connections. Cela diminue donc la bande passante de l'ensemble ... Zéro intelligence installée !!

2.3.2 Switch=Commutateur.

Le switch analyse lit les trames qui lui arrivent et ne les distribue qu'aux machines destinataires (il doit donc être capable de lire les adresses contenues dans les trames ...).

Les autres machines peuvent échanger simultanément.

2.3.3 Routeur.

Un routeur permet les échanges entre plusieurs réseaux.

2.3.4 Passerelle.

Ce composant fonctionne comme un traducteur de protocole entre deux réseaux. Ils sont notamment nécessaires pour adapter les réseaux industriels (ModBus, Can, Asi) à l'adressage IP de l'ethernet ...

3 Liaisons série.

3.1 Paramètres généraux.

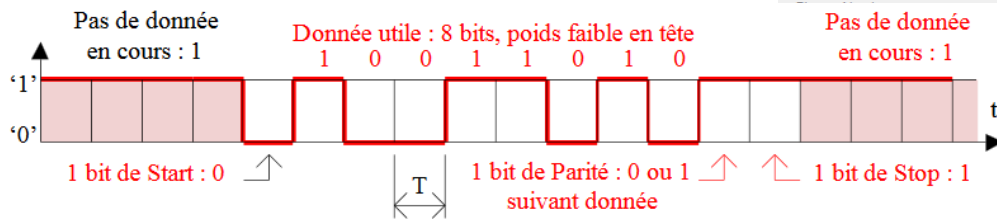
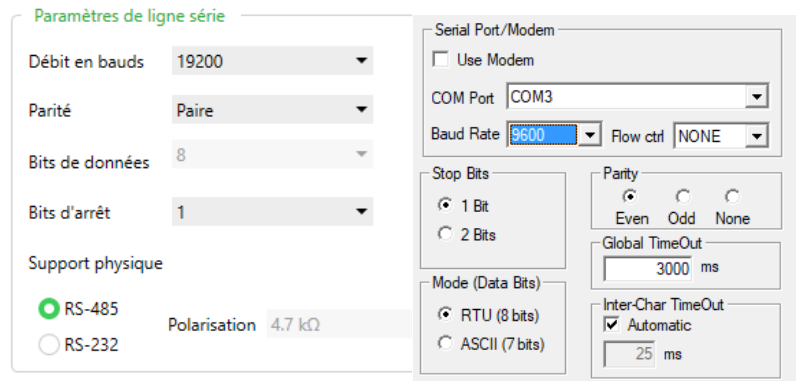
3.1.1 Trame.

L'échange des données s'effectue sous la forme ci-dessous :

- 1 bit de start,
- 5 à 8 bits de donnée (LSB en tête),
- 1 bit de parité (option),
- 1 ou 2 bit de stop.

Le débit en Bauds est réglable mais souvent les appareils s'adaptent ...

3.1.2 Réglages :

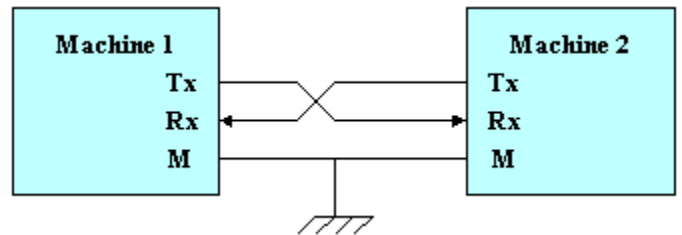


3.2 RS232.

3.2.1 Principes.

La transmission s'effectue sur 3 fils dont la masse. On trouve :

- Tx la borne d'émission,
- Rx la borne de réception.



3.2.2 Caractéristiques.

De 2,4 kbit/s sur ligne de 60 m à 19,2 kbit/s sur ligne de 7,6 m
C'est une liaison utilisé pour faire dialoguer deux appareils uniquement.

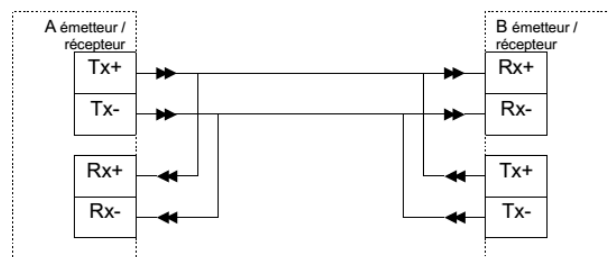
3.3 RS422 ou RS485.

3.3.1 Principes.

La transmission s'effectue sur 2 fils sans masse.

On trouve : Tx+=Rx+ et Tx-=Rx-.

Le niveau logique est défini par la différence de potentiel entre « + » et « - »



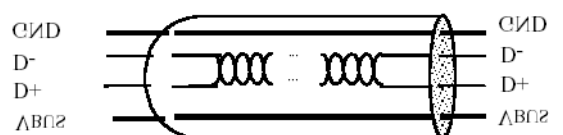
3.3.2 Caractéristiques.

De 100 kbit/s sur ligne de 1200 m à 35 Mbit/s sur ligne de 10 m, si la longueur est élevée, il faut penser à réduire la vitesse de transmission si la communication est difficile.

Nombre d'équipements < 32.

3.4 Liaison USB : Universal Serial Bus.

Les liaisons USB tendent à remplacer les liaisons série vues précédemment. Elles ont l'avantage d'augmenter la vitesse de transmission et d'être raccordable « à chaud » ...



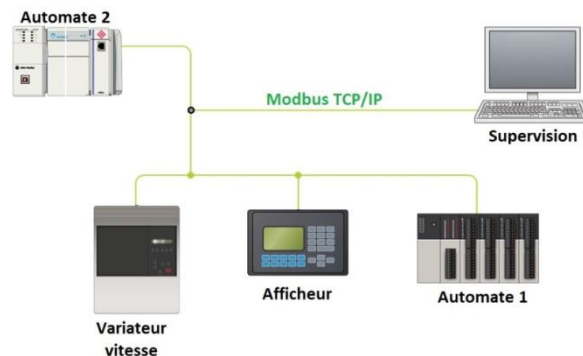
4 Bus de terrain.

4.1 Modbus/Profibus.

Le bus Modbus répond aux architectures Maître/Esclave.

Il a été créé par la société Modicon en 1978 pour interconnecter les automates programmables.

Le bus est composé d'une station Maître et de stations Esclaves. Seule la station Maître peut être à l'initiative de l'échange (la communication directe entre stations Esclaves n'est pas réalisable).



Le réseau Modbus Plus est un réseau local industriel, déterministe et performant, répondant à des architectures étendues de type Client/Serveur, combinant haut débit (1 Mbit/s), supports de transmission simples et économiques ainsi que de nombreux services de messagerie.

On peut lui connecter 64 nœuds sur 1 800 m (32 nœuds sur 450 m sans répéteur) sur paire torsadée.

4.2 Bus CAN.

4.2.1 Présentation.

Le bus CANopen s'appuie sur la technologie CAN (Controller Area Network), développée à l'origine pour les systèmes embarqués des véhicules automobiles ; la technologie CAN est maintenant utilisée dans de nombreux domaines comme :

le transport, les équipements mobiles,
les équipements médicaux...

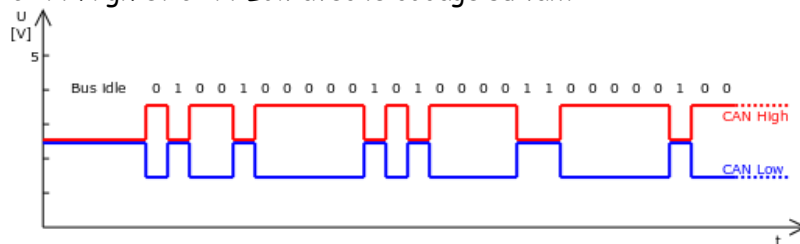
Le bus CANopen s'impose désormais dans les automatismes industriels et en particulier sur les machines. Il utilise une double paire torsadée blindée sur laquelle le raccordement d'un maximum de 127 équipements s'effectue par simple dérivation. Le débit binaire variable entre 10 Kbits/s et 1 Mbits/s est conditionné par la longueur du bus.

4.2.2 Raccordement.

Pour fonctionner chaque équipement est alimenté en 0/5V sur deux fils.

Les informations circulent sur deux autres fils ;

CAN-High et CAN-Low avec le codage suivant :



Connecteur circulaire M12 x 1 (5 plots)	
	Blindage 1
	UB+ (CAN V+) 2
	UB- (CAN GND) 3
	CAN-High 4
	CAN-Low 5

4.3 Bus ASI.

4.3.1 Définition.



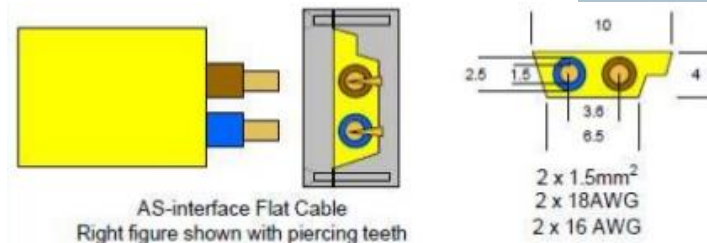
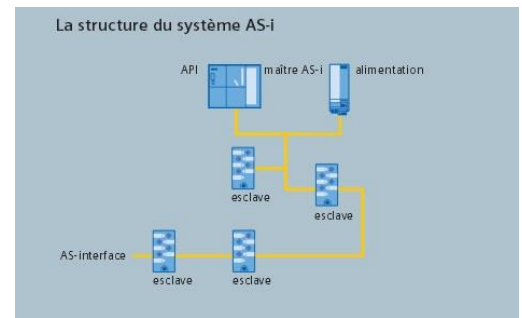
AS-i (Actuator Sensor interface) est un bus de capteurs et d'actionneurs. C'est un bus déterministe aux temps de réponse très courts qui s'appuie sur un standard industriel ouvert soutenu par l'association AS-i. Cette association compte parmi ses membres les leaders du marché des capteurs, des actionneurs, des automates programmables et de la connectique.

AS-i offre donc l'avantage de ne pas être un réseau propriétaire. Son raccordement vers le niveau supérieur dans la hiérarchie des réseaux peut être réalisé au travers des passerelles (comme la passerelle Fipio/AS-i) ou en utilisant les capacités de communication d'un coupleur de bus (automate...).

4.3.2 Structure.

On trouve :

- une alimentation qui alimente les composants raccordés sur le bus et qui peut transmettre les informations.
- un automate maître muni d'un coupleur AS-I.
- un câble jaune auto cicatrisant sur lequel on peut raccorder les composants.



Des esclaves : capteurs ou actionneurs « AS-i » ou classique avec une interface « AS-i ».

4.3.3 Caractéristiques.

Nombre d'esclaves	62 max.
Nombre d'E/S	496 entrées et 496 sorties (spécification 3.0)
Support	câble bifilaire non blindé pour les données et l'énergie
Temps de cycle	10 ms (20 ms) max.
Transmission de données	tout-ou-rien et analogiques (16 bits)
Longueur du câble	standard : 100 m; extensible à 600 m par adjonction de composants

Un maître est capable de piloter 62 esclaves sans répéteurs.

Chaque esclaves peut avoir jusqu'à 4 entrées et 4 sorties accessibles simultanément ce qui rend ce bus très intéressant pour les machines complexes de faible étendue (jusqu'à 100 m de longueur totale).

<http://www.knx.fr/KNX-France-accueil.html>

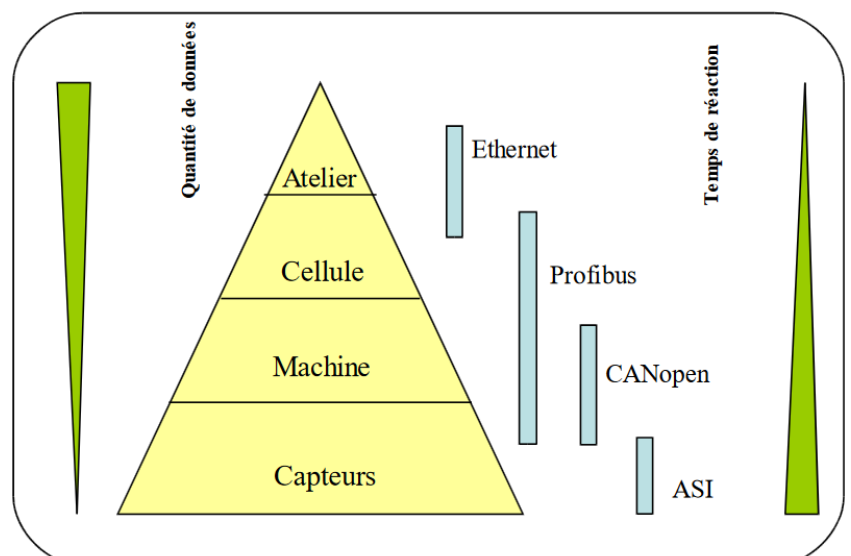
4.4 KNX (pour mémoire).

4.5 Synthèse.

La figure ci-contre illustre les différents domaines de prédilection des 4 principaux réseaux/bus industriels.

Chacun a ses spécificités et limites.

Entre le bus ASI orienté « capteur » et l'adressage TCP-IP propre à l'éthernet, on trouve CANOpen pour les machines complexes et le Profibus intégré aux lignes de production.



5 Protocoles ethernet.

5.1 Fonctionnalités.

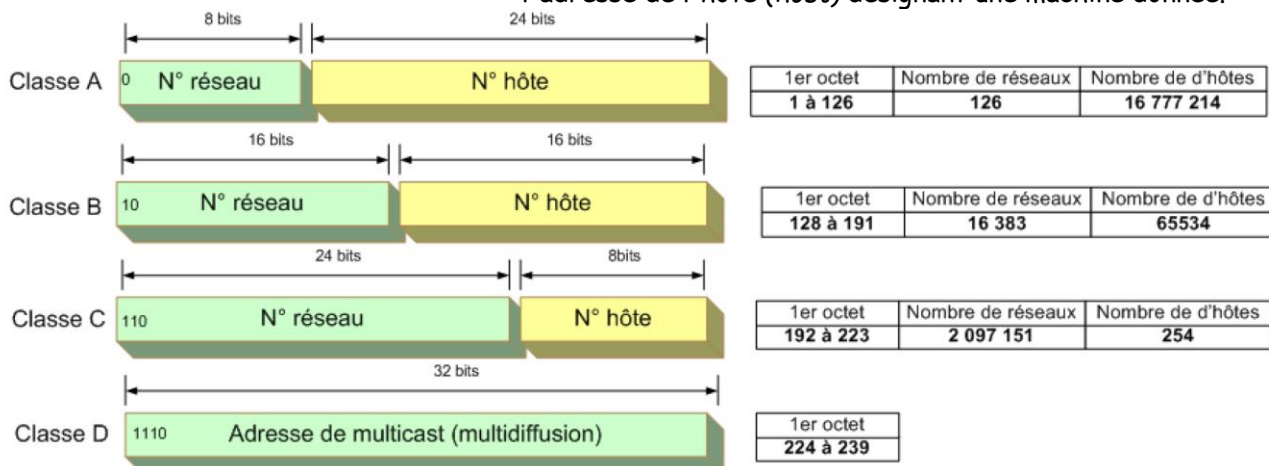
Les principales fonctions du protocole IP (*Internet Protocol*) sont :

- de définir le format des données (datagramme ou paquet de données);
- d'assurer l'adressage et le routage des datagrammes jusqu'à leur adresse de destination (routage);
- de fragmenter et de réassembler les datagrammes si nécessaire.

5.1.1 Adressage IP.

Sur un réseau TCP/IP, chaque machine se voit attribuer une adresse IP en principe unique. Les adresses sont codées sur 32 bits, soit 4 octets représentés en décimal et séparés par des points. Ces adresses comportent deux parties : • l'adresse du réseau (*net*);

• l'adresse de l'hôte (*host*) désignant une machine donnée.



Suivant l'importance du réseau, plusieurs classes sont possibles :

- la classe A : pour les réseaux de grande envergure (ministère de la défense, IBM, AT&T, ...);
- la classe B : pour les réseaux moyens (universités, centres de recherches, ...);
- la classe C : pour les petits réseaux comprenant moins de 254 machines (PME/PMI);
- la classe D : les adresses ne désignent pas une machine particulière sur le réseau, mais un ensemble de machines voulant partager la même adresse (*multicast*);
- la classe E : classe expérimentale, exploitée de façon exceptionnelle.

Classe A	0	Id. réseau (7-bits)	Identificateur hôte (24-bits)
Classe B	1 0	Identificateur réseau (14-bits)	Identificateur hôte (16-bits)
Classe C	1 1 0	Identificateur réseau (21-bits)	Id. hôte (8-bits)
Classe D	1 1 1 0	Adresse multicast (28-bits)	
Classe E	1 1 1 1	Format indéfini (28-bits)	

	Classe A	Classe B	Classe C
Premier réseau	1.x.x.x	128.1.x.x	192.0.1.x
Dernier réseau	126.x.x.x	191.254.x.x	223.255.254.x
Nombre de réseaux	126	16 382	2 097 150
Réseaux réservés à un usage privé	10.x.x.x	172.16.x.x à 172.31.x.x	192.168.0.x à 192.168.255.x
Adresse du réseau	x.0.0.0	x.x.0.0	x.x.x.0
Adresse de diffusion du réseau	x.255.255.255	x.x.255.255	x.x.x.255
Première machine	x.0.0.1	x.x.0.1	x.x.x.1
Dernière machine	x.255.255.254	x.x.255.254	x.x.x.254
Nombre de machines	16 777 214	65534	254
Masque de sous-réseau par défaut	255.0.0.0	255.255.0.0	255.255.255.0

Remarque : La notion de classe d'adresse IP est quelque chose d'obsole. Cela ne se fait plus depuis bien des années. Néanmoins, il est intéressant de voir ce que c'était, afin de mieux comprendre l'adressage IP actuel.

5.1.2 Adresses particulières ou réservées.

- L'adresse dont la partie basse (adresse machine) est constituée de bits à 0 est l'adresse du réseau.
- L'adresse dont la partie basse (adresse machine) est constituée de bits à 1 est l'adresse de diffusion (*broadcast*) et permet d'envoyer un message à l'ensemble des machines sur le réseau.
- L'adresse 127.0.0.1 est une adresse de bouclage (*localhost, loopback*) et permet l'utilisation interne de TCP/IP sans aucune interface matérielle.

- L'adresse 0.0.0.0 est une adresse non encore connue, utilisée par les machines ne connaissant pas leur adresse IP au démarrage.

5.1.3 Masque de sous-réseau.

Parfois, il convient de subdiviser un réseau en sous-réseaux afin de mieux s'adapter à l'organisation du travail et du personnel. Cette subdivision est faite localement en appliquant un masque (*subnet mask*) sur la partie hôte de l'adresse IP. Exemple de masquage :

Réseau de classe B	Réseau						Hôte													
Masque 255.255.255.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Identificateur Réseau						Identif. Sous-réseau			Identificateur Hôte										

5.1.4 Affectation d'une adresse IP.

On distingue deux situations pour assigner une adresse IP à un équipement :

- de manière statique : l'adresse est fixe et configurée le plus souvent manuellement puis stockée dans la configuration de son système d'exploitation.
- de manière dynamique : l'adresse est automatiquement transmise et assignée grâce au protocole DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) ou BOOTP. Autrement dit, le réseau attribue à l'équipement une nouvelle adresse à chaque fois qu'il se connecte au réseau.

Remarques :

- Les adresses IP statiques sont plus faciles à attribuer et à entretenir. Pour les administrateurs réseau, il devient plus facile de suivre le trafic sur le réseau.
- Le principal inconvénient des adresses IP statiques est que chaque adresse, une fois affectée, est dédiée par un seul équipement (ordinateur, API, écran tactile, centrale de mesure, etc.) même lorsque l'équipement n'est pas en cours d'utilisation. Étant donné que chaque équipement a besoin d'une adresse unique, cela limite le nombre d'adresses IP disponibles sur le réseau.

5.2 Annexe.

5.2.1 Evolution.

La croissance fulgurante des connexions Internet et la quasi-saturation du plan d'adressage de IP version 4 (IPv4) actuelle qui s'en suit, rend nécessaire à très court terme le passage à IP version 6 (IPv6).

Parallèlement à un champ d'adresse qui passe de 32 à 128 bits (soit 8 mots de 16 bits), d'autres fonctions améliorent le confort d'utilisation.

5.2.2 Protocole DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)

Protocole de configuration dynamique de l'hôte qui permet d'allouer à la demande des adresses IP aux machines se connectant au réseau. Il présente les avantages d'une gestion centralisée des adresses IP et permet d'obtenir un nombre d'adresses IP disponibles différent du nombre de machines du réseau.

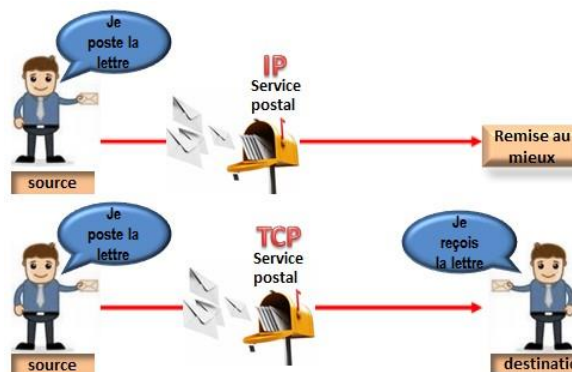
5.2.3 Ethernet

Norme de réseau local assurant un débit théorique de 10, voire 100 Mbits/s (Fast Ethernet).

* **IP (Internet Protocol)** : Adresse attribuée aux matériels (ordinateur, API, IHM, etc.) connectés à un réseau ou sur internet utilisant le protocole TCP/IP. L'adresse IP est comparable à une adresse physique.

* **TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)** : Suite de protocoles de communication sur internet basée sur la notion d'adressage IP, c'est-à-dire le fait de fournir une adresse IP à chaque machine du réseau afin de pouvoir acheminer des paquets de données.

L'association des deux protocoles TCP et IP permet d'acheminer les messages de bout-en-bout.



Capteurs



(Notes)

1 Présentation.

1.1 Introduction.

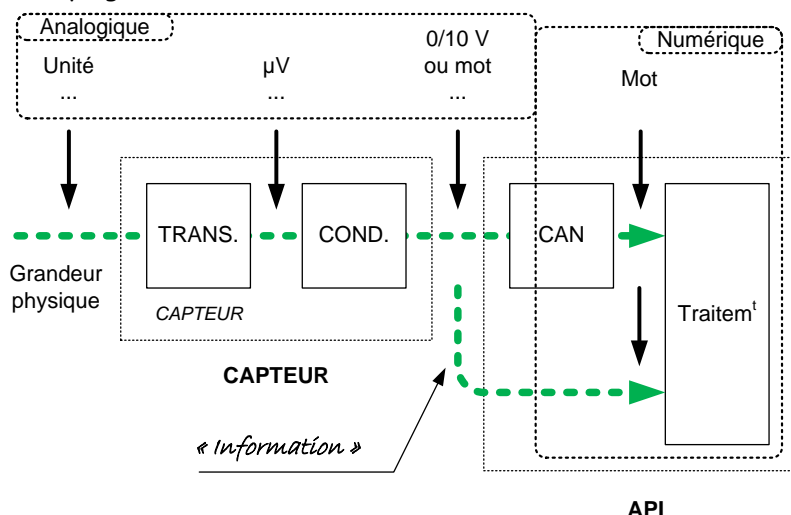
L'objectif de ce document n'est pas de reprendre les points déjà vus lors de votre scolarité antérieure concernant les moyens d'acquisition des données... (se référer aux documents en votre possession).

Il s'agit de développer les parties choix et mise en œuvre des différents capteurs utilisés en industrie¹.

Déterminer ³ la nature de l'information (Tout ou rien, numérique, analogique)
Choisir ⁴ des capteurs et des détecteurs
Concevoir/Adapter ⁴ les schémas de raccordement des capteurs et des détecteurs.
Raccorder/installer ³ un capteur, un détecteur
Réaliser ³ les paramétrages, les réglages d'un capteur, d'un détecteur

1.2 Chaîne d'acquisition.

1.2.1 Principe général.



1.2.2 Vocabulaire.

On parle de **corps d'épreuve** pour le composant qui réagit à la grandeur physique.

Dans ce document il est confondu avec le **transducteur** qui lui établit un lien entre la grandeur physique et une grandeur électrique.

Le **conditionneur** permet d'adapter la grandeur électrique quelconque issue du transducteur en une grandeur électrique analogique formatée :

0/10 V, +/- 10 V, 0/20 mA, 4/20 mA.

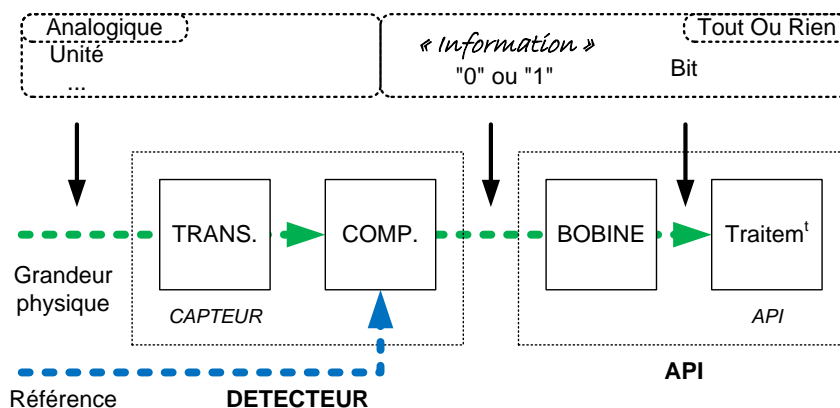
Ce sont les plus fréquentes dans le monde industriel.

Parfois le conditionnement va jusqu'à proposer une grandeur numérique en sortie, traitable par l'API.

1.2.3 Cas particulier : détecteur.

Par rapport à la chaîne précédente, on remplace le conditionneur par un comparateur à une référence pour fournir une réponse **binaire** :

« 0 » ou « 1 »,
« vrai » ou « faux »,
« oui » ou « non ».



On parle de thermostat ou vacuostat ou interrupteur de sécurité ou ...

1.2.4 Précisions.

¹ <http://guide.directindustry.com/fr/>

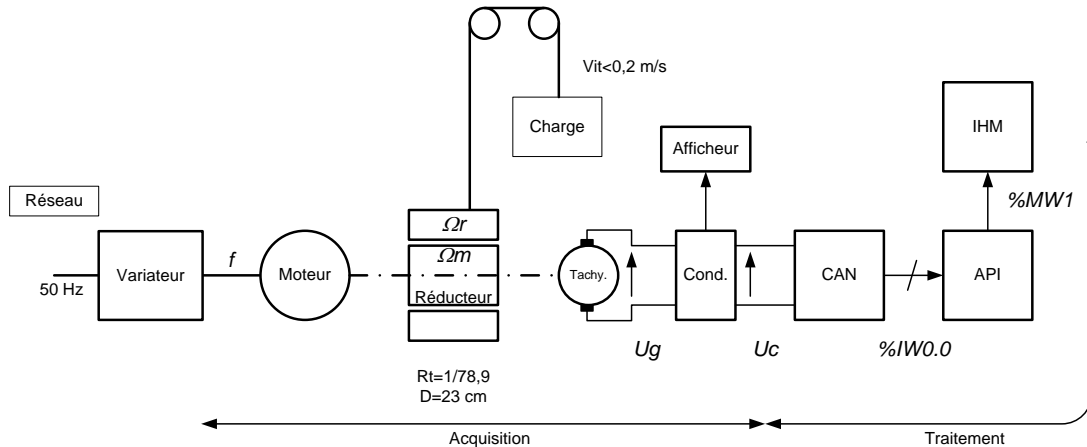
En Sciences Physiques et Chimie vous sont présentés les différents principes utilisés dans la plupart des capteurs figurant sur le marché donc nous n'y reviendrons pas.

La suite du document est consacrée au choix et à la mise en œuvre des capteurs utilisés en électrotechnique à l'exception des détecteurs (chapitre 25) et des capteurs de mouvements rotatifs numériques (chapitre 26) qui font l'objet de documents séparés.

1.2.5 Rappel.

La nature de l'information² est définie dans le document sur les systèmes automatisés ainsi que dans le document de SPC.

1.2.6 Exemple.



2 Mise en œuvre.

2.1 Conditionneur.

2.1.1 Problème.

Le transducteur convertit la grandeur physique en grandeur électrique sans que cette conversion soit forcément linéaire. Pour obtenir une image la plus proche possible de la grandeur physique il faut donc compenser les imperfections du transducteur et adapter le signal pour qu'il soit utilisable par l'automatisme auquel il est raccordé.

C'est le rôle du conditionneur.

2.1.2 Fonctions classiques.

La linéarisation consiste à rendre l'information proportionnelle à la grandeur physique ... Dans les système de pesage c'est la tare, pour les autres système on appelle ça l'offset.

La mise à l'échelle permet de disposer d'une grandeur électrique (tension ou courant) qui utilise pleinement la plage d'entrée de l'automatisme. On utilise un gain pour :

- diminuer la tension de sortie d'une génératrice tachymétrique
- augmenter la tension fournie par un thermocouple ...

2.1.3 Signaux « normalisés ».

Comme il a déjà été vu dans le chapitre 21 il existe 4 principaux formats de données analogiques.

Les signaux tension sont réservés aux liaisons courtes pour éviter les changements liés à la résistance des conducteurs.

Les liaisons courant peuvent être plus longues sans pertes ou déformations ...

Ils sont représentés ci-dessous :

² Analogique, TOR ou Numérique ...

Nature du signal	0/10V	0/10V	0/20mA	4/20mA
Caractéristique				
Longueur de la liaison	10 m maxi	10 m maxi	> 100m	> 100m
Sensibilité aux parasites	élevée	élevée	faible	faible
Avantage	économique	précis	Fournit une valeur nulle en cas de rupture de liaison	Détecte la rupture de liaison
Inconvénient	Fournit une valeur aléatoire en cas de rupture de liaison		Pas de détection de la rupture de liaison	Moins précis
Loi de conversion	$U_s = \frac{\text{valeur mesurée} \times 10}{\text{Étendue de la mesure}}$	$U_s = \frac{\text{valeur mesurée} \times 10}{\text{Étendue de la mesure} / 2}$	$I_s = \frac{\text{valeur mesurée} \times 20}{\text{Étendue de la mesure}}$	$I_s = \frac{\text{valeur mesurée} \times 16}{\text{Étendue de la mesure}} + 4$

2.2 Raccordement.

Voir l'exemple du conditionneur de température plus loin.

2.2.1 Sortie TOR.

Les sorties TOR sont généralement affectées à de la détection (niveau haut, défaut, surpression ...).

Les sorties relais sont libres de potentiel donc il faut suivre la logique de l'automate.

Les sorties à transistors dépendent de la logique du capteur, il faut donc vérifier que celle-ci est compatible avec l'automate chargé de l'acquisition !!!

2.2.2 Sorties tension.

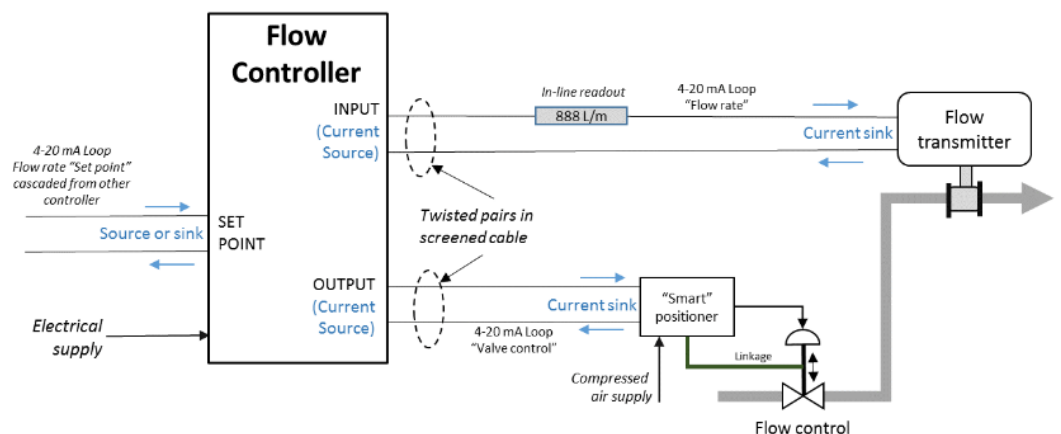
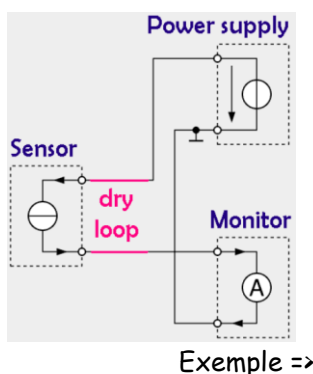
Les sorties tension ne posent pas de problème et se raccordent en parallèle en cas de récepteurs multiples (API+IHM par exemple).

2.2.3 Sorties courant.

On distingue les sorties passives (2 fils) et actives (3fils).

Il ne peut y avoir qu'un élément actif (source) dans la boucle en revanche plusieurs passifs (sink) sont possibles comme illustré ci-dessous :

Principe



2.3 Réseau AS-i.

Le bus AS-i est le bus typique associé à la gestion des capteurs sur une machine.

3 Familles de capteurs.

3.1 Positionnement.

3.1.1 Détecteurs de proximité.

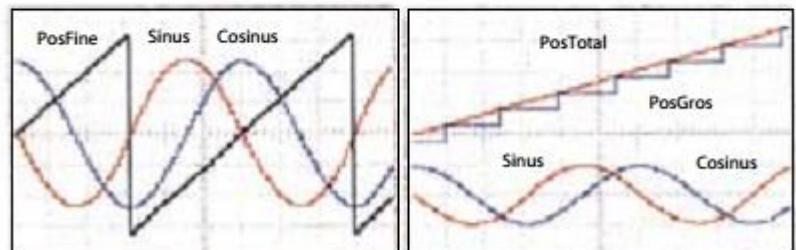
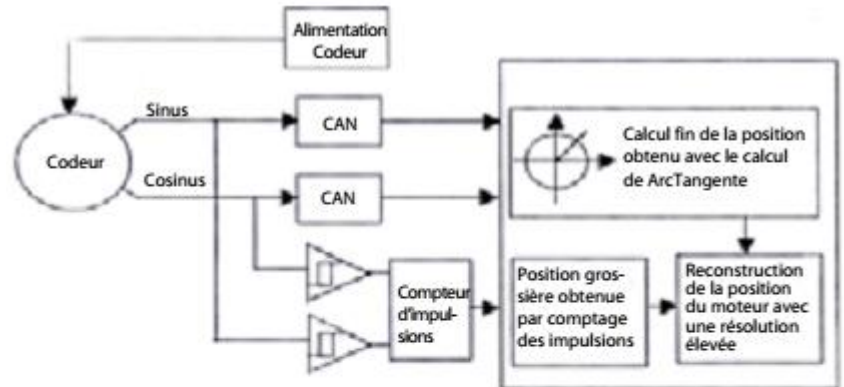
Les détecteurs sont vus au chapitre 25.

3.1.2 Position.

Les capteurs de mouvements rotatifs numériques sont vus au chapitre 26.

3.1.3 Codeur SinCos.

Mesure 765 mai 2004 (capteur brushless)



En utilisant à la fois la sortie sinus/cosinus et la sortie impulsions du codeur, il est possible d'obtenir une numérisation très précise de la position de l'arbre du moteur.

3.1.4 Potentiomètre.





3.1.5 Magnétostrictif.

3.2 Effort (force ou couple).

3.2.1 Jauge de contrainte.

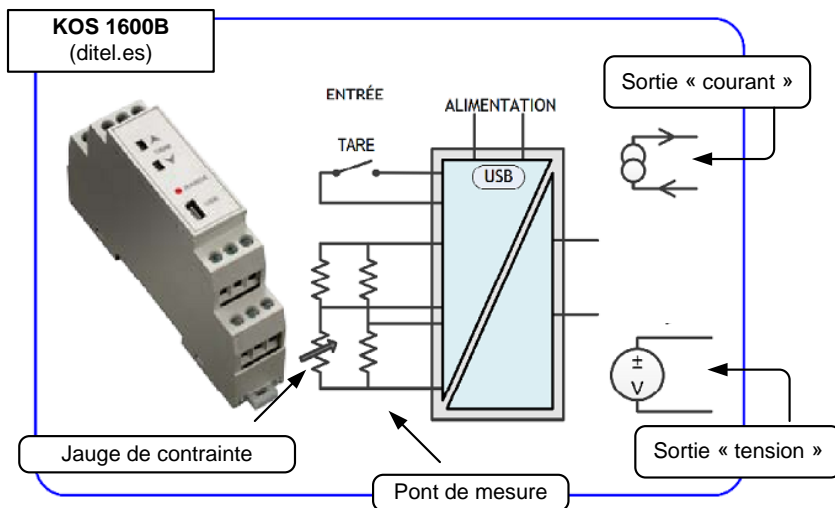
Voir le cours de SPC pour le principe physique.

3.2.2 Choix.

En « S »	Poutre ou en ligne	Cylindrique Bouton	Cylindrique Pancake
			

Forme de capteur	Fonction	Capacité	Application
En « S »	Compression/Traction	20 à 10 000 daN	Plateforme de pesage
Poutre ou en ligne	Flexion/Cisaillement	2 à 500 000 daN	Pesage, Agricole
Cylindrique Bouton	Compression	1 à 50 000 daN	Surveillance
Cylindrique Pancake	Compression/Traction	25 à 500 000 daN	Industrie, fortes charges

3.2.3 Conditionneur.



Les conditionneurs permettent d'alimenter le pont de mesure (Wheatstone) dans lequel est insérée la résistance de mesure (jauge de contrainte).

Ils adaptent la très faible tension de mesure pour la rendre « lisible » par un automate.

Ils proposent des sorties en tension ou en courant.

Parfois une entrée supplémentaire permet de « tarer » le pont, c'est-à-dire ne pas tenir compte de l'effort « à vide ».

3.2.4 Configuration.

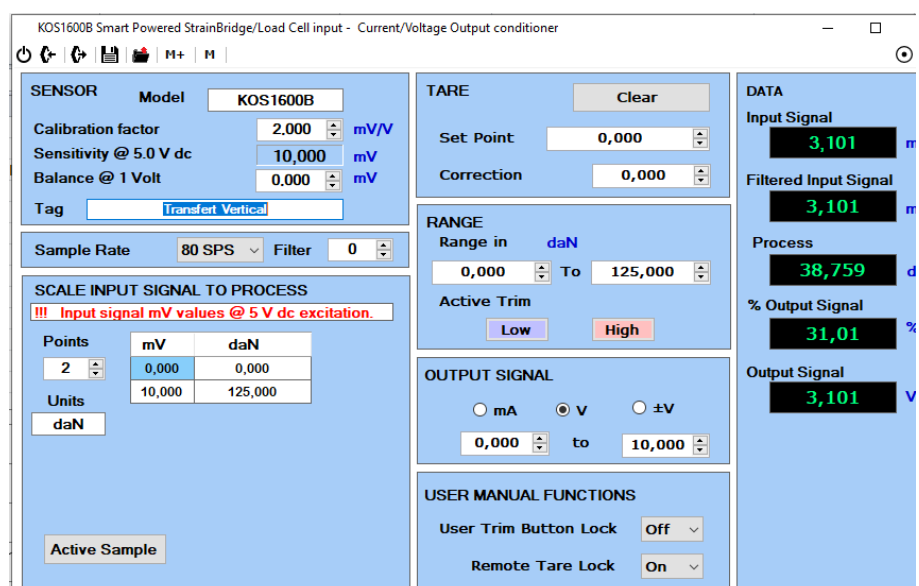
On trouve en configuration des différentes fonctions permettant de :

Définir la jauge.
(sensitivity)

linéariser la caractéristique.
(bouton TARE)

d'adapter la sortie.
(courant ou tension et échelle).

Il y a même possibilité de convertir les grandeurs en unité « process ».



3.3 Température³.

3.3.1 Remarque.

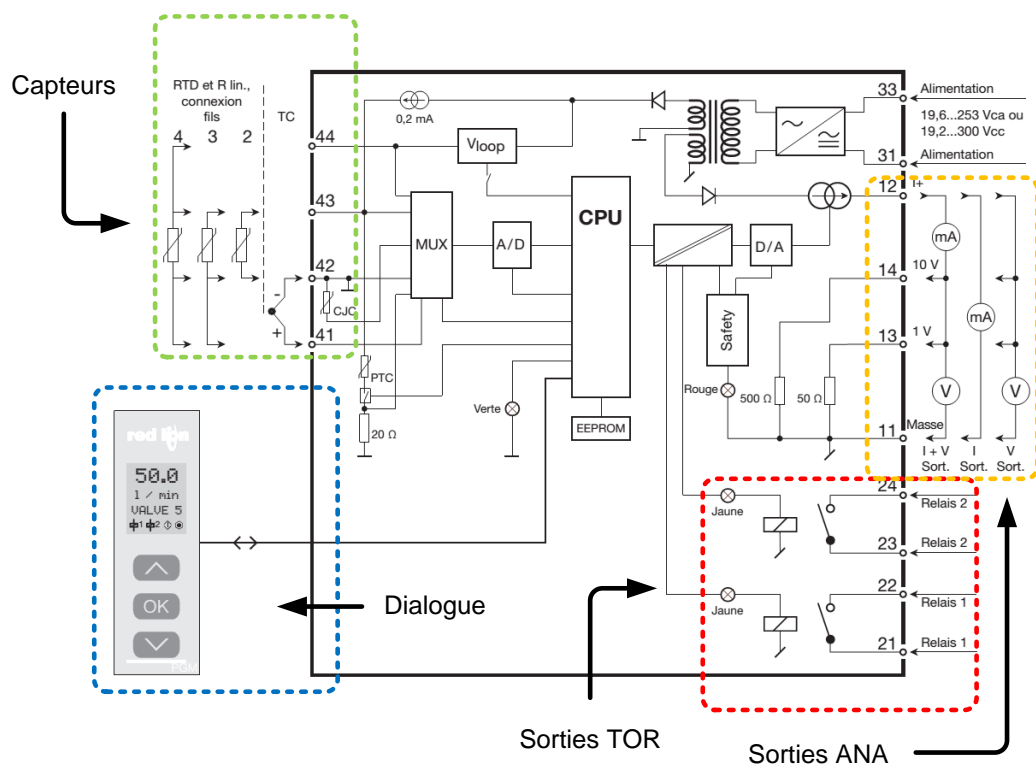
On distingue les capteurs avec contact (RTD, thermocouple et thermistance) qui doivent « prendre » la température de l'élément et qui sont lents et les capteurs à infra-rouge sans contact qui sont plus rapides.

3.3.2 Choix.

	Thermistance	RTD	Thermocouple	Infra rouge
Domaine de temp. (°C)	-100 à 400	-200 à 1500	-250 à 2500	-50 à 2200
Précision	Bonne de 0,05 à 1,5 °C	Bonne de 0,1 à 1 °C	Moyenne de 0,5 à 5 °C	Très incertaine !
Temps de réponse	Court < 10 s	Elevé >10 s	Très court < 10 s	Très court
Prix	Bon marché	Haut	moyen	Bon marché
Utilisation	Températures faibles	Bonnes précision et linéarité	Températures élevées	Sans contact Point chaud

3.3.3 Conditionneur.

Les capteurs de température ont tous des caractéristiques différentes que ce soit en termes de gain ou de linéarité. Ils nécessitent donc un conditionnement pour pouvoir être traités. En mode configuration, il faudra fixer les paramètres du capteur pour avoir le conditionnement adéquat :



3.3.4 Configuration.

Technologie :	Type :	Raccordement :	Unité :
RTD ou R lin TC	Pt100 ou Pt1000 TC-E ou TC-J ou TC-K ...	2/3/4 fils.	°C/°F

Il a été vu dans le chapitre 21 que les conditionneurs pour sonde de température étaient parfois intégrés directement dans certaines entrées d'automate dédiées.

³ <http://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-capteur-de-temperature/>

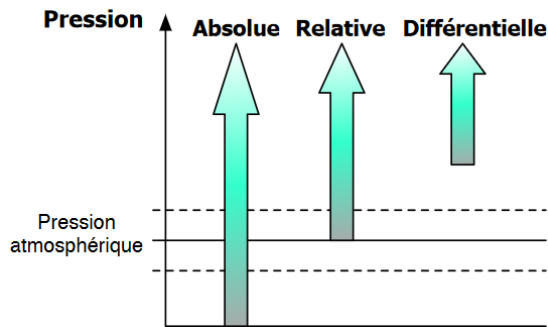
3.4 Fluides.

3.4.1 Introduction.

Dans la gestion des fluides (liquide, gaz ou granulé) trois grandeurs sont utilisées : le niveau, débit et la pression⁴.

Or, les technologies sont multiples et utilisent souvent des grandeurs annexes pour calculer un débit ou une pression : en passant par une vitesse, un temps, une différence de pression etc ...

3.4.2 Types de pression.



Pression absolue : la deuxième face de la membrane est soumise au vide, sa déformation correspond exactement à la pression mesurée.

Pression relative : la deuxième face de la membrane est soumise à la pression atmosphérique, sa déformation correspond à la différence entre pression mesurée et pression ambiante.

Pression différentielle : un capteur de pression différentielle possède 2 entrées, une pour chaque face de la membrane, sa déformation correspond donc à la différence de pression entre les 2 entrées.

3.4.3 Mesure de pression.

La pression est souvent mesurée par l'intermédiaire :

- d'une mesure de hauteur hydrostatique
- d'une mesure de déformation membrane
- d'une variation de résistance jauge
- d'une variation de capacité, inductance ...

Le choix d'un capteur de pression se fait après avoir déterminé le type de pression à mesurer.

Paramètres à retenir : plage de pression,
température (classiquement -25/100 °C)
montage et type de signal de sortie.

3.4.4 Types de débit.

Il faut distinguer si le débit à mesurer est :

- massique (kg/s) ou
- volumique (m³/h ou l/mn),

3.4.5 Mesure de débit.

Le débit est souvent mesuré par l'intermédiaire :

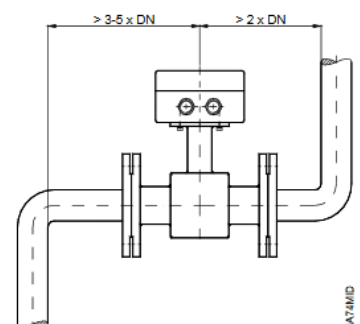
- d'une mesure de pression différentielle organe déprimogène
- d'une mesure de temps, ultrason
- d'une mesure de hauteur flotteur

Le facteur important dans le choix d'une technologie de débitmètre est la **nature du fluide** qui circule : liquide, gaz, propre, chargé, visqueux.

3.4.6 Montage

Dans un réseau de tuyauterie, il faut que l'écoulement du fluide ne soit plus perturbé. Certains capteurs nécessitent une longueur de tuyauterie droite en amont exprimée en fonction du diamètre de la canalisation.

Par exemple, >3,5xD signifie qu'il faut une longueur de 3,5 fois supérieure au diamètre intérieur de la canalisation.



⁴ Voir le cours de SPC pour affirmer vos connaissances dans le domaine de la mécanique des fluides ...

3.5 Niveaux.

3.5.1 Principe.

Un capteur de niveau est un dispositif électronique qui permet de mesurer la hauteur du matériau, en général du liquide, dans un réservoir ou un autre récipient. Une partie intégrante du contrôle de procédé dans de nombreuses industries, les capteurs de niveau se divisent en deux types principaux.

Les détecteurs de niveau qui fonctionnent comme une alarme haute, pour signaler une condition de débordement, ou en tant qu'indicateur pour une condition d'alarme basse.

La sonde de niveau continu assure une surveillance de niveau de tout un système. Elle mesure le niveau de liquide dans une plage, ce qui produit une sortie analogique qui est directement corrélée au niveau de la cuve.⁵

3.5.2 Démarche.

Pour choisir la technologie adaptée à un processus, il est important de connaître la nature du produit qui sera mesuré. S'agit-il d'un liquide, d'une pâte ou de solides en vrac ? S'il s'agit d'un liquide, y a-t-il de la mousse à la surface du liquide ?

Les technologies de mesure de niveau peuvent être réparties en deux groupes, celles avec ou sans contact entre le capteur et le produit.

Les technologies sans contact seront plus indiquées dans les environnements extrêmes ou avec des produits agressifs. La mesure de niveau sans contact présente également l'avantage de ne jamais risquer de contaminer le produit.

*Comme pour tout capteur, la plage de mesure est un critère essentiel. Il faut vérifier qu'il résiste aux conditions de **pression et de température** du process et qu'il possède un signal de sortie compatible avec la chaîne de mesure : sortie analogique ou numérique, affichage ou non, présence d'une sortie relais, etc⁶.*

3.5.3 Choix.

Type de capteur	Type de fluide	Avantages	Inconvénients
Capteur à flotteur	Liquides	Mesure précise	Sensible aux vagues
		Insensible à la présence de mousse et à la viscosité	Faible plage de mesure (< 1 m)
		Peu coûteux, pas de maintenance	Inadapté aux produits corrosifs
Capteur à ultrasons	Liquides	Mesure sans contact et précise	Sensible aux variations de température
	Solides	Auto-nettoyage, pas d'entretien	Sensible aux pressions et températures extrêmes
		Large plage de mesure	Inadapté aux produits moussants et poussiéreux
		Facile à monter	Sensible aux produits électro-conducteurs
Capteur capacitif	Liquides	Facile à monter	
	Granulés	Supporte des températures et pressions très élevées	
	Poudres	Robuste	
		Insensible aux produits visqueux et colmatants	
Capteur radar	Liquides	Mesure sans contact et très précise	Sensible aux produits électro-conducteurs
	Solides	Pas de maintenance, installation facile	
	Pâtes	Plage de mesure réglable	
		Peut supporter des températures élevées	

3.5.4 Annexes.

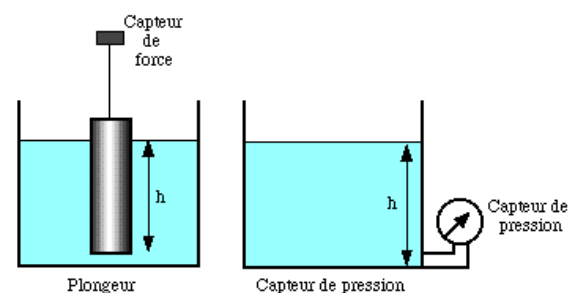
Il existe aussi des capteurs de niveau :
« hydrostatiques ».

Ce sont soit :

des capteurs de pression installés en fond de cuve qui traduisent une pression en niveau grâce à la formule

$$P = Mv \cdot h \cdot g.$$

des capteurs d'effort qui utilisent le principe d'Archimède.



⁵ <https://www.omega.fr/prodinfo/mesure-de-niveau.html>

⁶ <http://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-capteur-de-niveau/#1>

3.6 Vitesse.

3.6.1 Génératrice tachymétrique.

3.6.2 Position plus traitement.

3.6.3 Accélération.

3.7 Electricite.

3.7.1 Tension.

3.7.2 Courant.

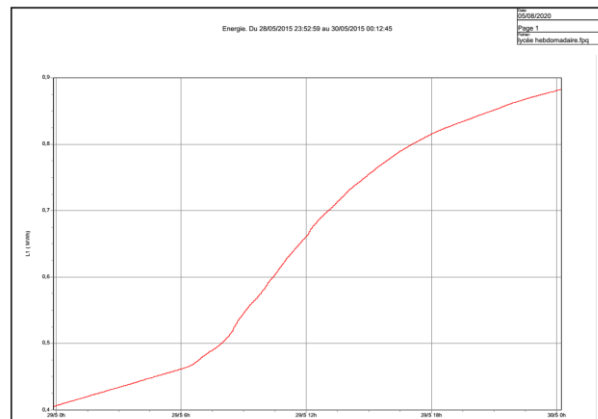
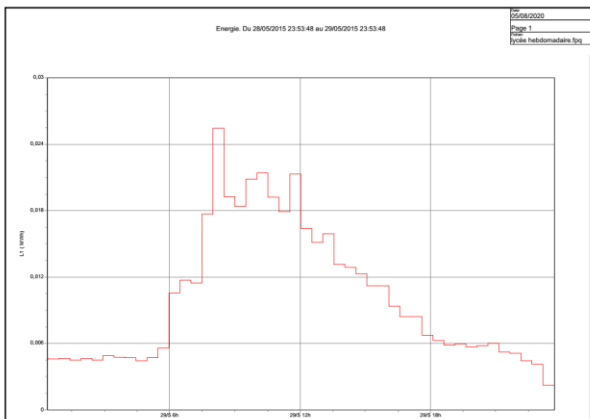
Transformateur de courant, effet Hall, sonde rodwsky.

3.7.3 Puissances.

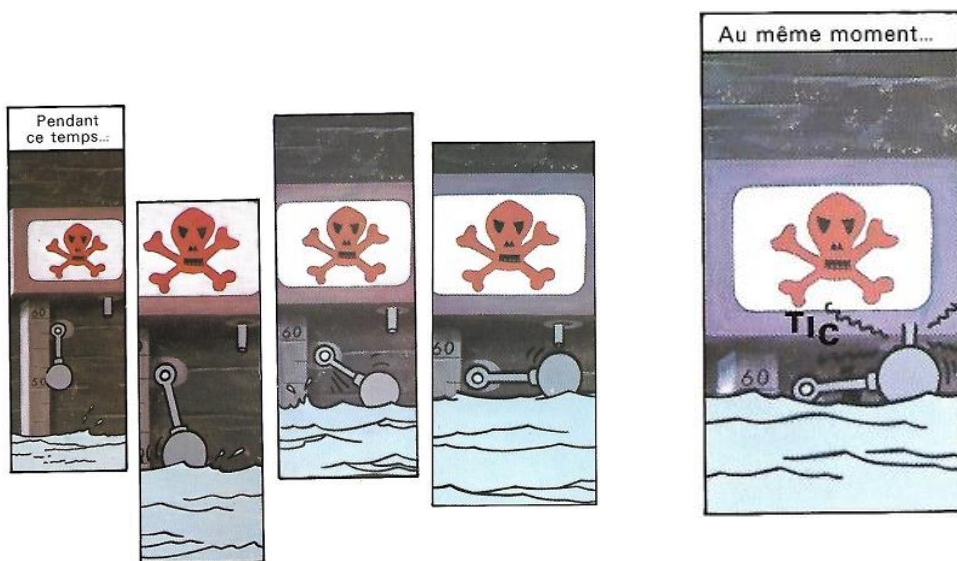
Calcul à partir de V et I, OK pour P, OK pour S, problème pour Q

3.7.4 Energie

Cumulée ou par agrégat



Détecteurs



(Notes)

1 Généralités.

1.1 Fonctionnalités des capteurs T.O.R.

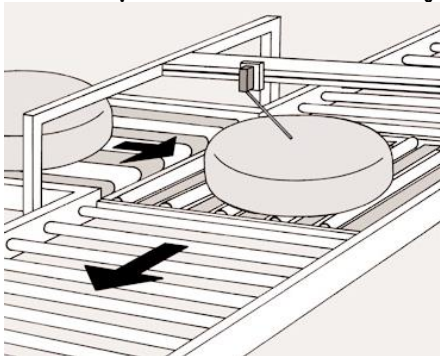
Détecter est une fonction essentielle dans les automatismes. En effet dans tous les process, il faut être informé à un moment donné de la présence ou non d'un objet, d'une personne, d'un élément de machine.

Dans leur rôle d'acquisition dédiée au traitement de l'information, les capteurs T.O.R. contrôlent la présence, l'absence, le positionnement, le passage, le défilement, le bourrage, le comptage d'objets divers.

1.2 Les deux solutions technologiques.

1.2.1 Solution électromécanique.

Détection **par contact direct** d'objets physiques non déformables => **Interrupteurs de position.**

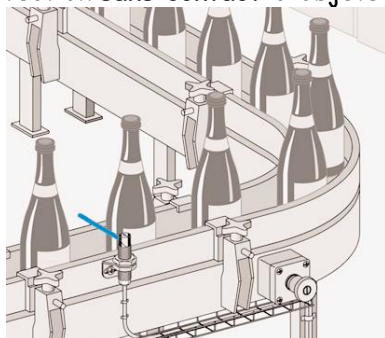


* Points forts :

- Sécurité de fonctionnement élevée :
fiabilité des contacts électriques,
manœuvre positive d'ouverture.
- Grande résistance aux ambiances industrielles.
- Séparation galvanique des circuits.
- Bonne tenue aux courts-circuits.
- Bonne aptitude à commuter des courants faibles.
- Immunité totale aux parasites électromagnétiques.

1.2.2 Solution électronique.

Détection **sans contact** d'objets ou de matières diverses => **Détecteurs de proximité.**



* Points forts :

- Pas de contact physique avec l'objet :
possibilité de détecter des objets fragiles.
- Cadences de fonctionnement élevées.
- Grandes vitesses d'attaque :
prise en compte d'informations de courte durée.
- Sorties statiques :
pas de pièces en mouvement =>
durée de vie indépendante du nombre de manœuvres.

2 Choix d'une technologie.

2.1 Critères généraux de choix.

Les principaux facteurs qui interviennent dans le choix d'un capteur T.O.R. sont :

- la nature, la masse et la vitesse de l'objet à contrôler;
- la fréquence de passage des objets à détecter;
- la nature du milieu ambiant (température, ambiance humide, poussiéreuse et corrosive);
- le niveau de protection recherché contre les chocs, les projections de liquides;
- la nature du circuit électrique;
- le type de sortie : contact électromécanique, sortie statique (transistor PNP ou NPN);
- le nombre et la nature des contacts électriques (NO, NC);
- la place disponible pour loger, fixer et régler le capteur.

2.2 Démarche d'aide au choix.

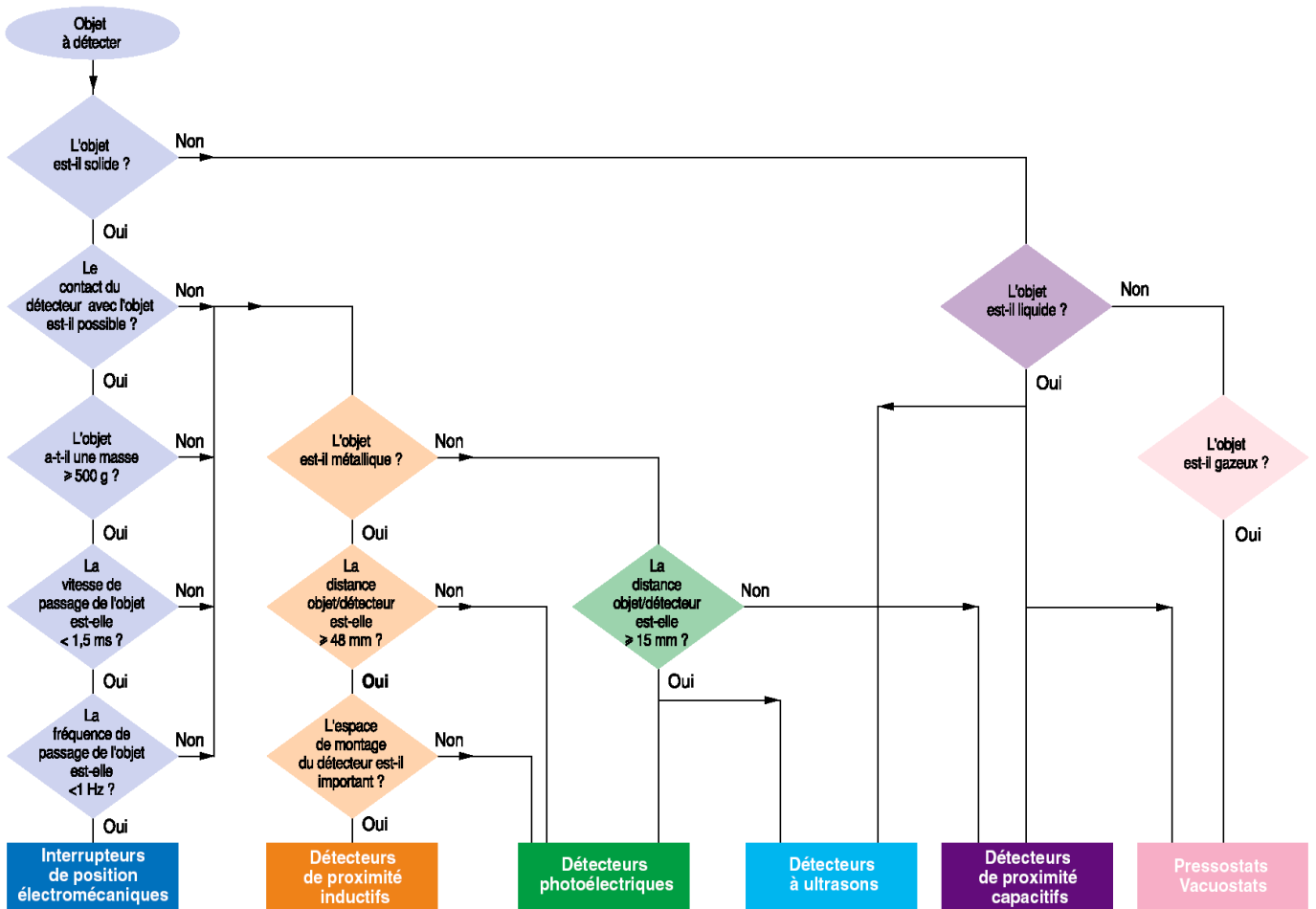
2.2.1 Phase 1 : Détermination de la famille de capteurs adaptée à l'application.

a) Méthode de choix proposée par la société Schneider Electric.

La détermination de la famille s'effectue par un jeu de questions/réponses posées :

- nature de l'objet à détecter : solide, liquide, gazeux, pulvérulent, métallique ou non;
- contact possible avec l'objet;
- masse de l'objet;
- cadences de manœuvre;
- distance de l'objet/détecteur;
- vitesse de défilement;
- espace d'intégration du capteur.

L'organigramme illustre cette démarche qui conduit à faire la sélection à base de critères simples.



Extrait du guide technique "L'essentiel de la détection" Novembre 2003 - Schneider Electric.

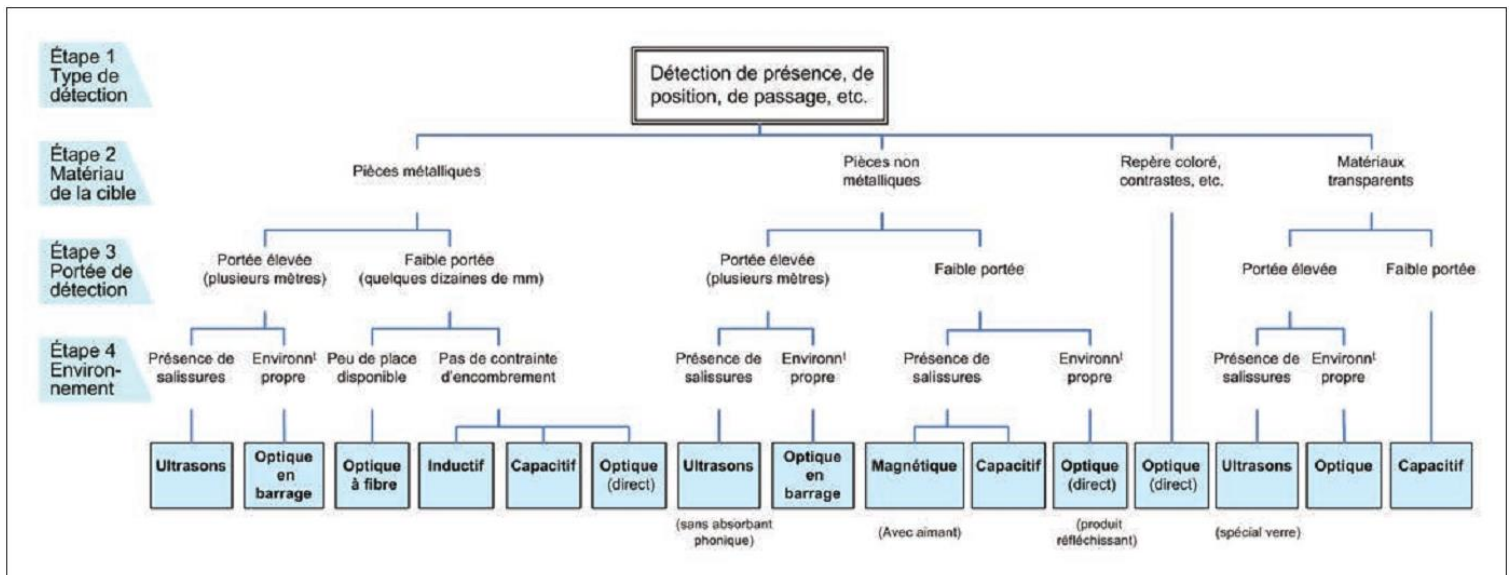
b) Utilisation d'arbres de décision.

Le choix peut également se faire avec deux arbres de décision.

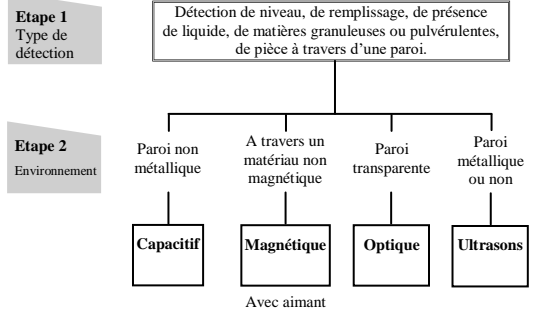
Les critères à prendre en compte sont successivement :

- le type de détection (présence, position, passage, niveau);
- la nature de la cible (métallique, non métallique, couleur, transparence, ...);
- la portée de détection;
- l'environnement (présence ou non de pollution).

Arbre de décision pour les détections de présence, de position et de passage.



Arbre de décision pour les détections de niveau.



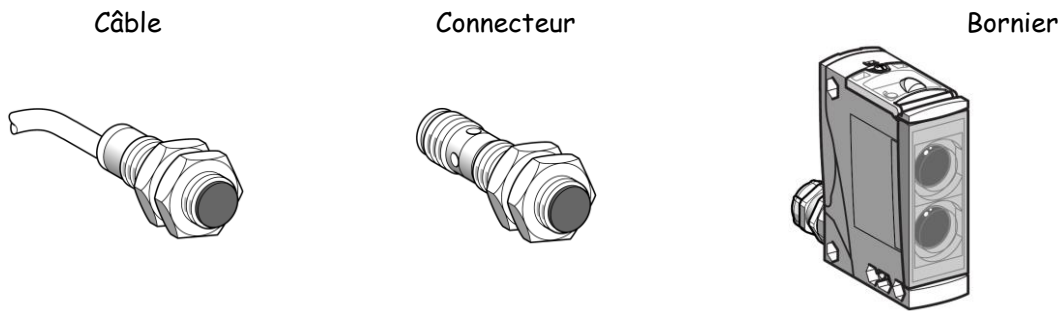
2.2.2 Phase 2 : Détermination du type et de la référence du capteur recherché.

Cette deuxième phase tient compte de paramètres liés, selon les familles, à :

- l'environnement : température, humidité, poussières, projections;
- la source d'alimentation : alternative ou continue;
- le signal de sortie : contact sec, sortie statique PNP ou NPN;
- le type de raccordement : câble, connecteur, bornier.

Tenir compte des grandeurs d'influence qui modifient les caractéristiques du capteur.

Illustration des différents types de raccordement.

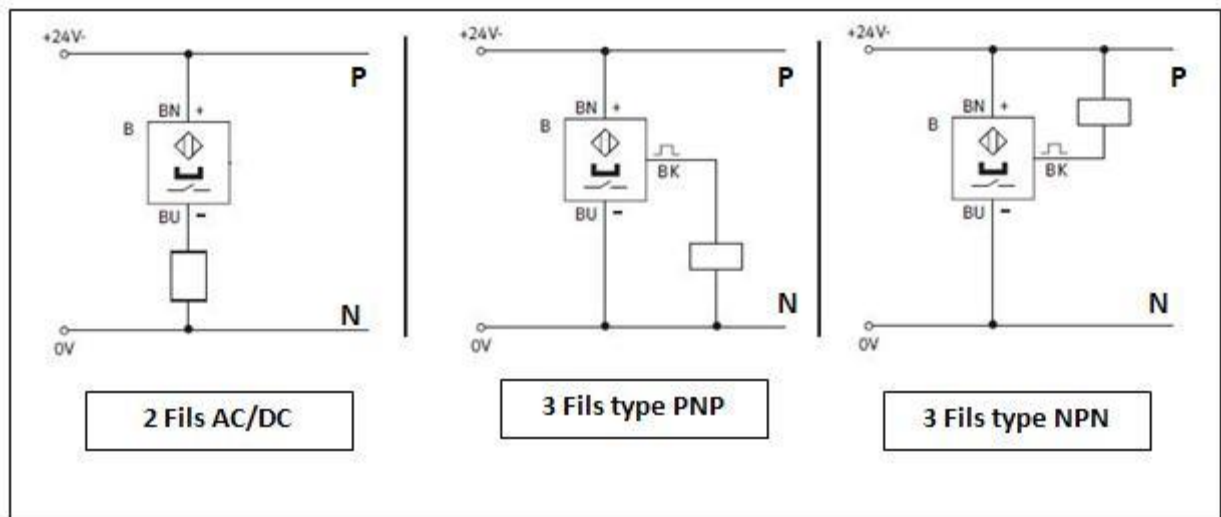


3 Caractéristiques fonctionnelles.

3.1 Electriques.

3.1.1 2/3 fils.

On distingue



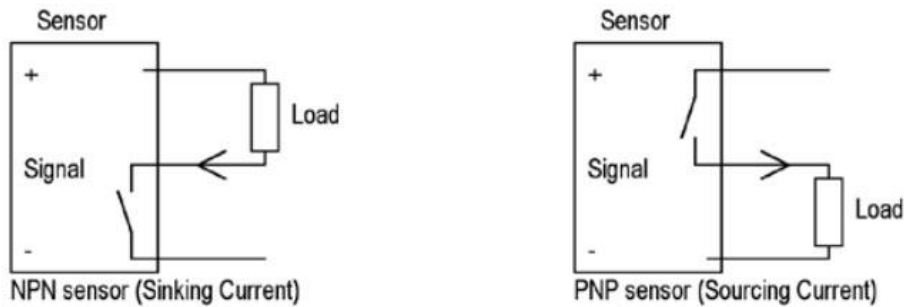
Sans entrer dans les détails qui sont vus en séance de travaux pratiques, il est bon de connaître les deux techniques ci-dessus, notamment dans le cas du remplacement d'un détecteur afin de ne pas modifier un câblage existant.

3.1.2 Logique.

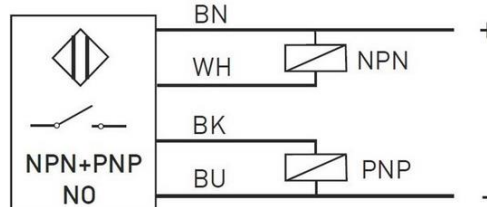
Il est nécessaire de tenir compte de la logique de sortie du détecteur lorsque celui-ci est électronique. En effet, son raccordement est indissociable de sa compatibilité avec l'appareil qui utilise a détection.

On distingue les deux cas suivants :

Logique négative	Logique positive
l'information qui active l'entrée de l'automate est : le « 0 logique ».	l'information qui active l'entrée de l'automate est : le « 1 logique ».



Certain détecteur ont les deux possibilités ... Il faut alors faire attention au raccordement !



On parle alors de détecteur « 4 fils »

3.2 Portées.

3.2.1 Nominale Sn.

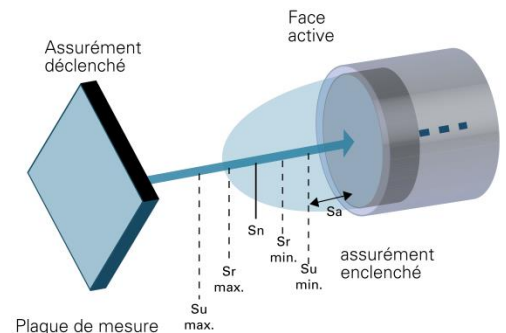
Distance en dessous de laquelle une cible approchante provoque le changement d'état de la sortie du détecteur. En fait, c'est une grandeur conventionnelle ne tient compte ni des écarts de fabrication, ni des différences dues aux conditions extérieures telles que la température ou la tension d'alimentation.

3.2.2 Réelle Sr.

C'est la portée d'un détecteur de proximité, mesurée dans des conditions définies de tension nominale Un et de température ambiante assignée. Elle doit se situer entre 90% et 110% de Sn : $0,9 \times Sn \leq Sr \leq 1,1 \times Sn$.

3.2.3 Utile Su.

Elle doit se situer à l'intérieur des zones admissibles de tension d'alimentation et de température ambiante dans une zone de 90% à 110% de Sr : $0,9 \times Sr \leq Su \leq 1,1 \times Sr$.



3.2.4 Travail Sa.

C'est la portée fiable de détection active, qui se situe entre 0% et 81% de Sn : $0 \leq Sa \leq 0,9 \times 0,9 \times Sn$.

3.2.5 Facteur de correction K.

pour les détecteurs inductifs : Facteur de multiplication permettant de tenir compte du matériau constituant la cible. On obtient la distance de détection réelle en multipliant ce facteur par la distance nominale : $Sr = K \times Sn$.

Matériau détecté	Facteur de correction (K)
Acier doux	1,0

acier doux								
inox								
laiton								

Acier inoxydable	0,7
Laiton	0,5
Aluminium	0,4
Cuivre	0,3

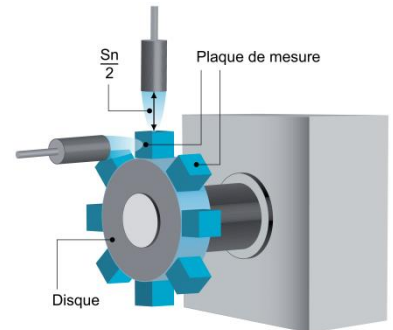
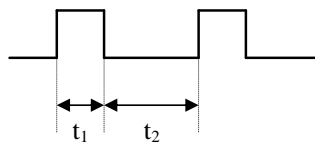
3.3 Autres caractéristiques.

3.3.1 Fréquence de commutation F.

Nombre maximal de changements d'état par seconde (nombre de fois où la cellule commute et revient à son état initial).

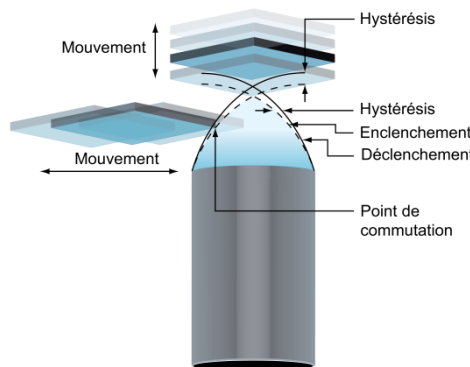
Exprimée en hertz (Hz), elle correspond à :

$$F = 1 / (t_1 + t_2).$$



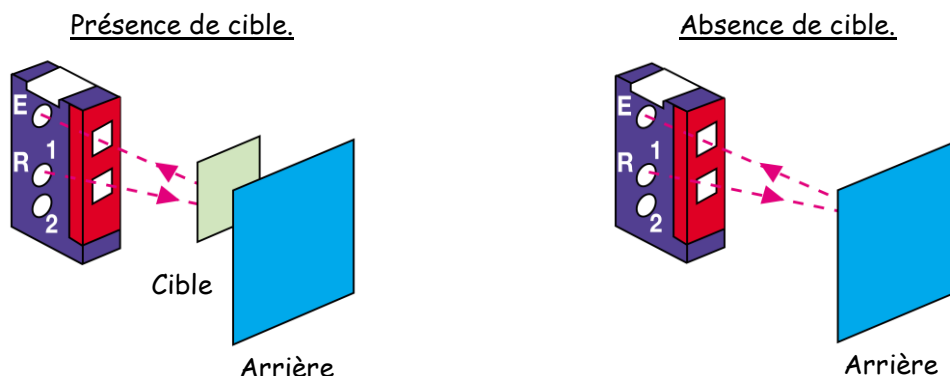
3.3.2 Hystérésis ou course différentielle.

Distance entre le point d'enclenchement et le point de déclenchement, exprimée en pourcentage de la portée. L'hystérésis sert à éviter les variations parasites de signal (commutations rapides entre "0" et "1") lorsque le détecteur ou la cible sont soumis à des chocs, des vibrations ou des jeux mécaniques. L'amplitude de vibration doit être strictement inférieure à l'hystérésis pour permettre au signal de sortie du détecteur d'être stable.



3.3.3 Système proximité avec effacement de l'arrière-plan.

Les détecteurs photoélectriques à système de proximité avec effacement de l'arrière-plan sont équipés d'un potentiomètre de réglage de portée. Ce dernier permet de se "focaliser" sur une zone de détection en évitant toute réflexion parasite sur l'arrière-plan.



4 Synthèse.

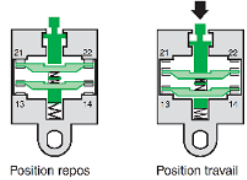
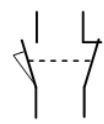
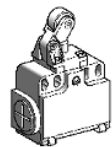
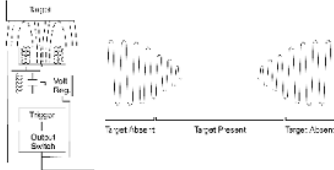

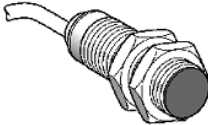
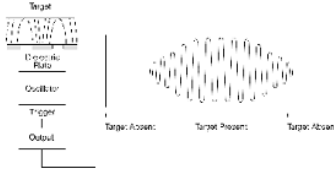
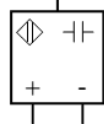
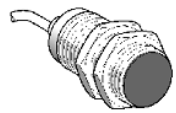
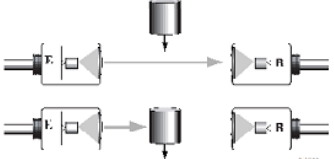

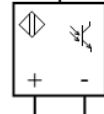
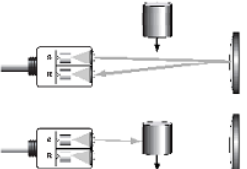

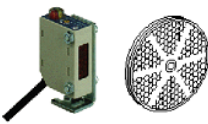
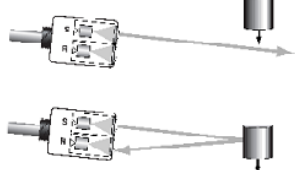


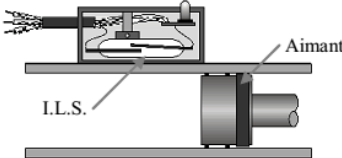
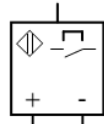

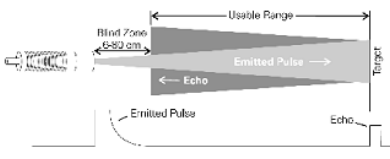
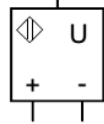

4.1 Conclusion.

Le choix et l'implantation des capteurs T.O.R. conditionnent fortement la fiabilité d'un système automatisé. Il est donc important de maîtriser une méthode de choix.

En cas de doute, l'essai du (ou des) capteur(s) dans les conditions réelles s'impose.

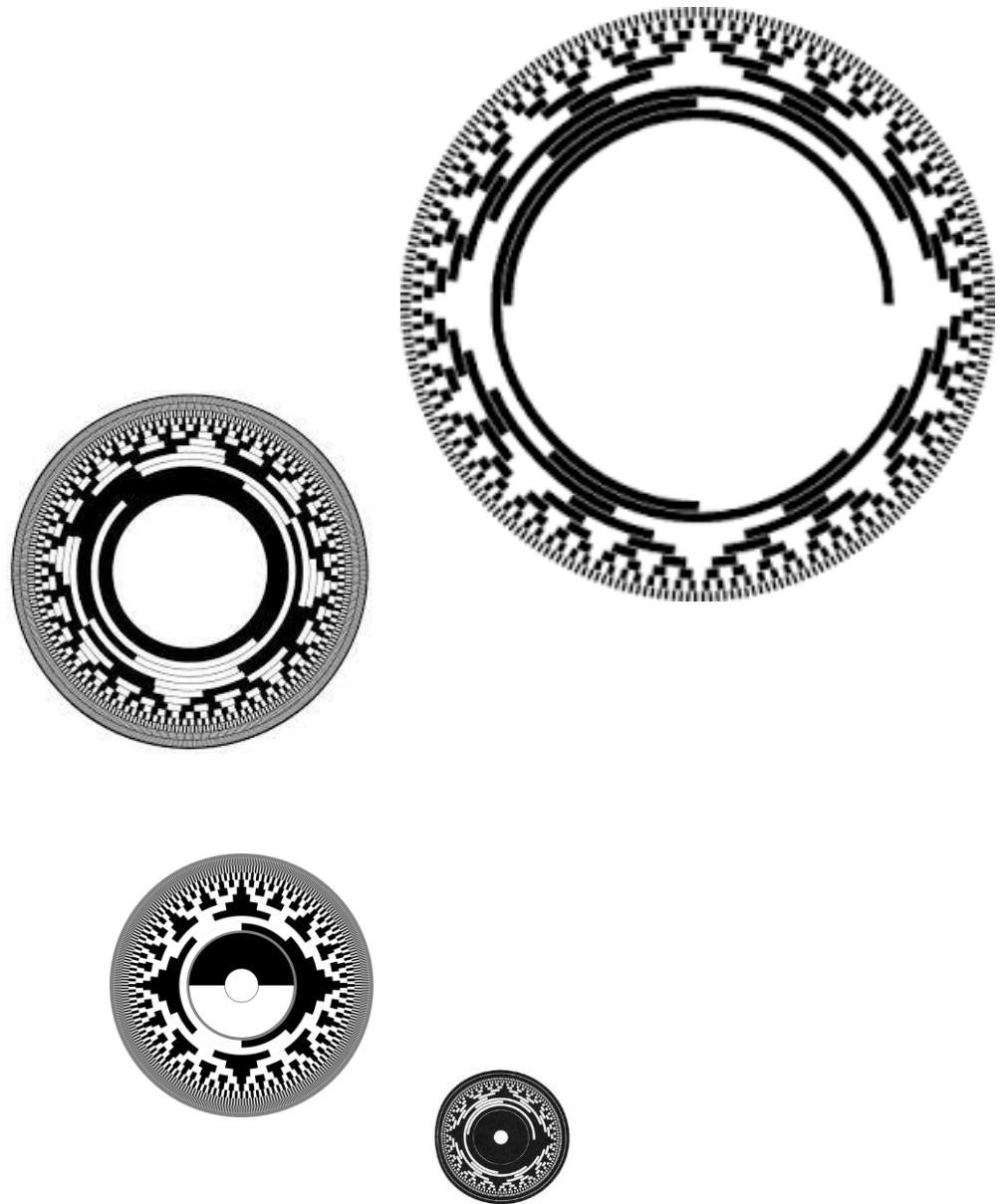
4.2 Tableau :

Capteur	Principe de fonctionnement
Interrupteur de position (détection par action mécanique)	Un interrupteur de position est un commutateur électrique actionné par le déplacement d'un organe de commande (tête de commande avec son dispositif d'attaque). Lorsqu'il est actionné, il ouvre ou ferme un (ou plusieurs) contact(s) électrique(s). Il existe deux modes de fonctionnement des contacts : - contact à action brusque (ou rupture brusque); \Rightarrow <i>Vitesse de déplacement des contacts mobiles indépendante ou non de la vitesse de l'organe de commande.</i> - contact à action dépendante (ou rupture lente).
Détecteur de proximité inductif	Ce type de détecteur fonctionne grâce à la variation d'un champ électromagnétique perturbé par la proximité d'un objet métallique. Lorsqu'un objet métallique est placé dans ce champ, il développe à sa surface des courants induits, qui contrarient le champ électromagnétique initial et provoquent une réduction de l'amplitude des oscillations. Un circuit électronique placé à l'intérieur du capteur détecte cette modification et délivre alors un signal de sortie.
Détecteur de proximité capacitif	Les détecteurs capacitifs ressemblent, dans leur principe, aux détecteurs inductifs. La détection repose sur la modification du champ électrique (par l'objet à détecter) situé dans la zone active du capteur qui se traduit par un changement d'état de la sortie.
Détecteur de proximité photoélectrique Système barrage	L'émetteur et le récepteur sont de part et d'autre de l'élément à détecter qui coupe le faisceau lumineux.
Détecteur de proximité photoélectrique Système reflex	L'émetteur et le récepteur sont dans le même boîtier. Le faisceau lumineux est réfléchi par un réflecteur. Le récepteur détecte la coupure de ce faisceau par l'objet à détecter.
Détecteur de proximité photoélectrique Système proximité	L'émetteur et le récepteur sont dans le même boîtier. C'est l'objet lui-même qui assure la réflexion du faisceau lumineux.
Détecteur de proximité I.L.S. (détecteur magnétique)	Les interrupteurs à lame souple sont directement fixés sur le corps d'un vérin dont le piston comporte un aimant. Lorsque l'aimant passe à proximité du capteur, le contact électrique se ferme et l'information est donnée à la partie commande. Lorsque l'aimant s'éloigne du capteur, le contact électrique s'ouvre et le circuit n'est plus établi. L'information disparaît.
Détecteur de proximité à ultrasons	Le principe de la détection à ultrasons est basé sur la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde ultrasonique (onde de pression) et la réception de son écho (retour de l'onde émise par l'objet à détecter).

	Matériaux détectés	Portée	Symbole	Illustration
	Objets solides et non déformables.	Contact physique 0 à 190 mm (tige rigide).		
	Objets métalliques (acier, aluminium, cuivre, ...).	0 mm à 60 mm(*).		
	Objets de toute nature (verre, matière plastique, métaux, bois, carton, liquides, poudres, ...).	0 mm à 10 mm(*).		
	Objets opaques.	Jusqu'à 30 m.	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><u>Emetteur</u></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><u>Récepteur</u></p>  </div> </div>	
	Objets opaques. Objets réfléchissants et transparents (avec système reflex polarisé).	Jusqu'à 10 m.		
	Objets réfléchissants (surface métallique, couleur claire, ...).	Jusqu'à 1,5 m.		
	Aimant placé dans le piston du vérin.	Le détecteur doit être fixé directement sur le corps du vérin.		
	Tous les objets (métal, plastique, bois, carton, liquides, poudres, ...), sauf les absorbants phoniques (ouate, mousse, ...).	De 1 à 2 cm, à plus de 10 m.		

(Notes)

Capteurs numériques



(Notes)

1 Introduction.

Les impératifs d'amélioration de productivité et de flexibilité appellent dans tous les domaines de la production industrielle un besoin d'information continue sur :

- le déplacement,
- la position,
- la vitesse des outils et des produits.

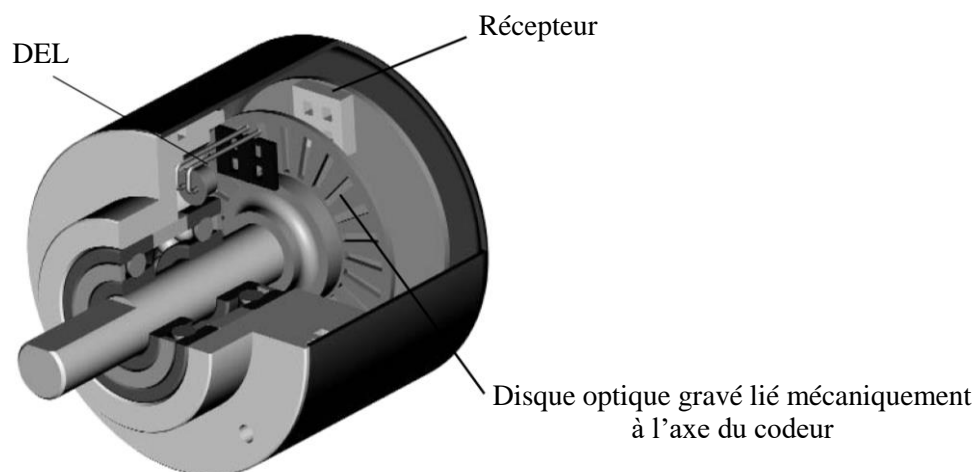
Les systèmes de détection conventionnels (interrupteurs de positions et détecteurs de proximité), qui ne peuvent fournir que des informations Tout Ou Rien à des endroits prédéterminés, ne répondent que partiellement aux besoins de précision et de flexibilité de machines telles que des machines de découpe à commande numérique, des robots industriels, des machines à mesurer, des chariots de manutentions mobiles, etc.

Dans le cas d'un codeur numérique de position, le positionnement du mobile est entièrement maîtrisé par les systèmes de traitement et non plus réalisé physiquement par le positionnement d'un interrupteur de position sur la machine.

2 Présentation générale d'un codeur numérique de position.

Un codeur numérique de position (appelé aussi codeur optique rotatif) est un capteur angulaire de position. Son axe, lié mécaniquement à l'arbre de la machine qui l'entraîne, fait tourner un disque qui comporte une succession de zones opaques et transparentes.

Un codeur est composé de trois parties :

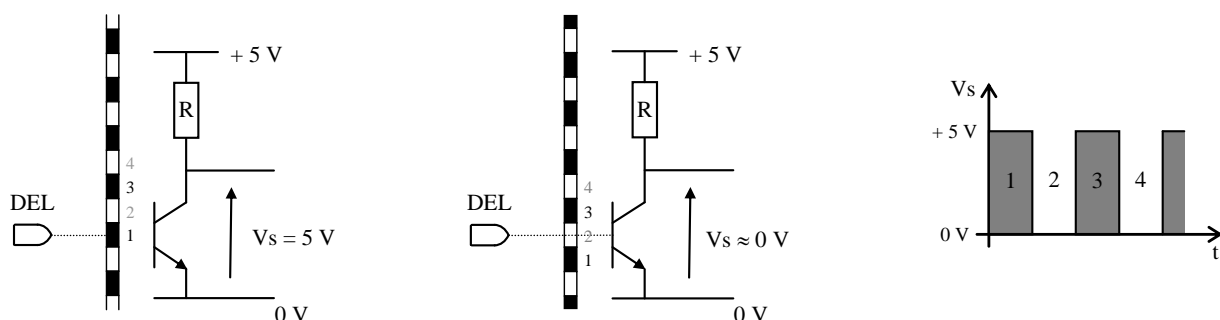


D'après le catalogue "Sensor technology Rotary and linear encoders" de la société Kübler.

La lumière émise par des diodes électroluminescentes (composant émetteur) arrive sur des photodiodes (composant récepteur) chaque fois qu'elle traverse les zones transparentes du disque.

Les photodiodes génèrent alors un signal électrique qui est amplifié et converti en signal digital (circuit récepteur) avant d'être transmis vers une unité de traitement (ex : A.P.I.) ou un variateur de vitesse électronique.

La sortie électrique du codeur représente ainsi, sous forme numérique, la position angulaire de l'axe d'entrée.



3 Les différents types de codeurs numériques de position.

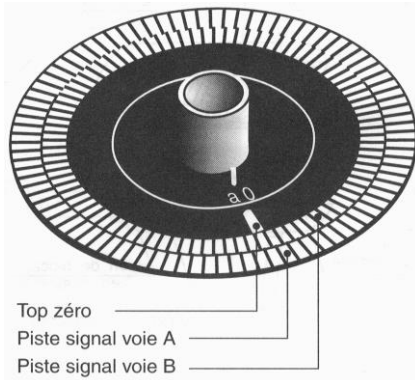
Il existe deux types de codeurs numériques de position :

- les **codeurs incrémentaux** qui permettent de connaître la position d'un mobile et de contrôler son déplacement par comptage et décomptage des impulsions qu'ils délivrent;
- les **codeurs absolus** de position qui donnent la position exacte sur un tour ou sur plusieurs tours.

Ces deux types de capteurs utilisent des techniques similaires. Ils se distinguent par le fenêtrage des disques et la manière dont le signal optique est codé ou traité.

3.1 Codeur incrémental.

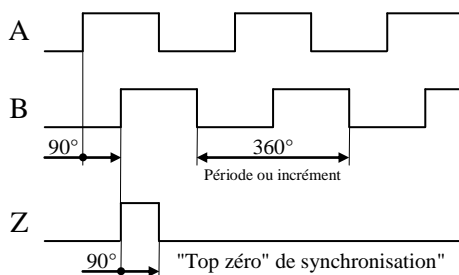
3.1.1 Constitution.



Le disque d'un codeur incrémental possède deux types de piste :

- une ou deux pistes extérieures (voies A et B), divisée en "n" intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents, "n" étant la résolution ou le nombre de périodes du codeur;
- une piste intérieure (piste Z) comportant une seule fenêtre. Le signal Z, appelé "Top zéro", de durée 90° électriques, est synchrone avec les signaux A et B. Il définit une position de référence et permet une réinitialisation à chaque tour.

3.1.2 Principe de fonctionnement.



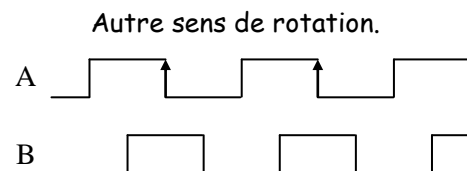
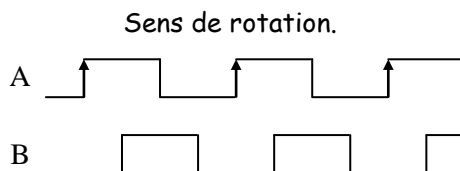
Pour un tour complet du codeur, le faisceau lumineux est interrompu "n" fois et délivre "n" signaux carrés A et B en quadrature.

3.1.3 Détection du sens de rotation.

Le déphasage de 90° électriques (1/4 de période) des signaux A et B définit le sens de rotation.

Dans un sens, le **signal B est à 0** pendant le front montant de A.

Dans l'autre sens, le **signal B est à 1** pendant le front montant de A.

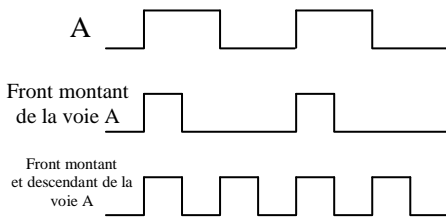


3.1.4 Exploitation des voies A et B.

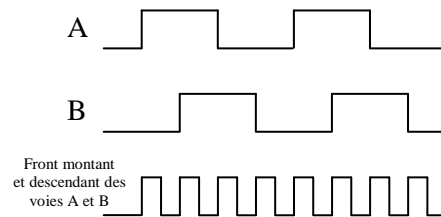
Les codeurs incrémentaux autorisent trois niveaux de précision d'exploitation :

- utilisation des fronts montants de la voie A seule : exploitation simple, correspondant à la résolution du codeur (ou nombre de points "n"),
- utilisation des fronts montants et descendants de la voie A seule : la précision d'exploitation est doublée;

- utilisation des fronts montants et descendants Avec utilisation du signal B.
des voies A et B : la précision d'exploitation est quadruplée. Sans utilisation du signal B.



⇒ Doublement de la précision.



⇒ Quadruplement de la précision.

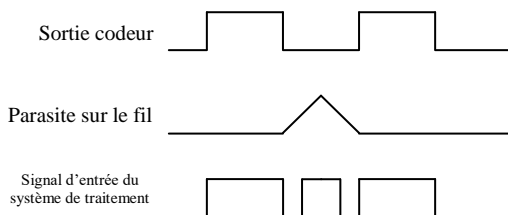
3.1.5 Elimination des impulsions parasites.

Tout système de comptage peut être perturbé par l'apparition de parasites en ligne qui sont comptabilisés au même titre que les impulsions délivrées par le codeur.

Pour éliminer ce risque, la plupart des codeurs incrémentaux délivrent en plus des signaux A, B et Z, les signaux complémentés \bar{A} , \bar{B} et \bar{Z} .

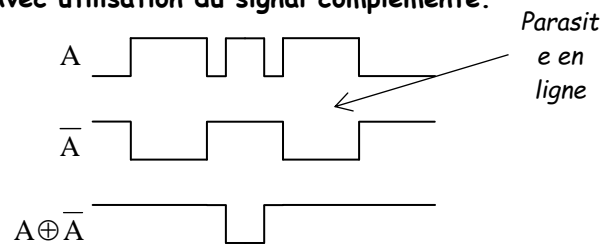
Si le système de traitement est conçu pour pouvoir les exploiter (commandes numériques NUM par exemple), ces signaux complémentés permettent de différencier les impulsions codeur des impulsions parasites, évitant ainsi la prise en compte de ces dernières, voire de reconstruire le signal émis.

Sans utilisation du signal complémenté.



⇒ Erreur de comptage sur la voie A.

Avec utilisation du signal complémenté.



Si $A \oplus \bar{A} \neq 1 \Rightarrow$ Présence d'un parasite.

⇒ Non comptage de l'impulsion parasite.

La somme logique $A \oplus \bar{A}$ doit toujours être égale à 1.

En présence d'un parasite sur la voie A en sortie de codeur : $A \oplus \bar{A} = 0$.

Remarque : Le même contrôle peut être réalisé sur les voies B et Z.

3.2 Codeur absolu.

3.2.1 Principe de fonctionnement.



Le disque des codeurs absolus comporte un nombre "n" de pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents.

Un codeur absolu délivre en permanence un code qui est l'image de la position réelle du mobile à contrôler.

A chaque piste est associé un couple émetteur / récepteur optique. Chaque piste a donc son propre système de lecture.

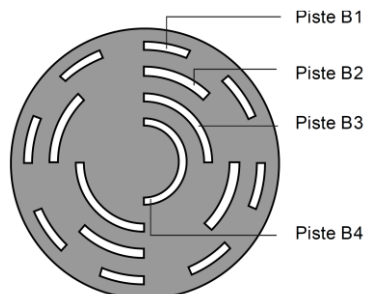
3.2.2 Mode de codage.

Les codeurs absolus se caractérisent par l'émission d'un code numérique, image du positionnement physique du disque. Un seul code correspond à une seule position.

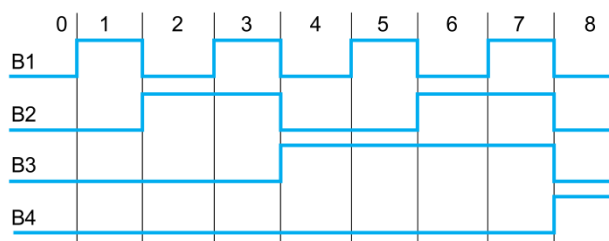
Ce code délivré par un codeur rotatif absolu peut être :

- du binaire naturel (binaire pur),
- du binaire réfléchi, aussi dénommé code GRAY.

Codage binaire naturel.



Chronogrammes :



Avantage :

Le codage binaire pur permet d'effectuer les quatre opérations arithmétiques sur des nombres exprimés dans ce code numérique.

L'image du positionnement physique du disque est donc directement exploitable par les systèmes de traitement (A.P.I.) pour effectuer des calculs.

Inconvénient :

Ce codage présente l'inconvénient d'avoir deux ou plusieurs bits qui changent d'état entre deux positions, d'où une possible ambiguïté de lecture.

En effet, ces changements d'état ne pouvant pas être rigoureusement synchrones (temps de transition), le signal émis par le capteur peut être complètement faussé du fait des aléas de transition.

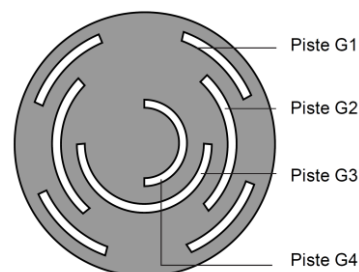
Pour lever cette ambiguïté, les codeurs absolus génèrent un signal d'inhibition qui bloque les sorties à chaque changement d'état.

3.2.3 Sous-famille des codeurs absolus.

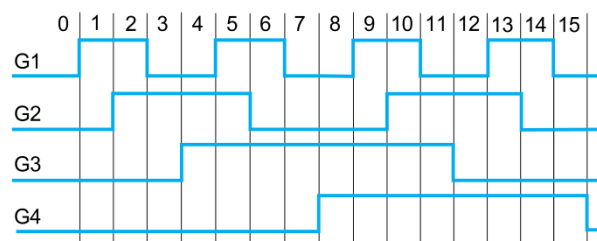
Deux gammes différentes de codeurs absolus existent :

- les codeurs absolus **monotour** qui donnent une position absolue sur un tour;

Codage binaire réfléchi (codage GRAY).



Chronogrammes :



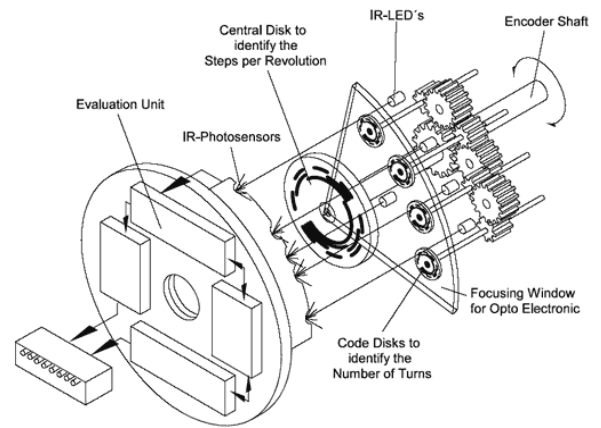
Avantage :

Le code Gray dans lequel un seul bit à la fois change d'état évite l'ambiguïté de lecture du codage binaire naturel.

Inconvénient :

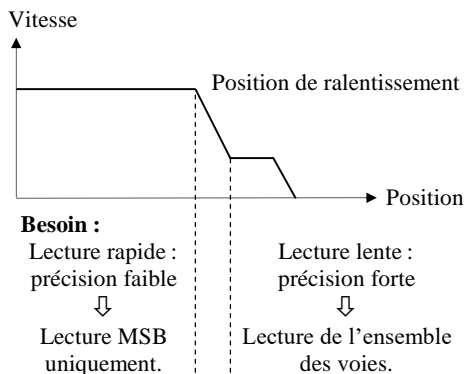
Pour son exploitation par un automatisme, ce code doit être préalablement transcodé en binaire naturel (transcodage GRAY - binaire), d'où un traitement plus complexe.

- les codeurs absolus **multitours** qui permettent, grâce à l'ajout d'un système d'axes secondaires, d'indiquer le nombre de tours.



D'après le site Internet de la société TR electronic.

3.2.4 Utilisation d'un codeur absolu.



Dans la plupart des applications, la recherche d'une meilleure productivité impose des déplacements rapides, à grande vitesse, puis des ralentissements pour avoir des positionnements précis.

Pour atteindre cet objectif avec des cartes E/S standard, il faut surveiller les MSB lorsque la vitesse est élevée, de façon à déclencher le ralentissement à un demi tour près.

4 Traitement du signal.

4.1 Avec un codeur incrémental.

Les signaux d'incrémentation A , \bar{A} , B , \bar{B} et d'initialisation Z , \bar{Z} peuvent être exploités.

- Signaux d'incrémentation : A , \bar{A} , B , \bar{B} .

Ces signaux carrés sont généralement de fréquence élevée.

La formule de calcul de la fréquence (en Hz) est :

$$f = \frac{1}{60} \cdot N \cdot R$$

avec : N = Vitesse d'utilisation de l'axe entraînant (en $\text{tr} \cdot \text{mn}^{-1}$).
 R = Résolution souhaitée en points par tour.

Exemple : Si $N = 3000 \text{ tr} \cdot \text{mn}^{-1}$ et $R = 5000 \text{ pts/tr}$, le calcul de la fréquence donne : $f = 250 \text{ kHz}$.

Avec de telles fréquences, il faudra connecter le codeur sur **les entrées rapides de l'automate** ou sur une **carte d'extension spécifique**.

- Signal Z "Top zéro".

Le signal Z "Top zéro" sert à l'initialisation. Il permet de corriger des erreurs de positionnement dues au non-comptage de certaines périodes (fréquence élevée).

4.2 Avec un codeur absolu.

La position du mobile est détenue dans un code unique délivré par le codeur. Cette position est connue dès la mise sous tension (après une perturbation ou une coupure de courant).

De même, lors d'une brusque accélération ou si l'arbre ne s'est pas arrêté instantanément de tourner, le codeur absolu sait immédiatement le déplacement qui a été réalisé.

Ce code est envoyé au système de traitement sur une liaison parallèle. Les entrées normales T.O.R. de l'automate suffisent généralement, mais cela nécessite de câbler autant de d'entrées que de bits de sortie du codeur. Ainsi, un codeur absolu offrant une résolution de 25 bits doit être relié à 25 entrées T.O.R. par 25 fils ...

Pour pallier cet inconvénient de taille, on utilise des convertisseurs qui transforment les données parallèle en un **signal série** émis de manière synchrone ou non par rapport à un signal d'horloge donné par la commande.

Le codeur donne alors la valeur de position à chaque "top" du signal d'horloge (dans le cas d'une liaison série synchrone) ou seulement lorsqu'on l'interroge (dans le cas d'une liaison série asynchrone).

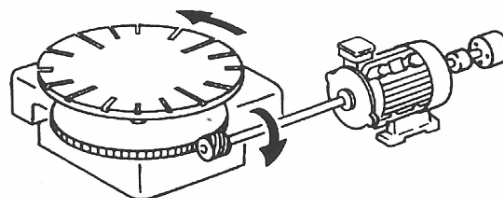
5 Détermination de la résolution d'un codeur.

5.1 Calcul du nombre de points par tour.

Sans tenir compte des jeux et imprécisions mécaniques, le nombre de points est calculé à l'aide des formules ci-dessous.

5.1.1 Mouvement circulaire.

$$\text{Nombre de points} = \frac{360}{\text{Précision souhaitée (en degré)}}$$



5.1.2 Mouvement de translation.

$$\text{Nombre de points} = \frac{P}{\text{Précision souhaitée (en mm)}}$$

Avec P : Rapport de conversion du mouvement de rotation en mouvement de translation.

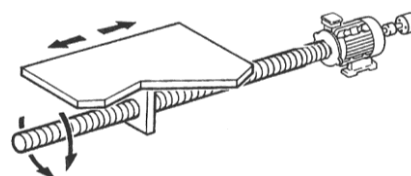
Exemples de mouvement de translation.

* Chaîne cinématique avec une vis à bille.

Pas de vis = 10 mm/tour.

D'où : P = pas de vis = 10 mm.

Lorsque la vis tourne d'un tour, le déplacement linéaire est de **10 mm**.



* Rouleau entraînant.

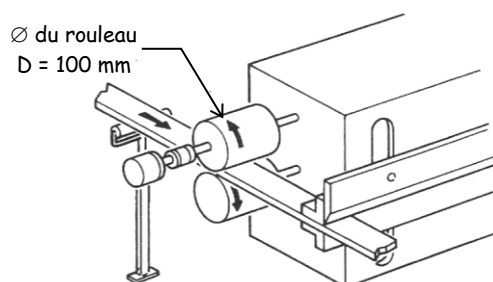
$$P = \pi \times D$$

$$= 3,14 \times D$$

$$= 314 \text{ mm.}$$

Pour un tour de rouleau, le mobile avance de

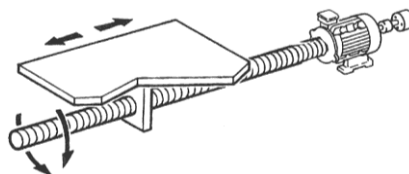
314 mm.



5.2 Exemple de choix.

5.2.1 Détermination de la résolution avec un mouvement de translation.

On cherche une précision d'un centième, mouvement sans réducteur R = 1, avec une vis à bille de pas 20 mm (donc P = 20), et de longueur 1 m.



$$\text{Nombre de points} = \frac{1}{P_s} \times R \times P. \text{ Il faut donc : } \frac{1}{0,01} \times 1 \times 20 = 2000 \text{ points par tour.}$$

5.2.2 Avec un codeur incrémental.

Trois cas peuvent se présenter :

- Le système de traitement n'utilise que les fronts montants de la voie A (exploitation simple, par exemple : automates) → La résolution est égale au nombre de points (n). Pour obtenir 2000 points par tour, le choix se portera sur un disque de 2000 périodes.

- Certains systèmes de traitement permettent d'utiliser les fronts descendants et montants de la voie A (exploitation double) → La résolution est multipliée par 2 (2 × n). Il suffira donc d'un disque de 1000 périodes.

• Le système de traitement utilise les voies A et B (exploitation quadruple, commandes numériques par exemple) → La résolution est multipliée par 4 ($4 \times n$). Un disque de 500 périodes suffira.

5.2.3 Avec un codeur absolu.

Il faut choisir un codeur absolu simple tour de plus de 2000 points de résolution en puissance de 2. Nous pouvons choisir par exemple $2^{11} = 2048$ points.

Si l'on souhaite également connaître le nombre de tours effectués pour la distance de 1 m, il faut choisir un codeur absolu multi-tours permettant de compter au minimum jusqu'à :

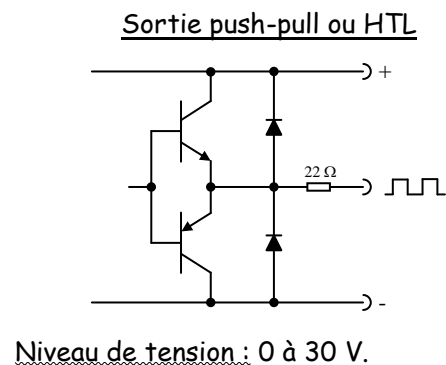
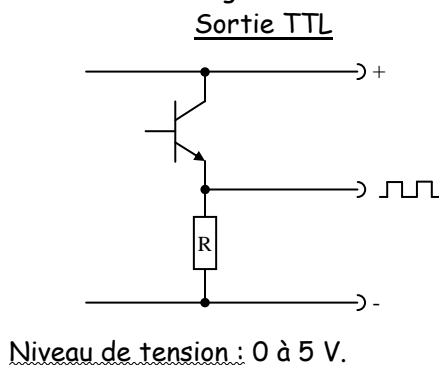
$$\frac{\text{longueur}}{\text{pas}} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ tours. On choisira un codeur de résolution 2048 points par tour et 64 tours.}$$

5.3 Différents types de sortie.

5.3.1 Sorties à transistor.

Il existe de types de sortie à transistor : TTL et push-pull.

Dans les deux cas les signaux sont rectangulaires, mais le niveau de tension est différent.



En raison du niveau de tension élevé, les codeurs à sorties HTL ont un très bon comportement CEM.

5.3.2 Interfaces série.

	SSI (Synchronous Serial Interface)	EnDat 2.2 (Heidenhaim)	Hiperface (Sick)
Type de liaison	Série synchrone Point à point	Série synchrone Point à point	Série Point à point
Mode de transmission des données	Unidirectionnel	Bidirectionnel	Bidirectionnel
Nombre de conducteurs ⁽¹⁾	4 (2 pour les données - 2 pour le signal d'horloge)	4	2
Longueur de câble maximale	Jusqu'à 500 m	150 m (avec le câble Heidenhaim)	Comparable à EnDat 2.2
Vitesse de transmission	1-2 MHz	Jusqu'à 8 MHz	Jusqu'à 10 MHz

(1) : Hors alimentation

D'après la revue "MESURES 774 - Avril 2005" - www.mesures.com.

5.3.3 Interfaces communicantes pour bus de terrain.

• Bus CAN : Système de bus Multi-Master avec câble à 2 fils. Il fonctionne en fonction de l'événement ou en fonction de l'information. Actuellement, les protocoles CAN normalisés sont spécifiés sous CanOpen.

• Profibus-DP : Système de bus Master-Slave avec câbles à 2 fils en RS485. Il existe un protocole Profibus-DP normalisé pour les codeurs.

5.3.4 Choix du type de sortie.

Il faut s'assurer de la compatibilité des caractéristiques électriques avec les entrées du système de traitement. De plus, les différents types de sorties imposent des limites technologiques (voir § 5-3.), dont notamment les fréquences admissibles.

Pour un codeur incrémental, il est indispensable de calculer la fréquence maximale d'utilisation (§ 4-1.).

Cette fréquence est liée à la résolution du codeur et à la vitesse de rotation de l'axe entraînant.

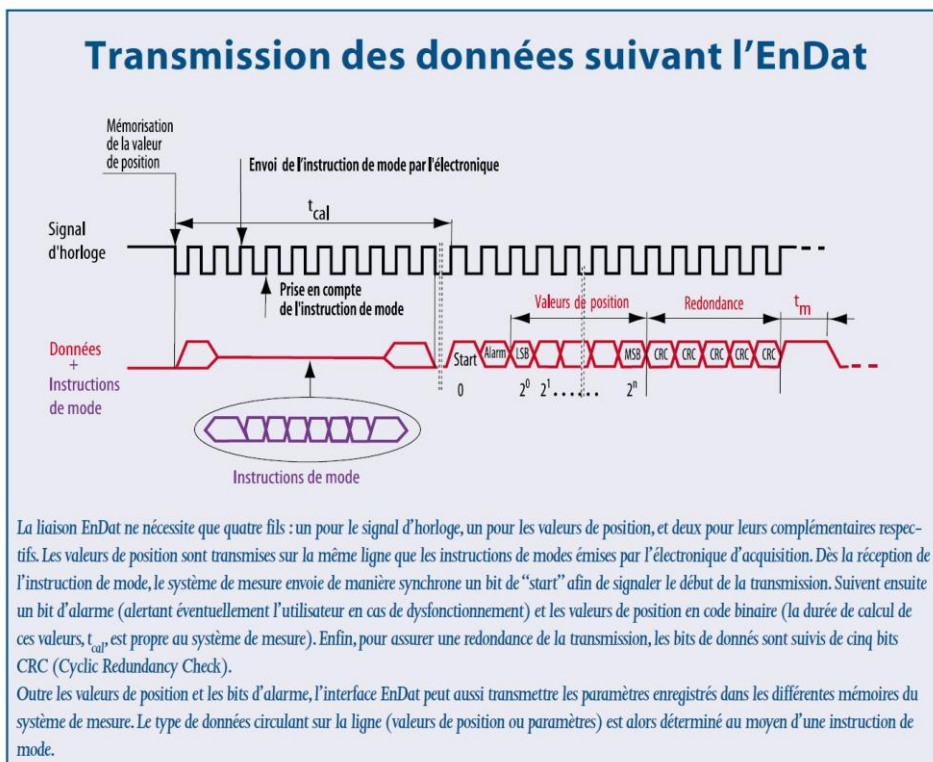
Il faut vérifier si la fréquence ainsi calculée est compatible avec les caractéristiques électriques du signal de sortie, et la fréquence maximale admissible du système de traitement choisi.

Il faut noter que N désigne la vitesse d'utilisation réelle du codeur qui peut être différente de la vitesse maximale du moteur, notamment dans le cas d'un déplacement à grande vitesse (GV), suivi d'un positionnement à petite vitesse (PV).

6 Avantages et inconvénients.

	Codeur incrémental	Codeur absolu
Avantages	<p>Le codeur incrémental est de conception simple (son disque ne comporte que deux pistes) donc plus fiable et moins onéreux qu'un codeur absolu.</p>	<p>Il est insensible aux coupures du réseau : la position du mobile est détenue dans un code qui est envoyé en parallèle au système de traitement. L'information de position est donc disponible dès la mise sous tension. Si le système de traitement "saute" une information de position délivrée par le codeur, la position réelle du mobile ne sera pas perdue car elle restera valide à la lecture suivante.</p>
Inconvénients	<p>Il est sensible aux coupures du réseau : chaque coupure du courant peut faire perdre la position réelle du mobile à l'unité de traitement. Il faudra alors procéder à la réinitialisation du système automatisé. Il est sensible aux parasites en ligne, un parasite peut être comptabilisé par le système de traitement comme une impulsion délivrée par le codeur. Les fréquences des signaux A et B étant généralement élevées, il faudra vérifier que le système de traitement est assez rapide pour prendre en compte tous les incréments (impulsions) délivrés par le codeur. Le non-comptage d'une impulsion induit une erreur de position qui ne peut être corrigée que par la lecture du "top zéro".</p>	<p>Il est de conception électrique et mécanique plus complexe aussi son coût sera plus élevé qu'un codeur incrémental. Les informations de position sont délivrées "en parallèle"; son utilisation mobilisera donc un nombre important d'entrées du système de traitement (A.P.I. par exemple).</p>

Annexe au paragraphe 5-3-2.



(Notes)

Grafcet



(Notes)

1 Présentation générale.

1.1 Définition.

Le GRAFCET (abréviation de GRAPhe Fonctionnel de Commande Etape-Transition) est un outil graphique permettant de décrire le comportement des systèmes automatisés séquentiels.

Les symboles à utiliser et les règles à observer sont définis par :

- la norme européenne NF EN 60848 (Aout 2002),

1.2 Structure.

La représentation par GRAFCET est faite à partir de symboles graphiques :

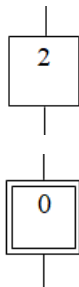
- les étapes;
- les transitions.

Le comportement attendu du système est décrit par :

- les actions ou ordres associés aux étapes;
- les réceptivités (ou conditions de transition) associées aux transitions.

Cinq règles d'évolution définissant formellement le comportement dynamique de la partie commande.

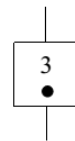
1.2.1 Les étapes.



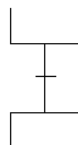
Chaque étape est représentée par un carré à l'intérieur duquel figure un numéro de repère. A un instant donné, une étape est active ou inactive.

Les étapes initiales sont repérées par un double carré. Elles indiquent les étapes qui sont actives en début de fonctionnement (situation initiale).

Remarque : On peut indiquer l'activité d'une étape à un moment donné du fonctionnement par un point placé dans la partie inférieure du carré. Dans l'exemple ci-contre, l'étape 4 est active.



1.2.2 Les liaisons orientées.



Ce sont des lignes verticales ou horizontales qui relient les étapes.

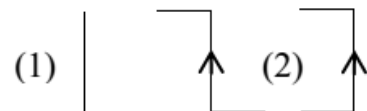
Elles indiquent le sens d'évolution du GRAFCET.

Elles sont orientées du haut vers le bas :

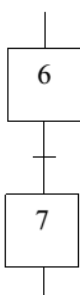
liaison descendante (1).

Une flèche doit être utilisée dans le cas contraire :

liaison ascendante (2).



1.2.3 Les transitions.



Une transition entre deux étapes se représente par une barre perpendiculaire aux liaisons orientées. Elle indique la possibilité d'évolution entre deux étapes.

Elle peut être :

- non validée;
- validée donc franchissable si toutes les étapes immédiatement précédentes sont actives;
- franchie si validée, dès que la condition de transition est vraie.

1.3 Les réceptivités.

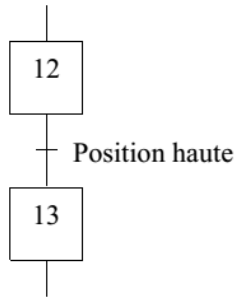
1.3.1 Réceptivités classiques.

A chaque transition est associée une proposition logique, appelée réceptivité, qui peut être vraie ou fausse.

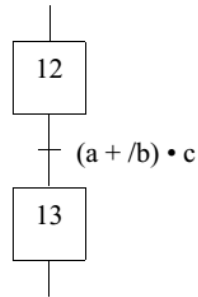
La proposition logique formant la réceptivité est constituée d'une ou plusieurs variables booléennes (variable d'entrée, variable d'étape, valeur d'un prédicat, ...).

La réceptivité s'inscrit à côté du trait de transition.

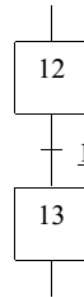
Description par un texte.



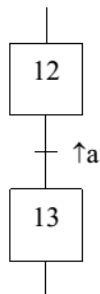
Description par une expression booléenne.



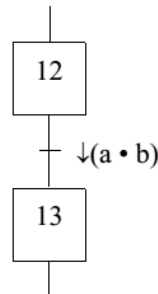
Réceptivité toujours vraie.



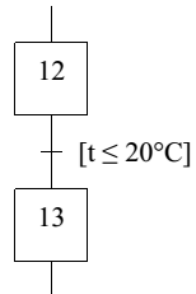
Front montant d'une variable logique.



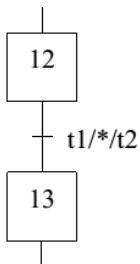
Front descendant d'une variable logique.



Valeur booléenne d'un prédicat.



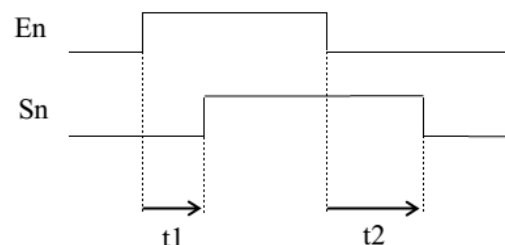
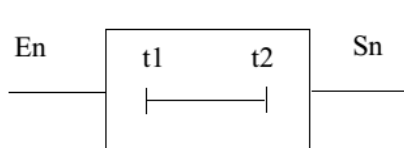
1.3.2 Prise en compte du temps.



La réceptivité associée à une transition peut dépendre d'une variable que l'on désire temporiser, par exemple une variable d'étape ou une variable d'entrée.

La notation "t1/*t2" indique que la réceptivité n'est vraie qu'après un temps t1 depuis le front montant (↑*) de la variable temporisée et redevient fausse après un temps t2 depuis le front descendant (↓*).

Cette notation est celle de l'opérateur à retard défini par la norme CEI 60617-12 (symbole n° 12-40-01) ci-dessous :



"t1" est le retard entre le changement de l'état logique "0" vers l'état logique "1" de la variable En.

"t2" est le retard apporté au changement de l'état logique "1" vers l'état logique "0" de la variable En.

Remarques :

- "t1" et "t2" doivent être remplacés par leur valeur réelle exprimée dans l'unité de temps choisie (seconde, minute, heure, ...).

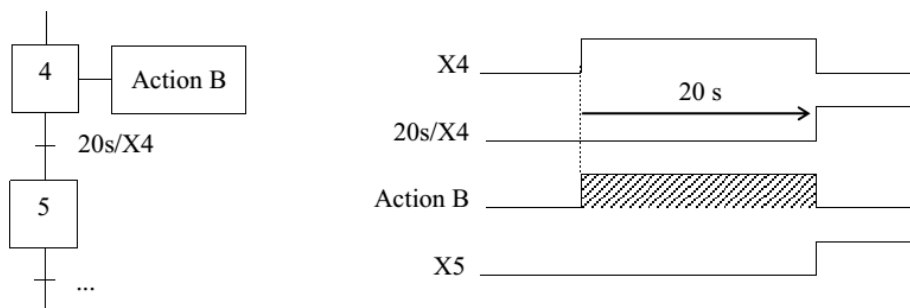
- La variable d'entrée "En" doit être présente pendant un temps égal ou supérieur au retard "t1" pour que la variable de sortie "Sn" prenne l'état logique "1".

1.3.3 Simplification usuelle :

L'utilisation la plus courante est la temporisation de la variable d'étape avec un temps "t2" égal à zéro. Ainsi, la réceptivité devient fautive dès la désactivation de l'étape temporisée.

Si la valeur "t2" est égale à 0, la notation simplifiée est préférable : "t1/Xn".

Exemple :



1.3.4 Synthèse.

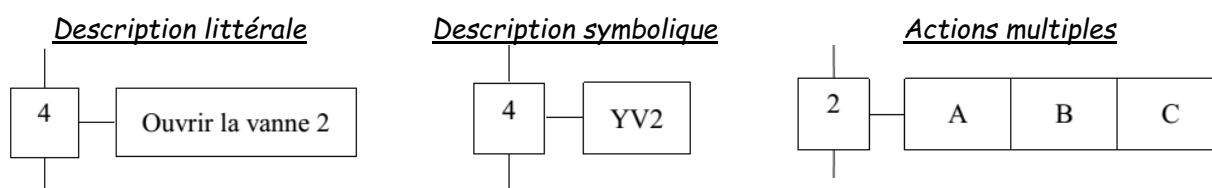
La condition de transition regroupe des informations d'origines diverses émises :

- par l'opérateur à partir du pupitre de commande où sont disposés :
 - des boutons poussoirs et des sélecteurs de mode de marche,
 - un bouton "coup de poing" d'arrêt d'urgence,
- par le système automatisé ou par l'installation où sont positionnés :
 - des capteurs de présence (tels que des interrupteurs de position ou des détecteurs de proximité),
 - des capteurs de grandeurs physiques (température, pression, ...),
- par des opérateurs internes ou externes à la partie commande tels que :
 - des temporisateurs,
 - des compteurs et des décompteurs,
- par la partie commande fournissant des informations sur sa propre situation :
 - état actif ou inactif des étapes (notation Xi),
 - résultats de traitement logique ou numérique (bit interne ou mot).

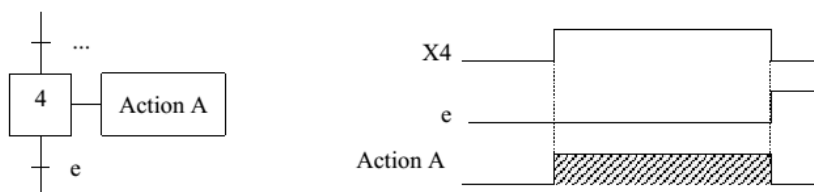
1.4 Les actions.

1.4.1 Les actions associées à l'étape.

Une ou plusieurs actions peuvent être associées à une étape. Elles traduisent "ce qui doit être fait" chaque fois que l'étape à laquelle elles sont associées est active. Les actions sont décrites de façon littérale ou symbolique à l'intérieur du (ou des) rectangle(s) relié(s) à l'étape.



Une action associée à une étape est généralement continue, c'est-à-dire qu'elle dure autant que l'étape ...



Si on veut maintenir une action pendant plusieurs étapes, plusieurs solutions sont possibles :

Associer l'action à plusieurs étapes,

Mémoriser cette action (voir plus loin).

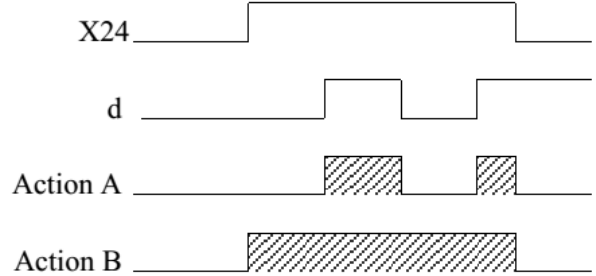
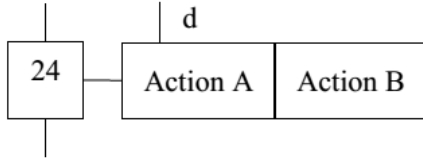
Associer cette action à une séquence // ou utiliser une macro étape (voir plus loin).

Voir en fin de document ...

1.4.2 Action conditionnelle.

Une action conditionnelle est une action dont l'exécution est soumise à une condition logique. Cette condition peut être une variable d'entrée (information venant d'un capteur ou d'un bouton-poussoir), une variable d'étape (Xn) ou une équation logique correspondant à une combinaison de plusieurs de ces variables.

L'exécution de l'action ne devient effective que lorsque l'étape, à laquelle elle est associée, devient active et que la condition logique associée à l'action devient vraie.



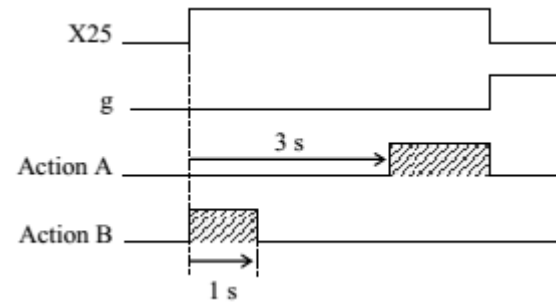
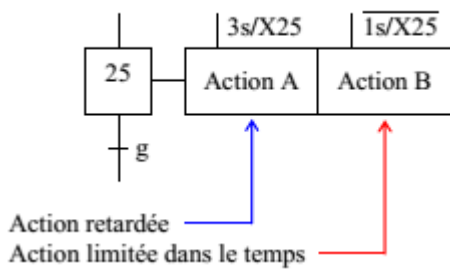
Autrement dit (sous forme d'équation booléenne) :

- Action A = X24 • d.
- Action B = X24.

1.4.3 Action retardée ou limitée dans le temps.

Une action retardée ou limitée dans le temps est un cas particulier d'action conditionnelle où le temps intervient comme condition logique.

Exemple :

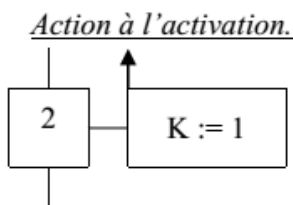


1.4.4 Action mémorisée.

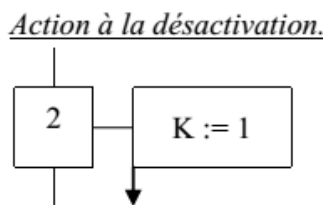
Une action mémorisée permet d'indiquer qu'une variable de sortie prend et garde (mémorisation) cette valeur imposée. Celle-ci reste inchangée tant qu'un nouvel événement spécifié ne la modifie pas.

A l'initialisation, la valeur de cette variable de sortie est nulle.

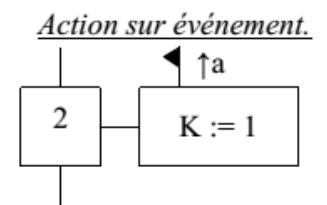
- | | | |
|-----------|----------------|---|
| Exemple : | "A := 0" | La valeur 0 est affectée à la variable booléenne A. |
| | "Mot M1 := 20" | La valeur 20 est affectée au mot M1 (variable numérique). |
| | "C1 := C1 + 1" | Opération d'incrément de la variable numérique C1. |



à l'activation de l'étape 2.



à la désactivation de l'étape 2.



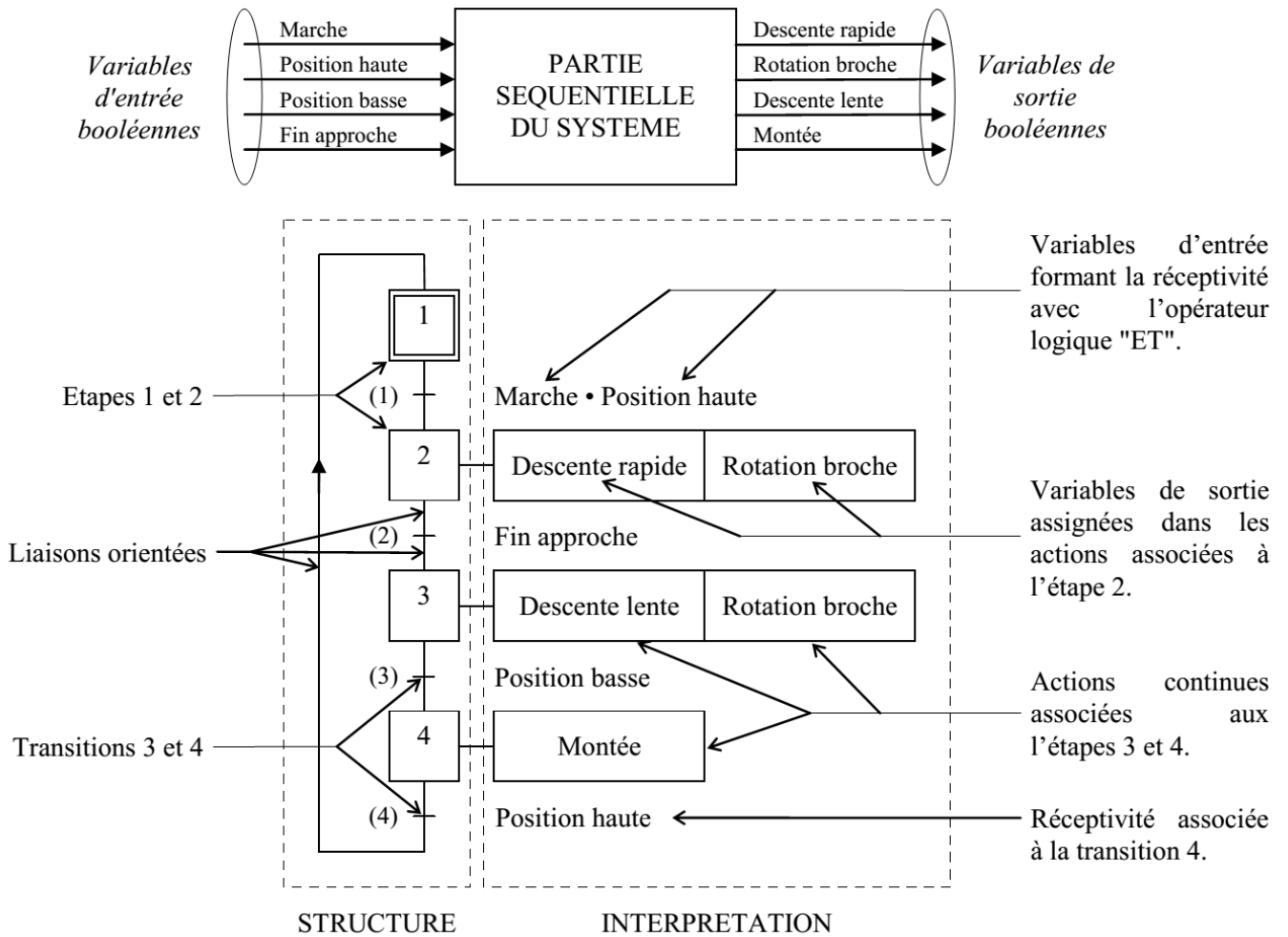
quand l'étape 2 est active et que ↑a se produit.

1.4.5 Action au franchissement.

Voir le document complet de M. Catallon.

1.5 Récapitulatif.

1.5.1 Exemple.



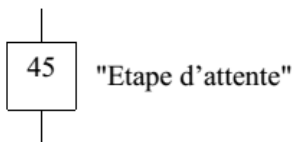
1.5.2 Commentaires.

Un commentaire relatif aux éléments graphiques d'un GRAFCET doit être placé entre guillemets.

Ce commentaire permet une lecture plus aisée du GRAFCET, mais n'a aucune influence sur son fonctionnement. Ce n'est pas une action.

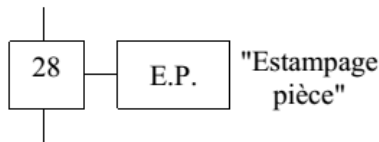
Exemple 1 :

Commentaire "Etape d'attente" relatif à l'étape 45.



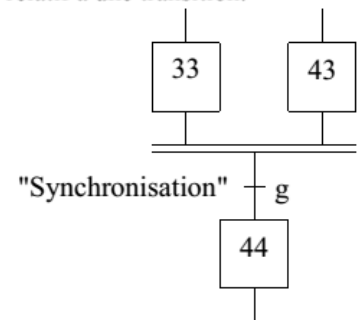
Exemple 2 :

Commentaire "Estampage pièce" relatif à l'action associée à l'étape 28.



Exemple 3 :

Commentaire "Synchronisation" relatif à une transition.



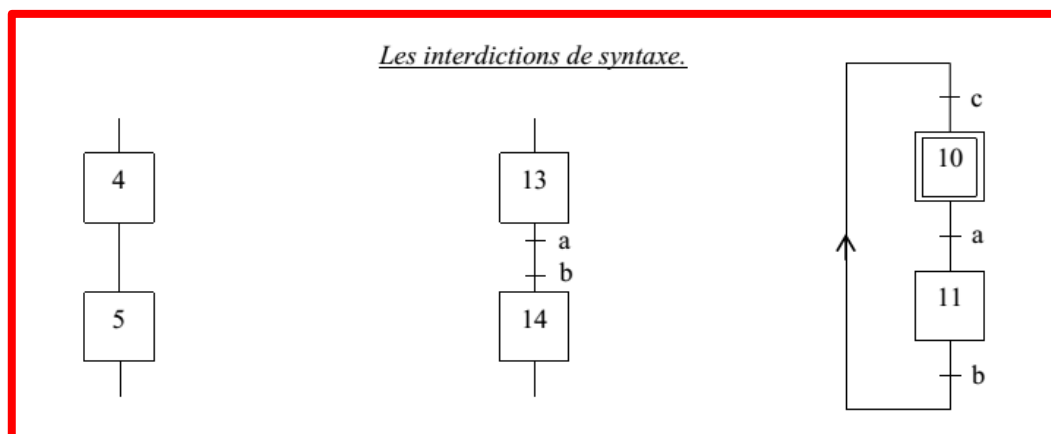
2 Structure.

2.1 Règles

2.1.1 Syntaxe.

L'alternance étape-transition et transition-étape doit toujours être respectée.

- Soit :
- 2 étapes séparées par une transition;
 - 2 transitions séparées par une étape.



2.1.2 Evolution.

Règle 1 : Situation initiale.

La situation initiale d'un GRAFCET caractérise le comportement initial de la partie commande vis-à-vis de la partie opérative, de l'opérateur et/ou des éléments extérieurs. Elle correspond aux étapes actives au début de fonctionnement. Elle traduit généralement un état de repos.

Règle 2 : Franchissement d'une transition.

Une transition est dite validée lorsque toutes les étapes immédiatement précédentes (c'est à dire reliées à cette transition) sont actives.

Le franchissement d'une transition se produit :

- lorsque la transition est validée;
- et que la condition de transition associée à cette transition est vraie.

Règle 3 : Evolution des étapes actives.

Le franchissement d'une transition entraîne simultanément :

- l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes;
- la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes.

Règle 4 : Evolutions simultanées.

Plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.

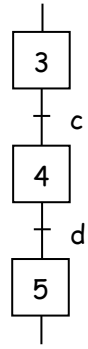
Règle 5 : Activation et désactivation simultanées d'une étape.

Si, au cours du fonctionnement de l'automatisme, une même étape est simultanément activée et désactivée, elle reste active.

2.2 Séquences.

2.2.1 Séquence unique.

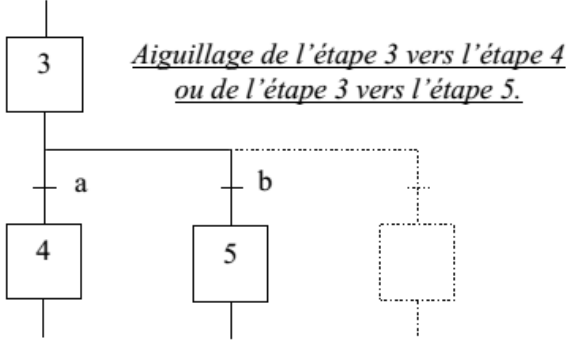
Une séquence unique est composée d'une suite d'étapes alignées verticalement sans divergence, ni convergence.



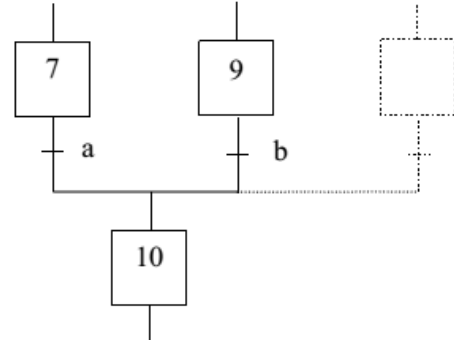
2.2.2 Sélection de séquence.

Une sélection de séquence est un choix d'évolution entre plusieurs séquences à partir d'une étape. La liaison est représentée par une simple barre horizontale.

On parle de divergence en « ou »



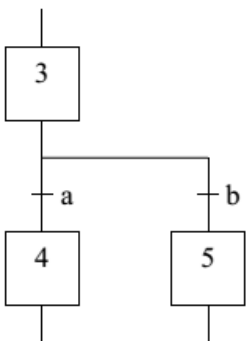
On parle de convergence en « ou »



Remarque : Il est indispensable que toutes les conditions de transitions associées aux transitions validées en même temps soient exclusives, c'est à dire ne pouvant pas être vraies simultanément.

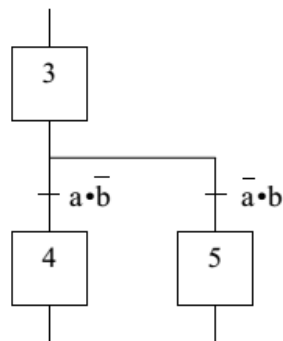
Cette exclusion peut être :

- soit d'ordre physique (incompatibilité mécanique ou temporelle),
- soit d'ordre logique dans l'écriture des réceptivités.



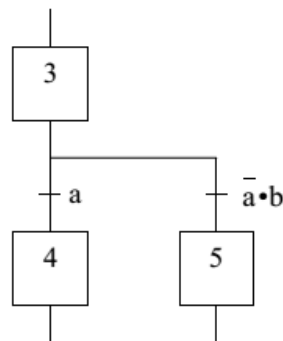
Si les informations a et b sont vraies lors de l'activation de l'étape 3, les deux étapes 4 et 5 deviennent actives.

Parallélisme interprété



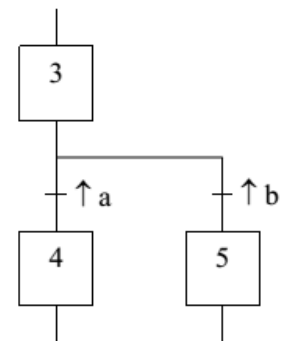
Les conditions de transition sont disjointes. Il n'y a aucune possibilité de franchissement simultané des deux transitions.

Structure exclusive par compléments



Si les variables a et b sont vraies au moment de l'activation de l'étape 3, la priorité va conduire à l'activation de l'étape 4.

Structure exclusive avec priorité

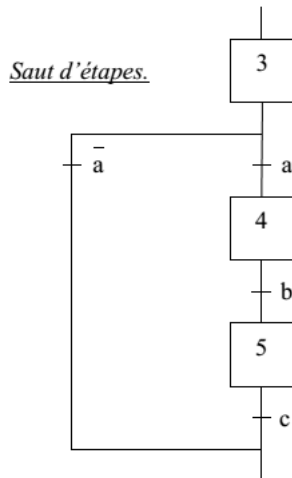


La simultanéité d'occurrence des fronts montants des variables a et b étant impossible, l'exclusivité d'évolution est assurée.

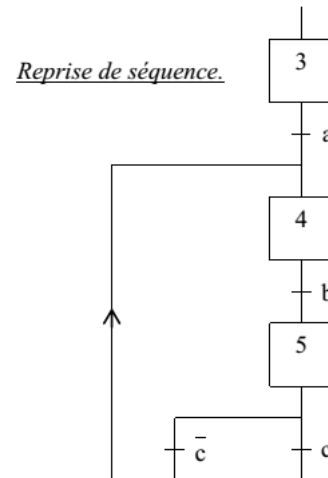
Structure exclusive par propriété des fronts

☞ Applications :

Structure saut d'étape : Cette structure permet de sauter une ou plusieurs étapes (notamment si les actions associées à ces étapes sont inutiles).



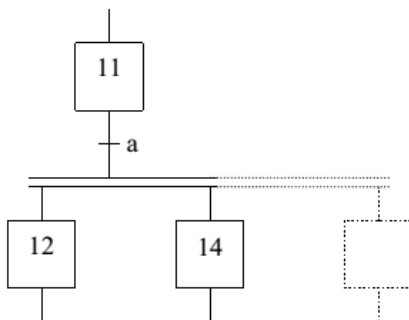
Structure reprise de séquence : Cette structure permet de recommencer plusieurs fois la même séquence (tant que par exemple une condition fixée n'est pas obtenue).



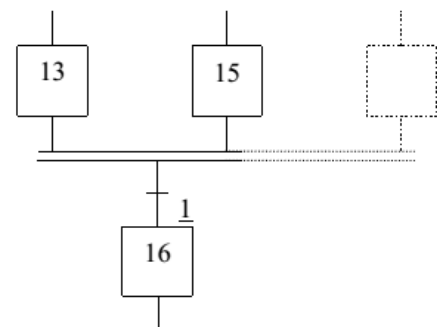
2.2.3 Séquences parallèles (ou simultanées).

Plusieurs séquences se présentent, commandées par une même transition. Leurs exécutions sont simultanées et indépendantes. La liaison est représentée par une double barre horizontale.

Divergence de séquences simultanées



Convergence de séquences simultanées



2.3 Structures particulières.

2.3.1 Macro étape.

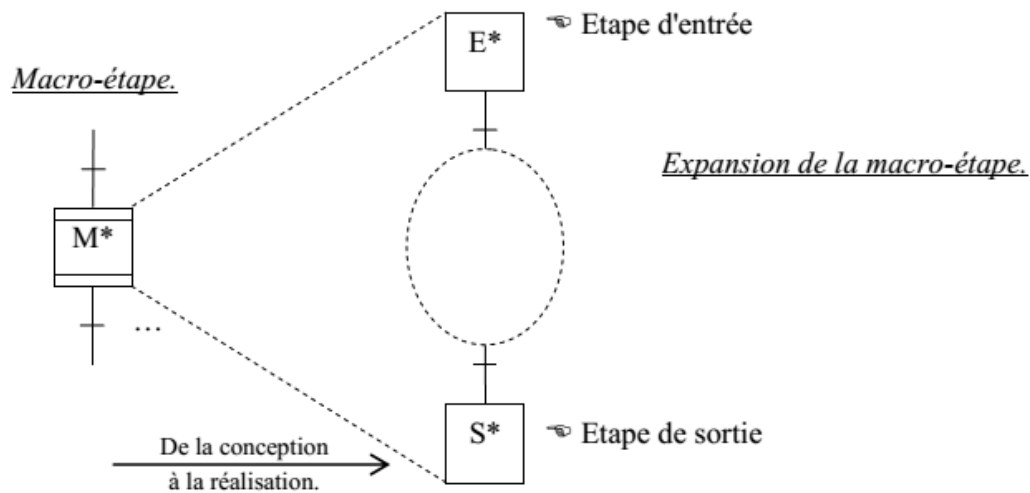
L'objectif de la représentation par "macro-étape" est de permettre de ne pas s'encombrer de détails inutiles dès le début de l'analyse et de se consacrer uniquement à l'analyse des fonctions (ou tâches) à remplir et à leur coordination.

a) Définition.

Une macro-étape est l'unique représentation d'un ensemble unique d'étapes et de transitions nommé "expansion de la macro-étape".

b) Représentation.

On représente une macro-étape à l'aide d'une double barre dans le symbole d'étape. On repère cette macro-étape à l'aide d'un identificateur commençant par la lettre M.

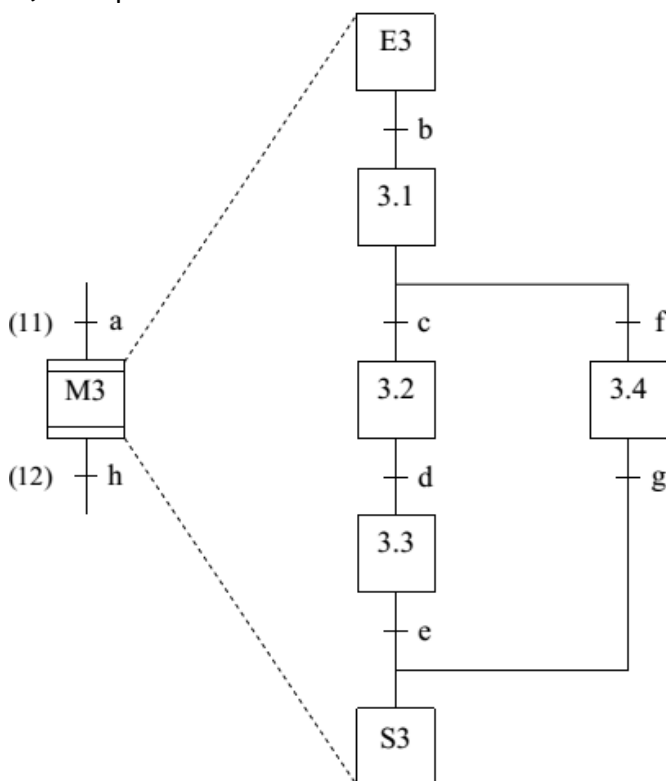


Nota Bene : L'astérisque doit être remplacé par le repère de la macro-étape.

c) Règles d'emploi.

- L'expansion de la macro-étape M^* est une partie de GRAFCET comportant une seule étape d'entrée E^* et une seule étape de sortie S^* .
- Le franchissement de l'une des transitions placées en amont de la macro-étape M^* active l'étape d'entrée E^* de son expansion.
- La (ou les) transition(s) qui suivent le symbole de la macro-étape M^* n'est (ou ne sont) validée(s) que lorsque l'étape de sortie S^* de l'expansion de la macro-étape M^* est active.

d) Exemple :



La macro-étape M3 est représentée avec son expansion.

Le franchissement de la transition 11 active l'étape d'entrée E3 de la macro-étape M3.

Lorsque l'étape de sortie S3 sera active, la transition 12 sera validée.

Le franchissement de la transition 12 désactive l'étape de sortie S3.

e) Remarques.

Certains logiciels de programmation d'A.P.I. mettent à profit cette notion, car ils permettent la programmation de macro-étapes comme sur les documents papier.

Attention, aucune action ne peut être associée à une macro-étape.

2.3.2 Coordination de GRAFCET.

Si, lors d'une analyse, certaines séquences apparaissent de façon répétitive, on peut utiliser la notion de tâche (et de grafcet de tâche). Celle-ci sera lancée ou relancée plusieurs fois dans le même cycle de production par le grafcet principal.

Le concepteur du GRAFCET doit alors gérer les conditions de transition d'entrée et de sortie de la tâche, afin d'éviter tout conflit d'accès.

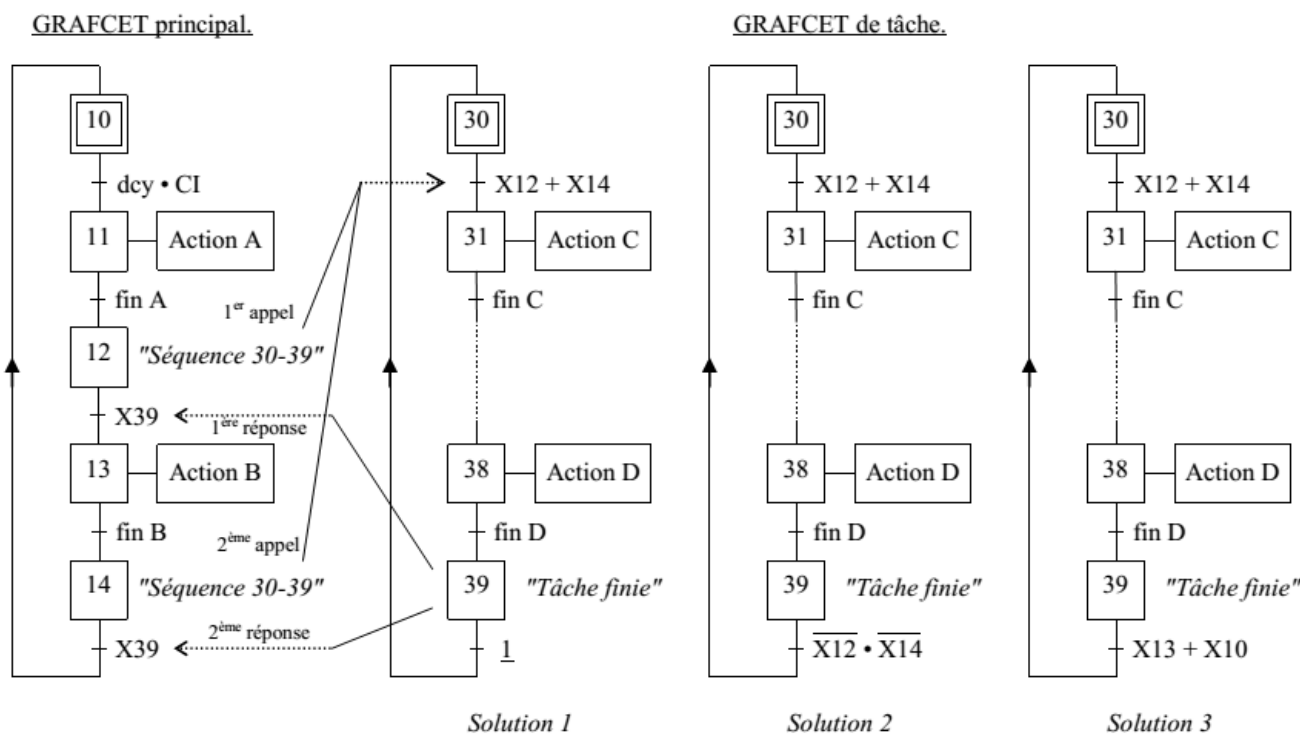
- Principe de coordination entre un GRAFCET principal et un GRAFCET de tâche.

La coordination entre le GRAFCET principal et le GRAFCET de tâche fonctionne suivant le principe dit "appel-réponse" :

- un ordre de lancement ou d'appel est émis par le GRAFCET principal en direction du GRAFCET de tâche : condition X12 ou X14,
- une réponse est fournie au GRAFCET principal en fin d'exécution du GRAFCET de tâche : condition X39.

La réinitialisation du GRAFCET de tâche peut être obtenue de trois manières :

- une réceptivité toujours vraie (1^{ère} solution) ;
- le contrôle de la désactivation des étapes de lancement (2^{ème} solution) : condition $(\overline{X12} \cdot \overline{X14})$;
- le contrôle de l'activation des étapes suivant les étapes de lancement (3^{ème} solution) : condition $(X13 + X10)$.



Remarque : La deuxième et la troisième solution permettent, avant de réinitialiser le GRAFCET de tâche, de vérifier si la relance du GRAFCET principal est effective.

Conclusions sur la notion de tâche.

- Il n'y a pas de notion de hiérarchie entre le GRAFCET principal et le GRAFCET de tâche. Sans forçage, il n'y a pas de hiérarchie.
- Les relations entre le GRAFCET principal et le GRAFCET de tâche sont de même nature dans les deux sens : ces deux graphes échangent des états d'étapes.

2.4 Forçages de situation.

2.4.1 Introduction.

L'évolution des commandes des systèmes de production automatisés et l'utilisation du GEMMA pour décrire les modes de marche ont conduit les créateurs du GRAFCET à proposer la notion de forçage.

En effet, l'ordre de forçage permet d'imposer à un GRAFCET une situation qu'il aurait été impossible ou difficile d'atteindre directement.

Exemples : mise en situation initiale ou activation de GRAFCET, déblocage d'une situation après analyse de défaut, traitement d'un arrêt d'urgence, gel de l'évolution d'un GRAFCET après dysfonctionnement, reprise d'une situation précédente permettant un redémarrage de l'installation, etc...

2.4.2 Définition-Symbole.

La **"situation vide"** d'un GRAFCET partiel correspond à la situation dans laquelle aucune de ses étapes n'est active. Elle est notée : { }.

La **"situation initiale"** d'un GRAFCET partiel correspond à l'ensemble de ses étapes actives à l'instant initial. Elle est notée : {INIT}.

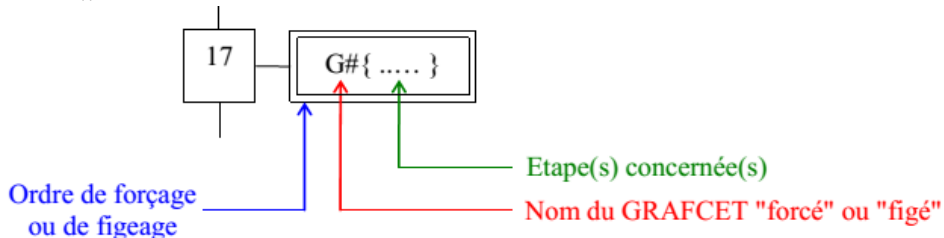
La **"situation donnée"** d'un GRAFCET partiel correspond à la situation dans laquelle les étapes i, j, ... sont seules actives. Elle est notée : {i, j, ...}.

La **"situation courante"** d'un GRAFCET partiel correspond à l'ensemble de ses étapes actives à l'instant considéré. Elle est notée : {*}.

Les actions d'un GRAFCET de niveau supérieur sur un GRAFCET de niveau inférieur sont représentées par des ordres de forçage ou de figeage.

Un ordre de forçage est représenté dans un double rectangle associé à l'étape pour le différencier d'une action.

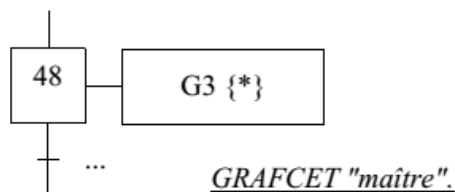
Il se représente de la manière suivante :



2.4.3 Figeage.

Le GRAFCET "esclave" est bloqué dans la situation courante (situation actuelle) où il se trouvait avant l'ordre de figeage. Ceci présente l'avantage permettre la reprise de la production (si c'est possible).

Dans la situation figée, des précautions sont à prendre pour s'assurer du caractère non dangereux des actions liées au GRAFCET "esclave". En effet, les ordres émis par les étapes actives du GRAFCET "esclave" continuent d'être émis.



L'activation de l'étape 48 du GRAFCET "maître" force ou fige le GRAFCET G3 dans la situation courante (situation dans laquelle se trouve le GRAFCET G3 à l'instant du forçage). Les étapes actives restent activées et les étapes inactives restent désactivées.

La désactivation de l'étape 48 du GRAFCET "maître" annule l'ordre de figeage du GRAFCET G3 et l'évolution de ce dernier reprend là où elle s'était arrêtée.

2.4.4 Désactivation totale d'un GRAFCET esclave.

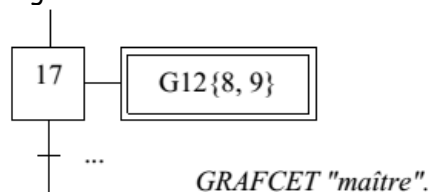
Cette désactivation met toutes les étapes du GRAFCET "esclave" dans l'état inactif. Ce GRAFCET ne pourra être réutilisé qu'après une réactivation par le GRAFCET "maître".



Lorsque l'étape 23 du GRAFCET "maître" est active, le GRAFCET 4 est forcé dans une situation vide, c'est-à-dire qu'aucune étape du GRAFCET 4 (GRAF CET "esclave") n'est active.

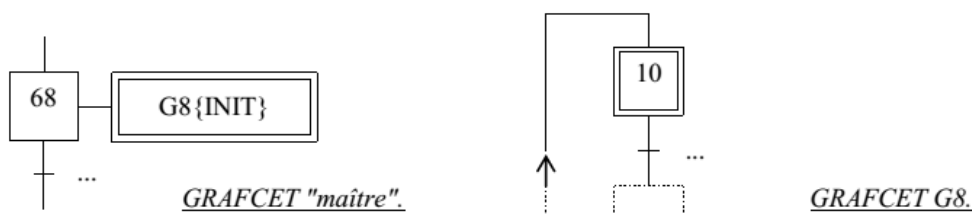
2.4.5 Mises en situations.

Il s'agit de mettre le GRAFCET "esclave" dans une situation prédéterminée.



Lorsque l'étape 17 est active, le GRAFCET G12 (GRAF CET "esclave") est forcé dans la situation caractérisée par l'activité des étapes 8 et 9.

Cas particulier de l'initialisation où seule l'étape initiale est activée et ce, quelle que soit la situation antérieure de ce GRAFCET : actif, en fonctionnement ou inactif.



Lorsque l'étape 68 du GRAFCET "maître" est active, le GRAFCET G8 est forcé dans la situation dans laquelle seule ses étapes initiales sont actives, c'est -à-dire que l'étape 10 du GRAFCET G8 (GRAF CET "esclave") est forcée à l'état "1" et toutes les autres étapes du GRAFCET G8 sont désactivées (c'est-à-dire forcées à l'état "0").

L'évolution du GRAFCET G8 ne pourra reprendre que lorsque l'étape 68 ne sera plus active.

2.4.6 Règles d'évolution par forçage.

- * Un GRAFCET ne peut être forcé que par un GRAFCET hiérarchiquement supérieur.
- * Un GRAFCET inférieur ne peut être forcé que dans une seule situation à la fois, par un ou plusieurs GRAFCET supérieurs.
- * L'ordre de forçage est prioritaire sur les autres conditions assurant l'évolution du GRAFCET forcé.
- * Le ou les GRAFCET forcés sont maintenus dans la situation imposée, tant que l'ordre de forçage est maintenu.

3 Structures génériques.

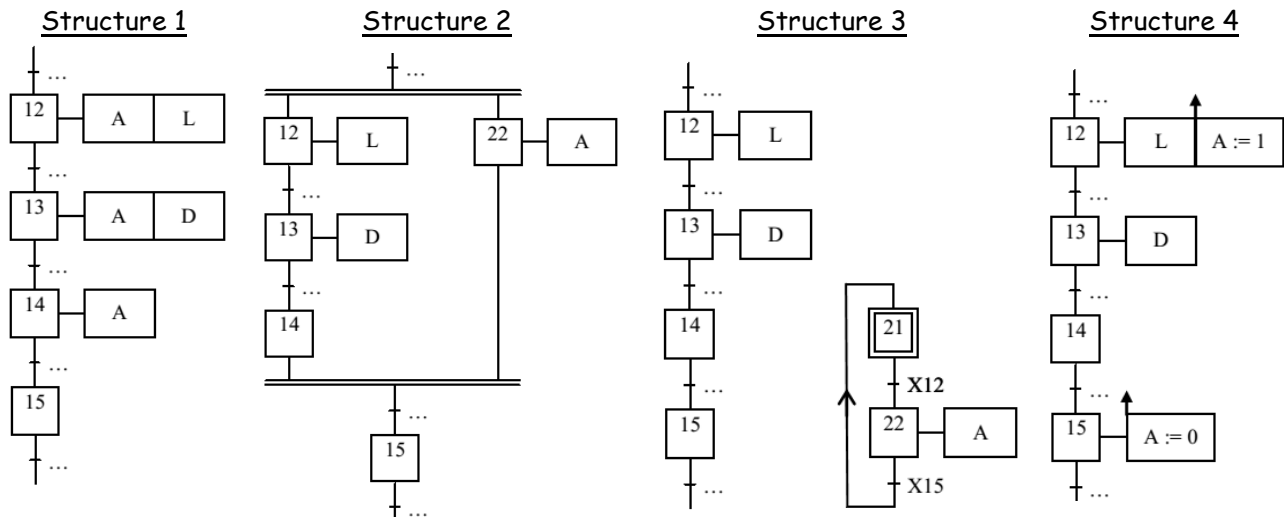
3.1 Action "maintenance".

3.1.1 Fonctionnement.

Une action "A" doit être maintenue pendant les activités des étapes 12 à 14.

3.1.2 Solutions.

Plusieurs structures peuvent être utilisées :



Structure 1 : L'action "A" est répétée dans les étapes 12, 13 et 14, permettant son déroulement sans interruption.

Structure 2 : L'action "A" (associée à l'étape 22) est commandée pendant la durée d'activité des étapes 12 à 14.

Structure 3 : L'action "A" est "mémoiree" par un GRAFCET auxiliaire (étapes 21 et 22).

Structure 4 : L'action "A" commence dès l'activation de l'étape 12 (Set), reste maintenue lorsque l'étape 12 est désactivée (action mémoiree) et cesse dès l'activation de l'étape 15 (Reset).

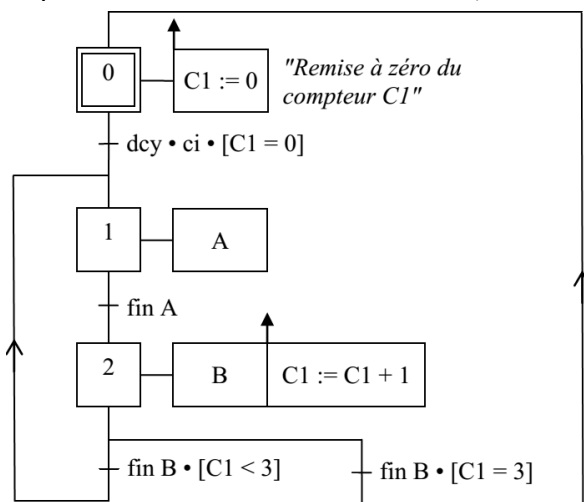
3.2 Comptage.

3.2.1 Fonctionnement

On souhaite effectuer trois fois de suite la séquence "A, B".

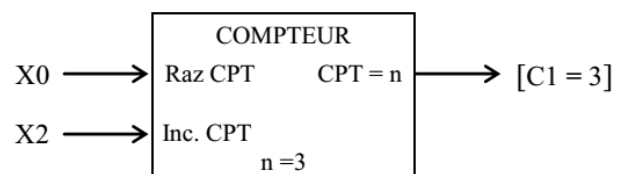
3.2.2 Solution.

Utilisation d'une variable de comptage "C1" permettant la reprise de la séquence 1-2 tant que le contenu du compteur reste inférieur à la valeur 3 (valeur de présélection).



Dans le GRAFCET proposé ci-contre, la variable de comptage "C1" est :

- initialisée à l'étape 0;
- incrémentée sur front montant de l'étape 2;
- testée en aval de l'étape 2.



Remarques : Différentes variantes peuvent exister en fonction des compteurs utilisés (compteur, décompteur, présélection, comparaison, etc. ...).

3.3 Séquences alternées.

3.3.1 Présentation.

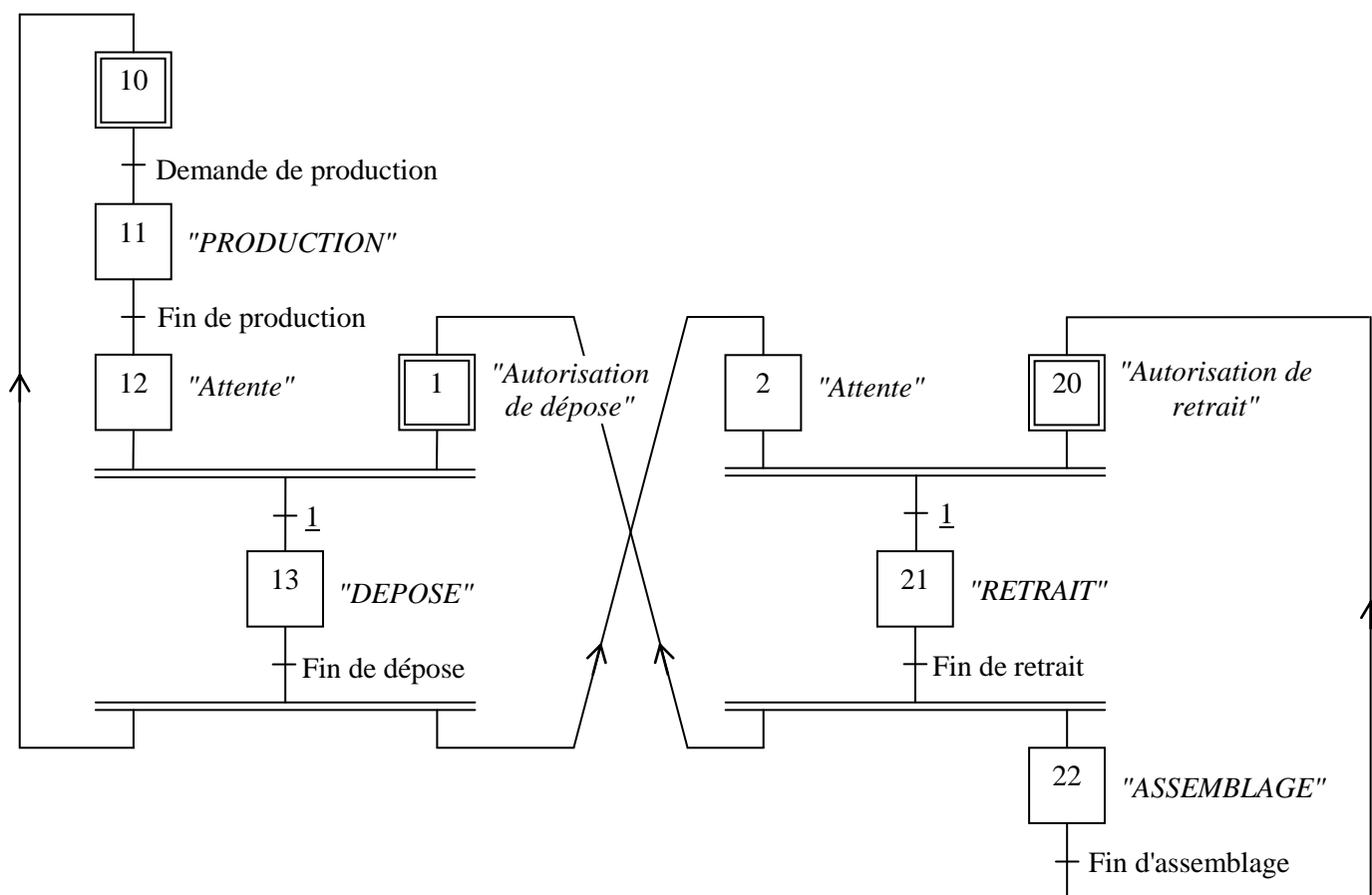
Ce type de structure permet de réaliser le déroulement alterné de deux séquences. Autrement dit, la fin d'une séquence autorise alternativement le début de l'autre.

Exemple :

Des pièces sont usinées sur une machine de production et doivent ensuite être assemblées sur un poste d'assemblage. Afin de pouvoir effectuer le passage d'une pièce d'une machine à l'autre, un emplacement commun accessible aux deux machines est prévu, pouvant servir ultérieurement de tampon intermédiaire.

Le GRAFCET proposé permet la gestion de cette aire de stockage commune au poste de production et au poste d'assemblage.

3.3.2 Solution.



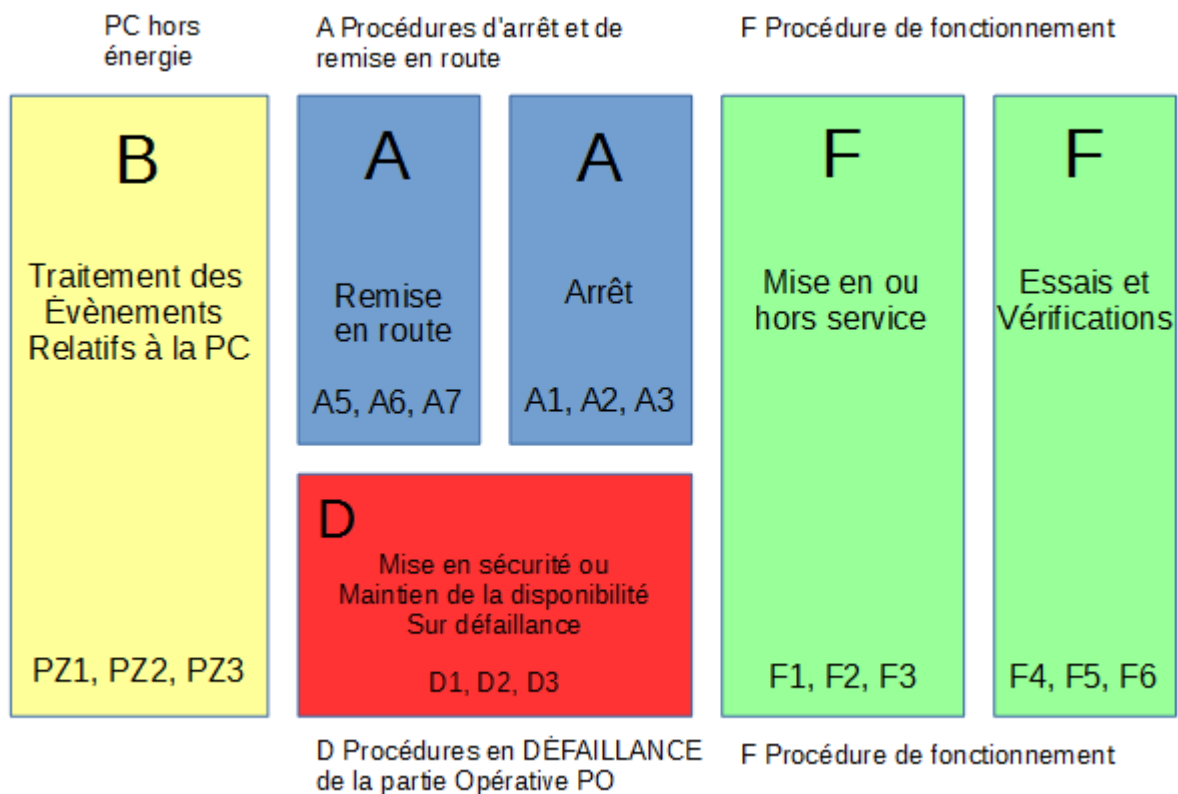
Les opérations de "Dépose" (étape 13) et de "Retrait" (étape 21) sont réalisées alternativement.

Les étapes 1 et 2 constituent des étapes de synchronisation qui permettent l'alternative d'exécution des opérations de "Dépose" et de "Retrait".

3.4 Exemple complexe.

Un exemple encore plus complet est disponible dans le cours complet de M. Catallon disponible sur le réseau.

GDMMA



(Notes)

1 GEMMA.

1.1 Introduction.

1.1.1 Présentation.

En 1981, l'ADEPA (Agence nationale pour le Développement de la Production Automatisée) formalise un outil graphique permettant de prévoir et de décrire, dès la conception d'un système de production automatisé, les modes de marche, d'arrêt et d'arrêt d'urgence nécessaires au fonctionnement de ce système automatisé. Il s'agit du GEMMA (abréviation de Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt).

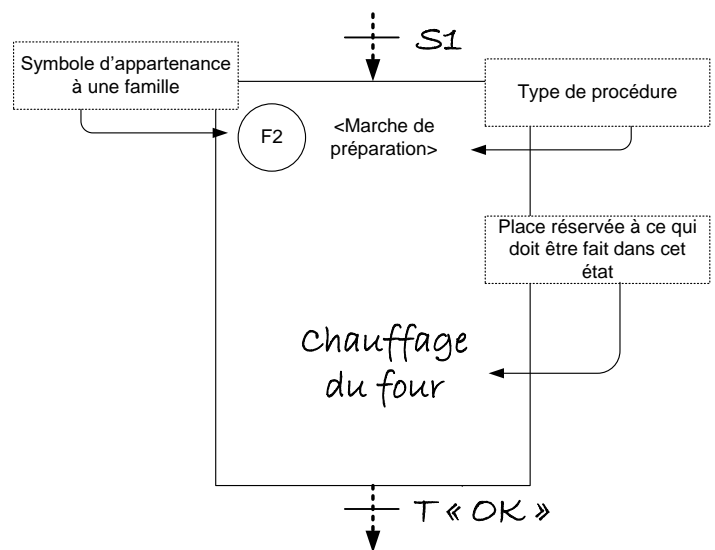
Se présentant sous la forme d'une grille, le GEMMA est un document qui permet de recenser les modes ou états de fonctionnement d'un système automatisé, en utilisant des critères clairement définis. Il est utilisé pour la conception de la partie commande, pour l'apprentissage de la conduite du système automatisé et sa maintenance.

1.1.2 Rectangle-état.

Chaque mode de marche, d'arrêt ou de procédure en défaillance peut être décrit à l'intérieur d'une case du GEMMA appelée "rectangle-état". Chaque "rectangle-état" traduit un état du système à un moment donné de son évolution.

Exemple ci contre =>

Les principales possibilités d'évolution sont suggérées par un trait discontinu assorti d'une flèche indiquant le sens de l'évolution la plus courante. On passe d'un état à l'autre avec une condition d'évolution.



On l'indique alors par un tiret transversal sur la liaison orientée avec la condition d'évolution. Si la condition d'évolution est explicite : on indique =1.

1.2 Les concepts de base du GEMMA.

1.2.1 Concept n° 1 : "PC hors énergie - PC sous énergie".

La grille originale du GEMMA (version 1994) est divisée en deux zones principales :

- une zone "PC hors énergie" correspondant à l'état inopérant de la partie commande vis à vis de la partie opérative;
- une zone "PC sous énergie" regroupant toutes les procédures exécutables (la partie commande fonctionne normalement).

Le passage d'une zone à l'autre s'effectue par mise hors ou en énergie de la partie commande.

Les procédures de marche et d'arrêt ainsi que les procédures en défaillance sont vues par une partie commande en ordre de marche.

1.2.2 Concept n° 2 : le critère "Production".

Le système est dit en "Production" si la valeur ajoutée pour laquelle il a été conçu est obtenue en fin d'exécution. Dans le cas contraire, le système est dit "Hors production".

Produit entrant → PRODUCTION → Produit sortant avec valeur ajoutée.

Les "rectangles-états" à l'intérieur de la zone doublement encadrée en traits forts discontinus correspondent à des modes de marche pour lesquels la machine produit.

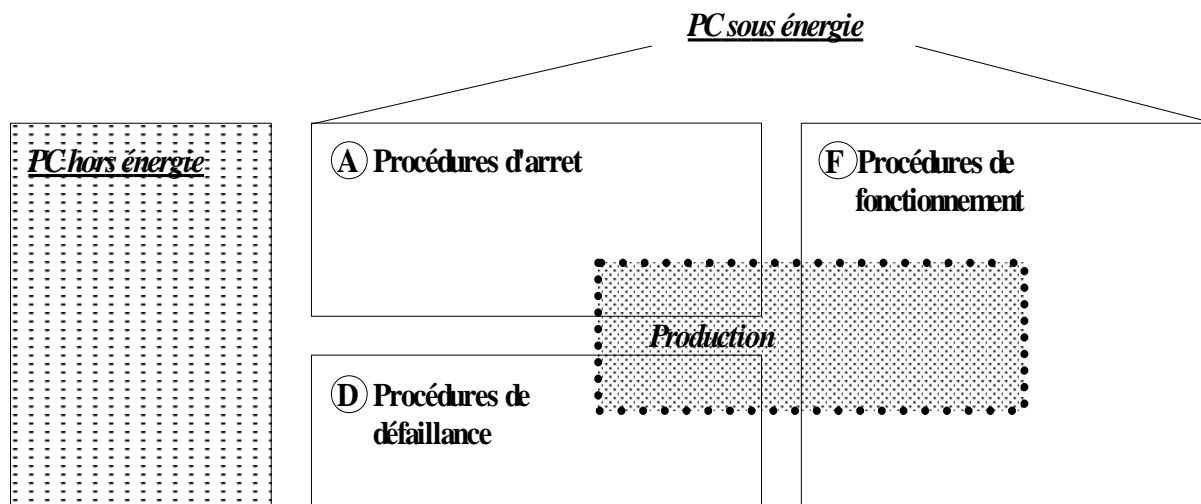
1.2.3 Concept n° 3 : Les trois familles de procédure.

Correspondant chacune à une zone du GEMMA, ces trois familles de procédures sont :

☞ Famille F (procédures de fonctionnement) : Cette famille regroupe tous les états F, qui sont indispensables à l'obtention de la valeur ajoutée. Notons qu'on ne produit pas forcément dans tous les états F : ils peuvent être préparatoires à la production, servir aux réglages et aux tests.

☞ Famille A (procédures d'arrêt de la partie opérative) : Cette famille regroupe les états d'arrêt normaux (fin de journée, manque d'approvisionnement) et les procédures de remise en route.

☞ Famille D (procédures en défaillance de la partie opérative) : Cette famille regroupe tous les modes de marche traduisant un état d'arrêt suite à une défaillance prévisible ou imprévisible du système de production. Ces procédures ont pour objectif de limiter au maximum les conséquences et les risques pour le personnel ou le matériel.



2 Définition des différents états.

2.1 Famille F "Procédures de fonctionnement".

2.1.1 Rectangle-état F1 <Production normale>.

Dans cet état, l'installation produit normalement de la valeur ajoutée. C'est l'état pour lequel elle a été conçue. On peut souvent faire correspondre à cet état un GRAFCET que l'on appelle GRAFCET de Production Normale.

2.1.2 Rectangle-état F2 <Marche de préparation>.

Cet état est utilisé pour les machines nécessitant une préparation préalable à la production normale : préchauffage de fours, remplissage de réservoirs, approvisionnement, mises en route progressive de moteurs, etc.

2.1.3 Rectangle-état F3 <Marche de clôture>.

C'est l'état nécessaire pour certaines machines devant être vidées, nettoyées, etc. ..., en fin de journée ou en fin de série. Par exemple, nettoyage d'installation : industrie alimentaire, centrale à béton, etc.

2.1.4 Rectangle-état F4 <Marche de vérification dans le désordre>.

Cet état permet de vérifier certaines fonctions ou certains mouvements sur la machine sans respecter l'ordre du cycle. Ce mode est appelé plus simplement "mode manuel".

2.1.5 Rectangle-état F5 <Marche de vérification dans l'ordre>.

Dans cet état, le cycle de production peut être exploré au rythme voulu par la personne effectuant la vérification, la machine pouvant produire ou ne pas produire. Ce mode est souvent appelé "mode pas à pas".

2.1.6 Rectangle-état F6 <Marche de test>.

Les machines de contrôle de mesure, de tri, ... comportent des capteurs qui doivent être réglés ou étalonnés périodiquement. Ce mode de marche permet ces opérations de réglage de paramètres ou d'étalonnage de capteurs.

2.2 Famille A "Procédure d'arrêts".

2.2.1 Rectangle-état A1 <Arrêt dans l'état initial>.

C'est l'état "repos" de la machine. Il correspond en général à la situation initiale du GRAFCET. C'est pourquoi, comme une étape initiale, ce "rectangle-état" est entouré d'un double carré.

2.2.2 Rectangle-état A2 <Arrêt demandé en fin de cycle>.

Lorsque l'arrêt est demandé, la machine continue de produire jusqu'à la fin du cycle. L'état A2 est donc un état transitoire vers l'état A1.

2.2.3 Rectangle-état A3 <Arrêt demandé dans un état déterminé>.

La machine continue de produire jusqu'à un arrêt en une position autre que fin de cycle. C'est un état transitoire vers l'état A4.

2.2.4 Rectangle-état A4 <Arrêt obtenu>.

La machine est alors arrêtée en une autre position que la fin de cycle.

2.2.5 Rectangle-état A5 <Préparation pour remise en route après défaillance>.

C'est dans cet état que l'on procède à toutes les opérations (dégagements, nettoyages, ...) nécessaires à la remise en route après défaillance.

2.2.6 Rectangle-état A6 <Mise P.O. dans l'état initial>.

La machine étant en A6, on remet manuellement ou automatiquement la partie opérative en position pour un redémarrage dans l'état initial.

2.2.7 Rectangle-état A7 <Mise P.O. dans état déterminé>.

La machine étant en A7, on remet la partie opérative en position pour un redémarrage dans une position autre que l'état initial.

2.3 Défaillances.

2.3.1 Rectangle-état D1 <Arrêt d'urgence>.

C'est l'état pris lors d'un arrêt d'urgence : on y prévoit non seulement les arrêts, mais aussi les cycles de dégagements, les procédures et précautions nécessaires pour éviter ou limiter les conséquences dues à la défaillance.

2.3.2 Rectangle-état D2 <Diagnostic et/ou traitement de défaillance>.

C'est dans cet état que la machine peut être examinée après défaillance et qu'il peut être apporté un traitement permettant le redémarrage.

2.3.3 Rectangle-état D3 <Production tout de même>.

Il est parfois nécessaire de continuer la production même après défaillance de la machine : on aura alors une "production dégradée" ou "production forcée" ou une production aidée par des opérateurs non prévus en production normale.

3 Exploitation du GEMMA.

3.1 Méthode d'exploitation.

3.1.1 A quel moment doit-on utiliser le GEMMA ?

L'étude des modes de marche et d'arrêt ainsi que celle des procédures de sécurité doit être ébauchée le plus tôt possible, afin que le choix des composants de la Partie Opérative et de la partie "dialogue Homme/Machine" ne soit pas remis en cause d'un point de vue sécurité.

1 - On s'intéresse aux états visant le même objectif. On portera notamment son attention aux états concourants aux fonctions suivantes :

- mise en production avec ou non des marches de préparation et de clôture;
- mise au point, essais et réglages;
- surveillance, mise en sécurité, diagnostic;

- maintenance, dépannage;
- mise hors ou en état de marche de la P.C.

2 - On trace les boucles fonctionnelles incluant les états retenus et leurs liaisons :

- On écrit le comportement de la P.O. dans chaque "rectangle-état".
- On renforce les liaisons orientées permettant l'évolution entre les "rectangles-états" utilisés.

3 - On recherche pour chaque boucle les informations de passage d'un état à l'autre.

4 - Barrer les "rectangles-états" qui ne sont pas utilisés.

3.1.2 Respect de l'unicité de mode.

L'utilisation du GEMMA permet de considérer le système dans sa globalité. Ceci implique qu'à tout instant, on soit dans un mode de marche et un seul (ou ce qui revient au même, dans un "rectangle-état" et un seul).

Cette condition dite "respect de l'unicité de mode" a pour objectif de ne pas créer de situations contradictoires.

Le concepteur devra donc impérativement choisir des conditions d'évolution de manière qu'il soit impossible de se trouver dans plus d'un état à la fois.

3.2 Programmation.

3.2.1 GEMMA et GDMMA.

Le regroupement des différentes boucles fonctionnelles peut se faire soit sur la grille du GEMMA ou soit hors de celle-ci. Le graphe ainsi obtenu s'appelle Graphe Descriptif des Modes de Marche et d'Arrêt (GDMMA). Le GDMMA tracé sur une feuille libre évite de s'encombrer des rectangles-états non concernés par le choix définitif des modes de marche et d'arrêt.

On ne doit donc pas confondre le GEMMA (grille d'étude) avec le GDMMA qui est le résultat de l'étude.

3.2.2 Boucle fonctionnelle.

Conception et utilisation du GEMMA sont basées sur le concept de boucles fonctionnelles. Il s'agit de succession de modes qui permettent de réaliser un fonctionnement type. Unicité.

De par sa conception le GEMMA d'une machine traduit un fonctionnement unique, il en découle qu'à chaque instant le système ne peut se situer que dans un seul rectangle ou mode ... contrairement au grafcet ...

Les trois plus fréquentes sont les suivantes :

<u>A1 - F1 - A2 - A1</u>	: boucle de fonctionnement minimale d'un système automatisé.
<u>(A1 - F1 -) D1 - A5 - A6 - A1</u>	: boucle d'arrêt d'urgence.
<u>A1 - F3 (ou F4) - A6 - A1</u>	: boucle de vérification.

3.3 Grafcet de tâches.

3.3.1 Hiérarchisation des GRAFCET.

L'utilisation du GEMMA pour décrire les modes de marche a conduit les créateurs du GRAFCET à proposer la notion de "forçage de situation". Cette notion sous-entend l'existence d'une hiérarchie dans les GRAFCET.

En présence d'un système automatisé, les contraintes de sûreté et de conduite induisent une priorité et une hiérarchie fonctionnelle à trois niveaux.

En présence d'un système automatisé, les contraintes de sûreté et de conduite induisent une priorité et une hiérarchie fonctionnelle à trois niveaux entre les tâches :

SURETE => CONDUITE => PRODUCTION NORMALE

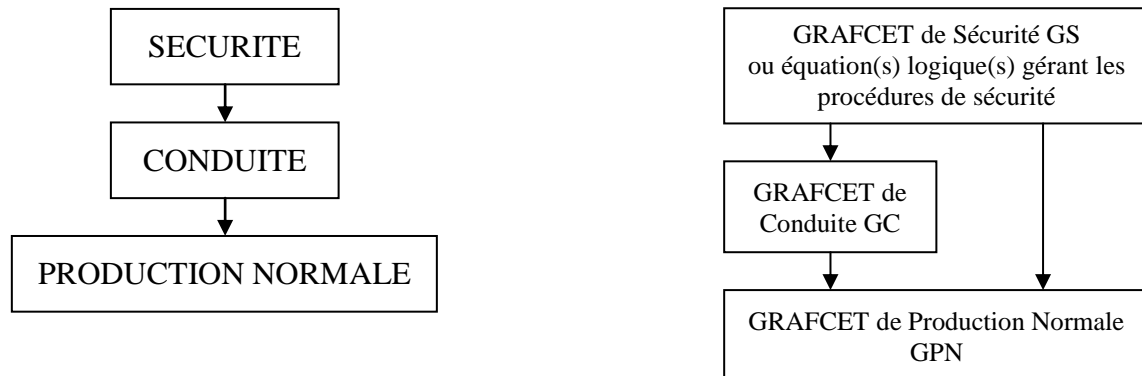
On décompose alors le grafcet de l'ensemble en plusieurs grafcet dont notamment :

GS le grafcet de sécurité qui gère les procédures de sécurité est réceptif à une consigne d'arrêt d'urgence et ce depuis tous les états !

GC le grafcet de conduite qui gère les modes de marche et d'arrêt précisé dans le GEMMA, il associe une étape à chacun des modes prévus.

GPN le grafcet de production normale qui gère l'évolution du cycle de production.

On dit que GS est maître par rapport à GC et GPN qui de ce fait se trouve en être les esclaves.



3.3.2 Forçages et figeages de situation.

Les actions d'un GRAFCET sur un autre peuvent être représentées par des ordres de :

- forçage notés par exemple "GPN{INIT}",
- figeage notés par exemple "GPN{*}",

ce qui traduit la hiérarchie entre les différents GRAFCET.

Nota Bene. : Pour de plus amples renseignements sur les forçage et sur la synchronisation des grafcets, vous pouvez consulter le cours intitulé "Le GRAFCET".

3.4 Conséquences matérielles.

3.4.1 Gestion de l'énergie.

En ce qui concerne la gestion de l'énergie, la mise sous tension accède directement dans le rectangle état « D1 ».

C'est aussi le rectangle état atteint suite à une défaillance ayant entraîné l'ouverture du relais de sécurité KAU. Il faut bien penser à considérer TOUTES les conditions d'alimentation de KAU.

3.4.2 Pupitre de dialogue.

Si le GDMMA a été bien fait on doit voir apparaître le pupitre de dialogue qui contient les composants permettant l'évolution entre les différents rectangles états traduisant les fonctionnements de la machine.

Dans la synthèse de la fin du document on trouve :

BP « init », BP « reset », BP « Réarm », Commutateur « Auto/Manu », BP « Arrêt », AU

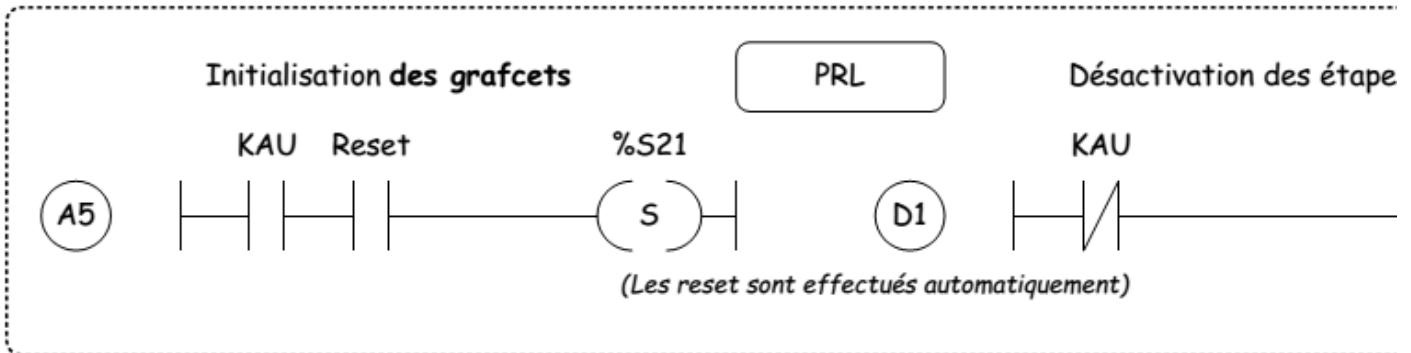
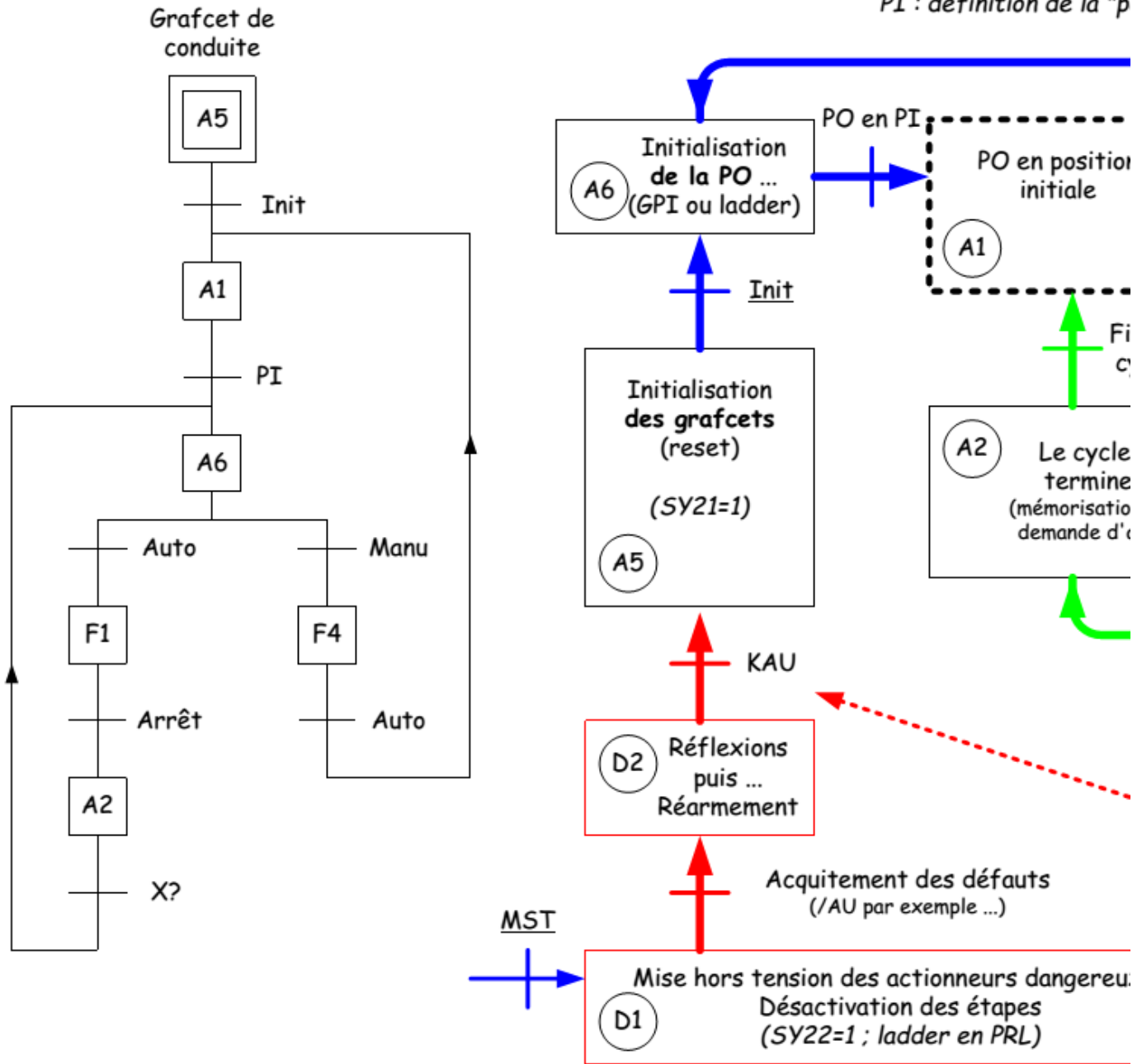
4 Bibliographie.

- Le GEMMA - S. Moreno et E. Peulot - Collection A. Capliez - Editions Casteilla - ISBN : 2.7135.1752.4.
- Le GRAFCET - S. Moreno et E. Peulot - Collection A. Capliez - Editions Casteilla - ISBN : 2.7135.1640.4.

du GEMMA ... au GDMMA ... *

Guide d'Etude de
Graphe Descriptif

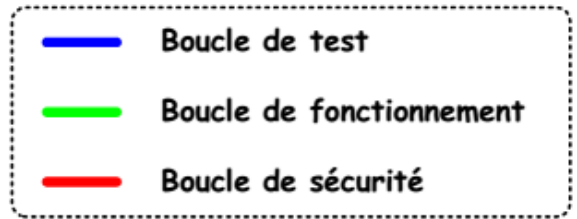
PI : définition de la "p



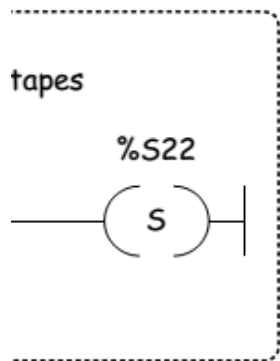
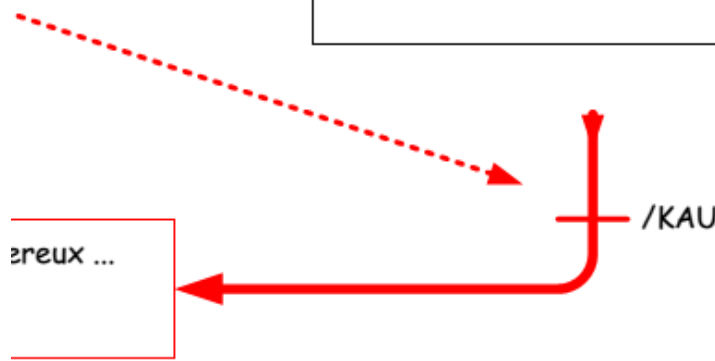
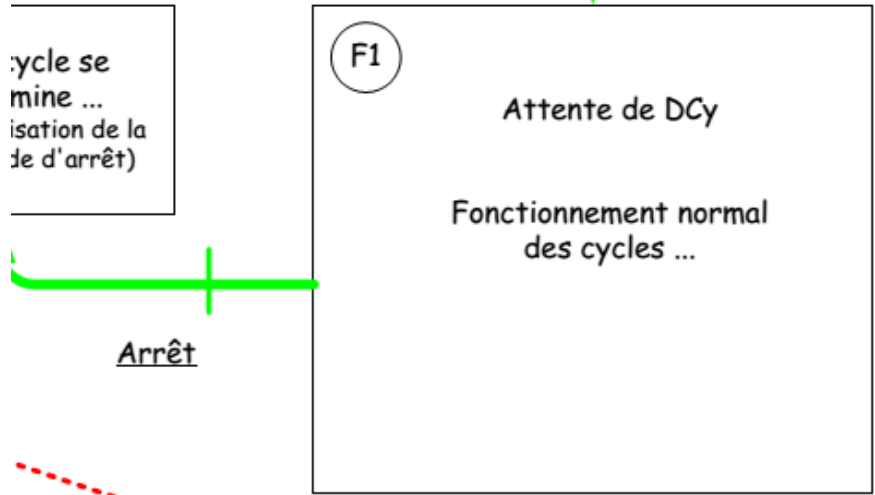
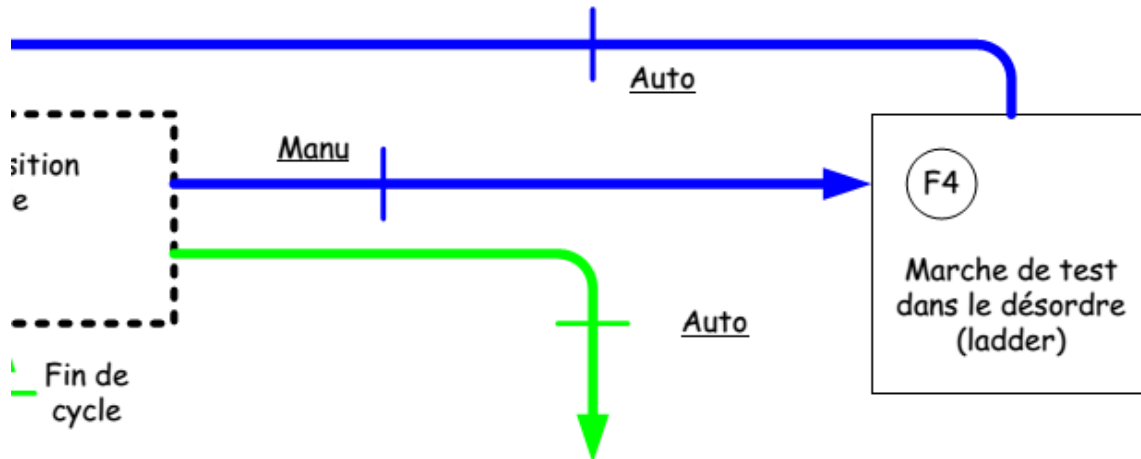
(*)

de des Modes de Marche et d'Arrêt ...

criptif des Modes de Marche et d'Arrêt ...

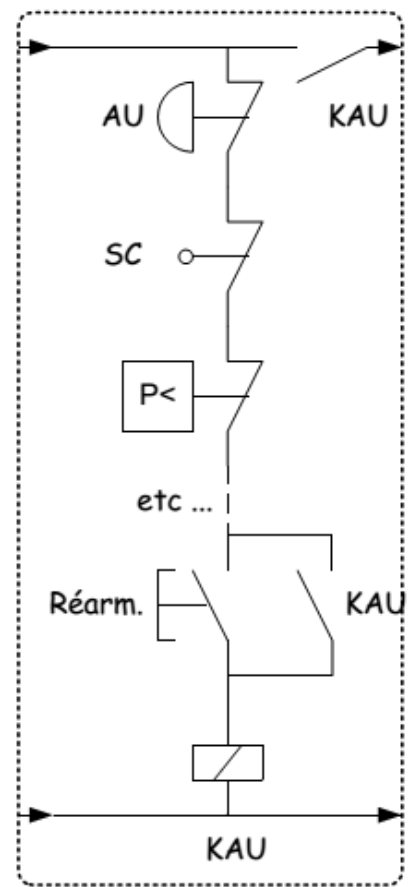


la "position initiale"



Traitement logiciel
exemple PL7 ...

Traitement câblé de l'arrêt d'urgence KAU :



(Notes)

Commande fonctionnelle



Commutateur triphasé.
Protection des personnes inexistante.
Des générations d'élèves ont pratiqué ce matériel totalement interdit d'utilisation aujourd'hui.
(JP Chopin)

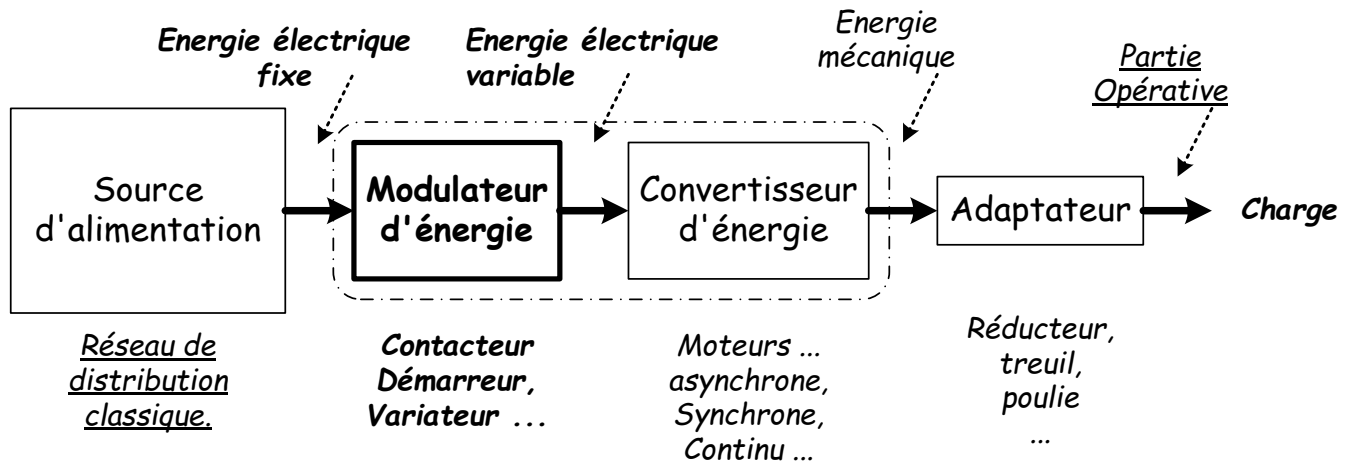
(Notes)

1 Décomposition fonctionnelle.

1.1 Rappel.

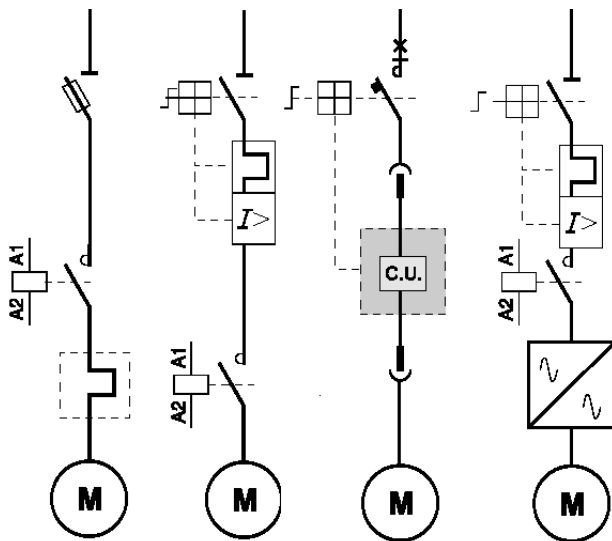
Une chaîne cinématique modélise de manière claire les dispositifs concourant aux mouvements d'une partie opérative. Elle définit les relations qui en lient les variables.

La structure la plus répandue est la suivante :



Il devient de moins en moins possible de dissocier l'étude, le choix et la mise en œuvre du modulateur et du convertisseur.

1.2 Fonctions



Un départ-moteur comprend quatre fonctions de base :

- le sectionnement,
- la protection contre les courts-circuits,
- la protection contre les surcharges,
- la commutation/commande ou variation (marche - arrêt).

Chaque départ-moteur peut être enrichi de fonctionnalités supplémentaires selon les besoins de l'application. Elles peuvent concerner :

- la puissance : variation de la vitesse, démarrage progressif, inversion de phase, etc.
- le contrôle : contacts auxiliaires, temporisation, communication, etc.

2 Commande TOR.

2.1 Présentation.

2.1.1 Généralité.

Les contacteurs sont des composants électromécaniques de commutation monostables commandés électriquement. Ils sont capables d'établir, de supporter et d'interrompre un courant électrique dans des conditions données y compris les surcharges de service.

2.1.2 Vocabulaire.

Au niveau du vocabulaire il faut différencier plusieurs termes : relais, contacteur, contacteur auxiliaire, mini-contacteur, contacteur de puissance etc ...

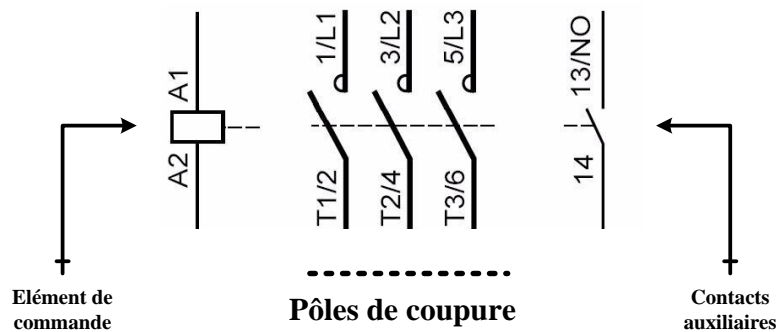
Plusieurs fonctions peuvent être remplies, dans chacun des cas, les composants sont similaires (bobine + contacts), mais le vocabulaire change !

Fonction remplie	Appellation	Critère de choix	Equivalents technologiques
isolation galvanique	Relais	Niveau d'isolation	Opto-coupleur,
Amplification de courant	Contacteur, (de puissance)	Courant d'emplois (*3/*4) Tension de commande	Transistor, relais statique, etc
multiplication d'information	Relais, contacteur auxiliaire	Nombre et type de contacts	?

Dans la suite on étudiera plus particulièrement les contacteurs.

2.1.3 Constitution.

Ils sont constitués de trois parties fonctionnelles distinctes : les pôles de coupure, l'organe de commande (bobine) et les contacts auxiliaires.



Les **contacts principaux** ou **contacts de puissance** sont les éléments qui permettent d'établir et d'interrompre le courant¹, un **pôle** est défini par ses valeurs nominales de courant et de tension.

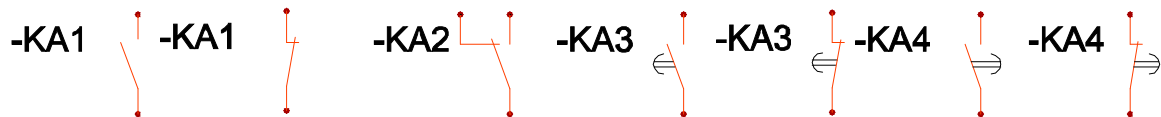
Les contacts sont généralement ouverts au repos².

Les **auxiliaires** sont les organes qui permettent d'assurer la communication entre le contacteur et les commandes externes comme : auto-maintien, verrouillage électrique, signalisation etc ...

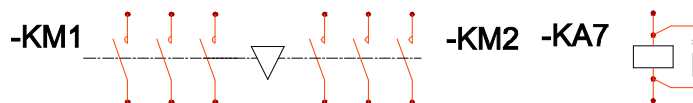
Les contacts auxiliaires sont de plusieurs types :

- instantané à fermeture (F ou NO) c'est à dire ouvert au repos et passant sinon,
- instantané à ouverture (O ou NC) c'est à dire passant au repos et ouvert sinon,
- instantané (OF) les deux contacts ont un point commun. On parle aussi d'**inverseur**.
- temporisé au travail**, les contacts basculent un certain temps après l'alimentation,
- temporisé au repos**, les contacts basculent un certain temps après la désalimentation.

Les symboles en sont les suivants :

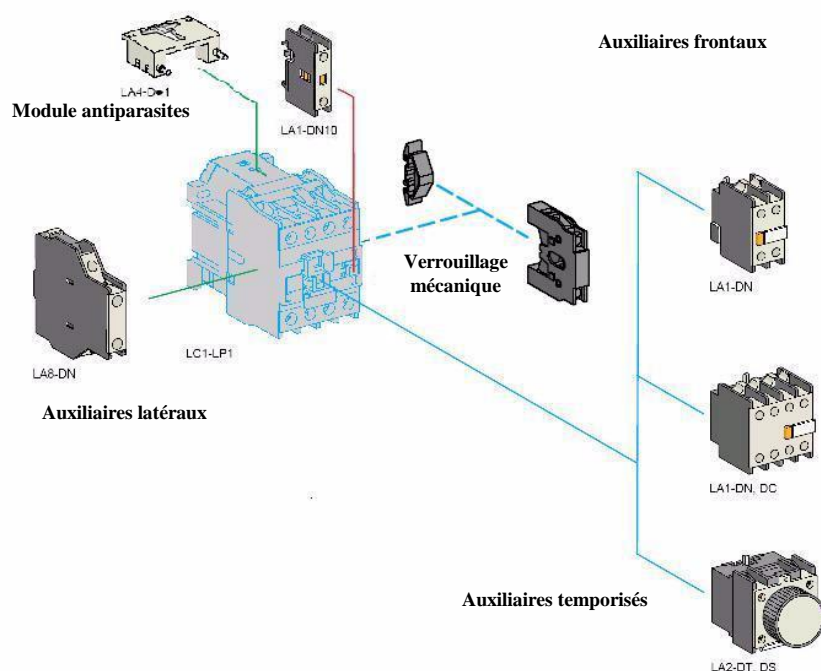


Il faut y ajouter les options comme les **verrouillages mécaniques**, les **filtres anti-parasites**, les couplages câblés pour les inverseurs, etc ...



¹ Ils sont équipés de contacts argent-oxyde de cadmium dont la résistance à l'arc et l'endurance mécanique sont remarquables.

² Remarque : un **rupteur** est un contacteur dont les contacts principaux sont fermés au repos.



La **commande** est assurée par un électro-aimant qui comprend un circuit magnétique ouvert (composé de deux parties : une mobile l'autre fixe) et une bobine. Lorsqu'elle est alimentée, la bobine produit un flux magnétique qui entraîne l'attraction de l'armature mobile et donc la fermeture des pôles solidaires³.

Dès que la bobine est privée de tension, le circuit magnétique se démagnétise et l'armature mobile retrouve sa position de repos grâce à des ressorts de rappel.

Pour le repérage, voir le chapitre 13 sur la schématisation ...

2.2 Choix d'un contacteur.

Le choix d'un contacteur est fonction :

- de la nature du réseau,
- des caractéristiques de la charge⁴ : puissance, service et type,
- du type de commande envisagée.

Cela se traduit par la définition de plusieurs paramètres propres aux contacteurs.

2.2.1 Caractéristiques électriques.

On définit la **tension assignée d'emploi** comme la tension maximale supportée par les pôles ouverts en fonctionnement normal, on la note **Ue**.

Le **courant assigné d'emploi (Ie)** donné par un constructeur dépend de la catégorie d'emplois principalement mais aussi d'autres paramètres comme la température, la tension d'emploi etc ... Il s'agit du courant maximal qui pourra traverser les pôles en régime établi, dans des conditions spécifiées et sans provoquer d'échauffement anormal. On peut généralement assimiler le **courant thermique conventionnel (Ith)** au courant d'emploi en **catégorie AC1**.

2.2.2 Catégories d'emploi⁵.

La **catégorie d'emplois** définit les valeurs maximales des courants établi et coupé. Donc, en fonction du processus à commander, on détermine la catégorie d'emploi qui permet de dimensionner le contacteur. En effet, un contacteur devant couper et établir un courant de 50 A est différent de celui qui doit couper 50 A mais établir 350 A ...

Les normes ont inventorié plusieurs catégories d'emploi dont les plus connues sont les suivantes :

³ Ce mouvement est soit :

- rotatif en pivotant sur un axe (simple coupure),
- rectiligne en glissant parallèlement aux parties fixes (double coupure).

⁴ Attention au cas d'un contacteur monté en amont d'un variateur de vitesse ...

⁵ A comparer aux services types pour le choix des moteurs au chapitre 12.

En courant alternatif :

- AC1 : charge résistive ou ayant un $\text{Cos}(\Phi) > 0,95$
fermeture et coupure Ie.
- AC3 : moteur asynchrone à cage coupure moteur lancé,
fermeture sur 6.Ie et coupure de Ie.

En courant continu, il existe aussi des catégories d'emplois qu'on ne détaille pas ici.

2.2.3 Caractéristiques « mécaniques ».

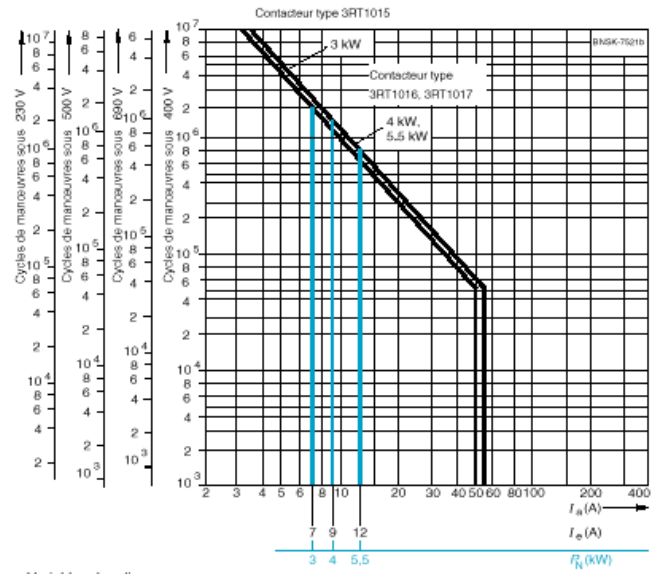
L'endurance mécanique d'un contacteur est le nombre moyen (exprimé en million) de cycles de manœuvres à vide qu'il est susceptible d'effectuer sans défaillance mécanique.

L'endurance électrique par contre est le nombre moyen (exprimé en million) de cycles de manœuvres en charge qu'il est susceptible d'effectuer sans entretien.

On parle aussi de durée de vie électrique. Celle-ci est donnée en fonction de la catégorie d'emploi et de la tension Ue pour un courant coupé comme dans l'exemple ci-contre (contacteur 3RT1015 Siemens).

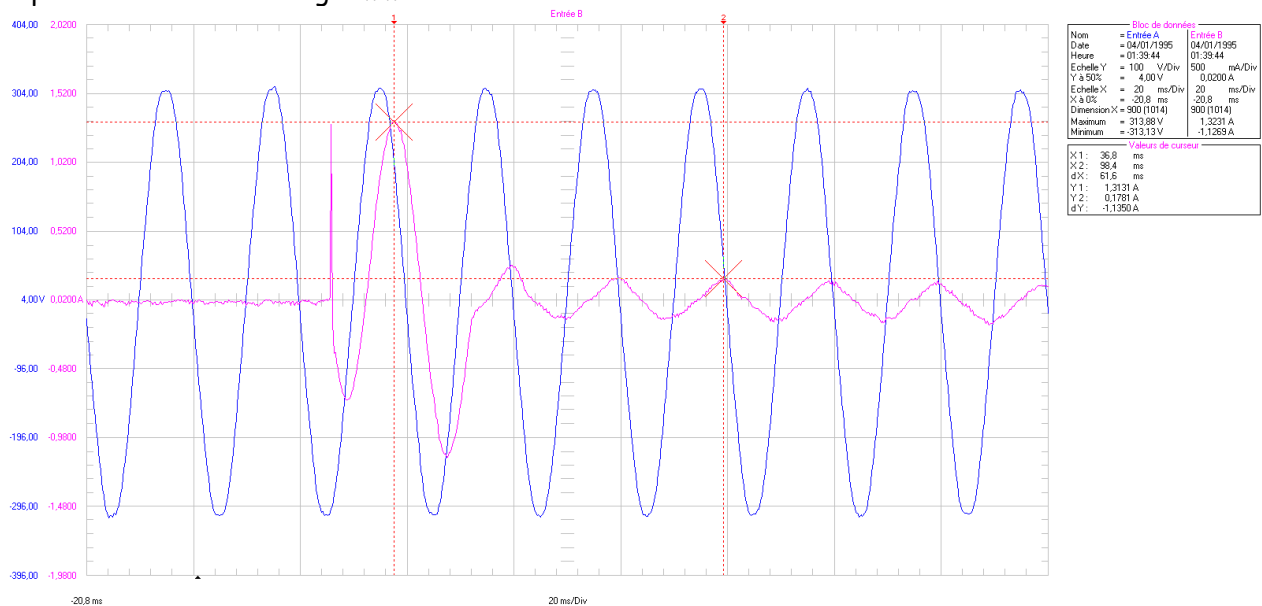
On peut remarquer que la durée de vie est fonction du courant coupé.

Elle vaut 2 millions de cycles de manoeuvres pour 7 A et décroît jusqu'à 500 000 cycles de manoeuvres pour 50 ampères.



2.2.4 Comportement de la bobine.

La bobine est un circuit inductif qui présente un fort appel de courant (à surligner en jaune) à la mise sous tension comme on peut le voir sur l'oscillogramme relevé lors d'une séance d'essais :



Ceci correspond aux caractéristiques de puissance annoncées par le constructeur :

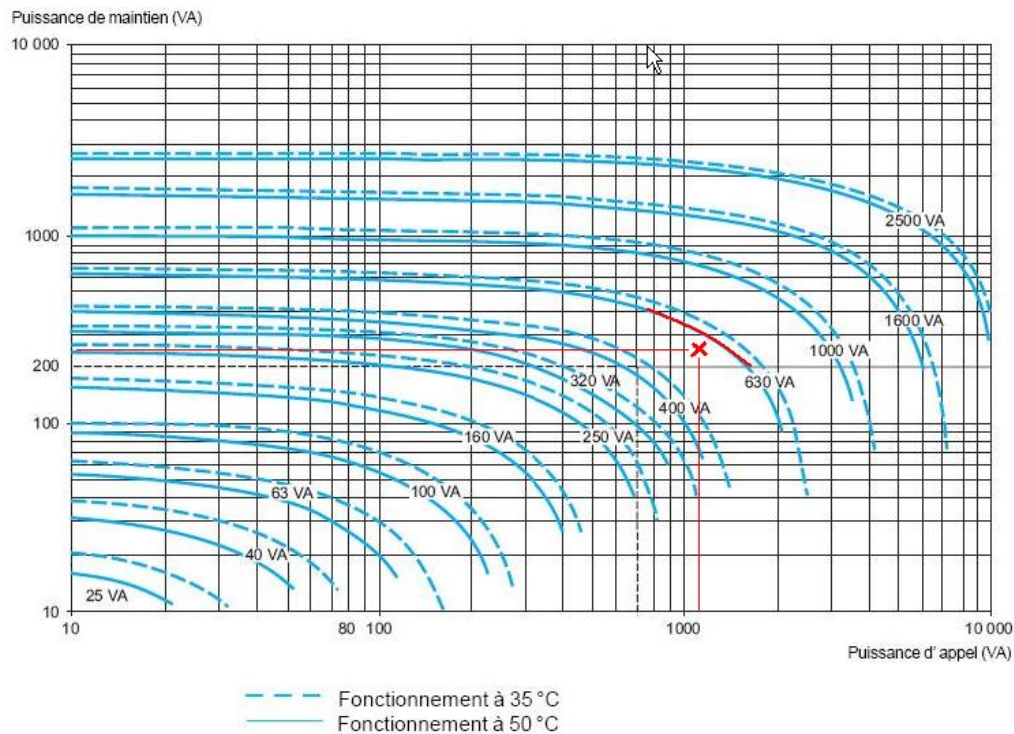
Caractéristiques du circuit de commande en courant alternatif				
Tension assignée du circuit de commande (U_c)	50/60 Hz	V	12...690	
Limites de la tension de commande				
Bobines 50 ou 60 Hz	De fonctionnement		–	
	De retombée		–	
Bobines 50/60 Hz	De fonctionnement		0,8...1,1 U_c en 50 Hz et 0,85...1,1 U_c en 60 Hz à 60 °C	
	De retombée		0,3...0,6 U_c à 60 °C	
Consommation moyenne à 20 °C et à U_c	~ 50 Hz Appel	Bobine 50 Hz	VA	
		Cos ϕ	0,75	
	Maintien	Bobine 50/60 Hz	VA	70
		Cos ϕ	0,3	
	~ 60 Hz Appel	Bobine 60 Hz	VA	7
		Cos ϕ	0,75	
	Maintien	Bobine 50/60 Hz	VA	70
		Cos ϕ	0,3	
	Bobine 60 Hz	VA	–	
		Cos ϕ	0,3	
	Bobine 50/60 Hz	VA	7,5	

Doc Schneider

Il est aisé de comprendre pourquoi la puissance d'appel doit être prise en compte dans le dimensionnement d'un transformateur alimentant un circuit de commande : celui-ci doit fournir la puissance de maintien en permanence et la puissance d'appel de temps en temps !!

Le constructeur Legrand, pour évaluer la taille d'un transformateur, utilise la formule suivante : $P_{appel} = 0,8 \times [P_{amax} + \Sigma(P_m + P_v)]$ puis il fournit des tableau de choix : $S=f(P_{appel})$.

Le constructeur Schneider, pour évaluer la taille d'un transformateur, utilise la puissance de maintien totale et la puissance d'appel max puis il utilise des courbes $P_m=f(P_a)$ ci-dessous :



Dans cet exemple, pour une puissance d'appel de 1100 VA et une puissance de maintien de 260 VA, le constructeur préconise un transformateur de puissance apparente $S=630$ VA.

2.2.5 Désignation complète.

Le problème de la désignation d'un contacteur est capital car cette désignation synthétise l'ensemble des fonctionnalités que doit avoir le produit choisi. La désignation doit donc caractériser la taille du contacteur, mais aussi sa commande (valeur et type) et les dispositifs auxiliaires. Chaque constructeur ayant ses propres codes, l'exemple qui suit n'est donné qu'à titre indicatif.

LC1-D	contacteur tripolaire avec la commande en alternatif,
32	courant assigné d'emploi maximal en catégorie AC3 : 32 A,
0	nombre de contact auxiliaire normalement ouvert : 0,
1	nombre de contact auxiliaire normalement fermé : 1,
M	valeur efficace de la tension de commande : 220 V,
7	valeur de la fréquence de la tension de commande : 50/60 Hz.

Cet exemple montre bien le soin particulier qu'il faut apporter à la désignation d'un composant, après son choix lors de sa commande ! Un B au lieu du M signifiant 24 V, la bobine serait détruite à la première mise sous tension quelles que soient les précautions de câblage ou d'essai.

2.3 Le contacteur auxiliaire.

On appelle **contacteur auxiliaire**, ou simplement relais, un contacteur destiné à alimenter des circuits inductifs de faible puissance comme les bobines de contacteurs ou de relais. Ils servent généralement à multiplier une information pour la reporter à plusieurs endroits d'un schéma (isolation galvanique).

De fait, ils servent dans les circuits de commande pour matérialiser des équations logiques simples.

Leur choix s'effectue donc essentiellement en fonction du nombre et du type de contacts voulus.

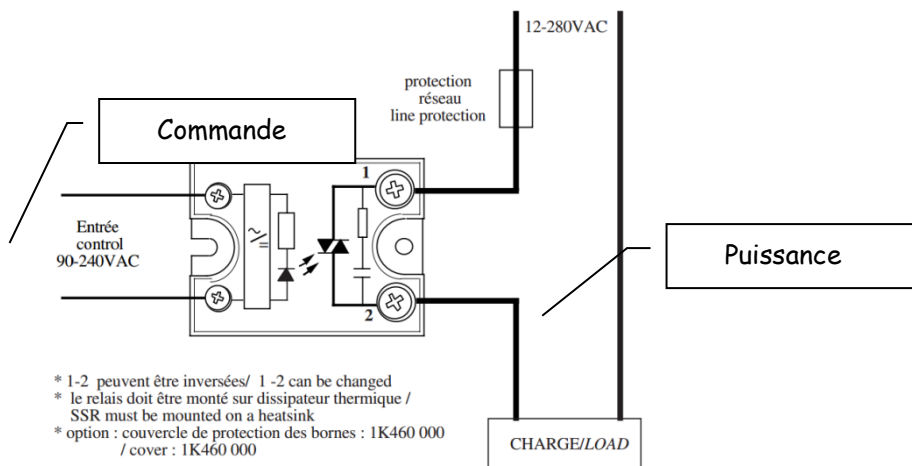
2.4 Le relais statique.

2.4.1 Description.

Les relais statiques utilisent la capacité de commutation des semi-conducteurs pour réaliser la fonction établir/interrompre un courant électrique.

Comme il n'y a pas de commutation mécanique, leur durée de vie est beaucoup plus grande que celle des contacteurs et ils sont silencieux !

2.4.2 Raccordement.



Le raccordement est similaire à celui d'un contacteur classique avec les notions de commande et puissance. L'élément central est un opto-coupleur qui assure l'isolation galvanique par la conversion élec/lumière/elec.

2.4.3 Caractéristiques générales.

commande TOR et isolation galvanique comme les contacteurs,
 fréquence de commutation élevée jusqu'à 50 Hz (au lieu de 1 Hz),
 nombre de cycle de manœuvres quasiment illimité (au lieu de 10 à 30 millions de cycles),
 absence de parasites liés à l'ouverture d'une bobine,
 puissance de commande réduite environ 1 VA (au lieu de 70 en puissance d'appel),
 possibilité de fonctionnement synchrone,
 courant d'emploi limité environ 100 A (contrairement aux contacteurs 1600 A),

fragilité accrue par rapport aux contacteurs : dv/dt par exemple.

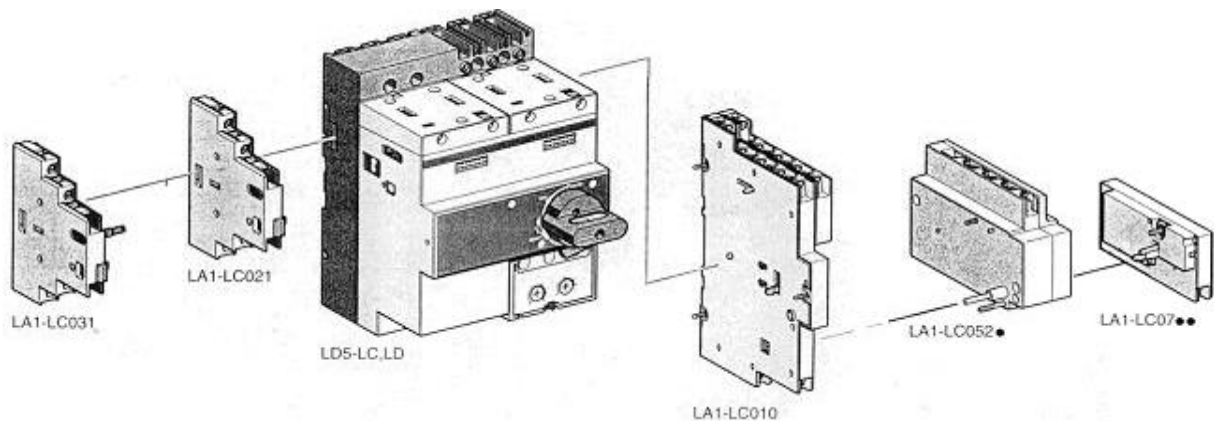
Leur utilisation est généralisée pour la commande de résistances dans le but de réguler une température.

Elle se développe aussi pour la commande de petits moteurs asynchrones (commande au zéro de la tension pour diminuer la pointe d'intensité au démarrage).

2.5 Commande fonctionnelle intégrée.

2.5.1 Départ moteur intégré.

Un départ moteur de ce type sera étudié en TP, seul un synoptique vous est fourni ...

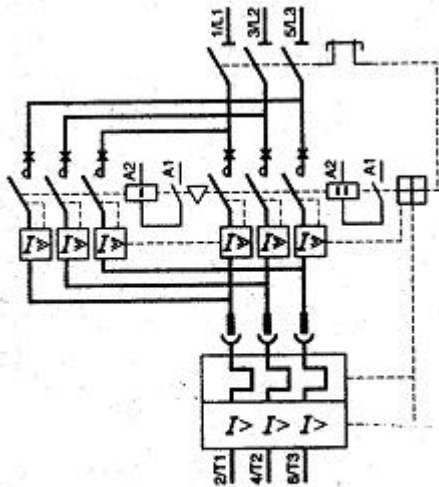


Contacteurs-disjoncteurs-inverseurs integral 32

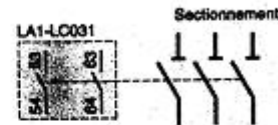
Pour contacteurs-disjoncteurs inverseurs LD5

LD5-LC 130

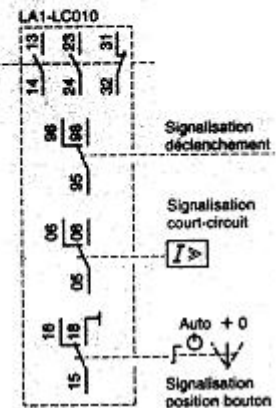
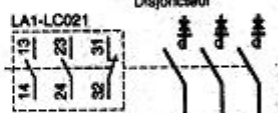
Montage à gauche



avec module de protection LB1-LC03M

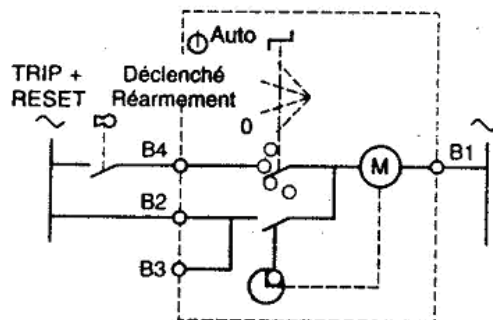
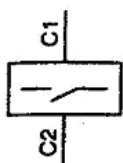


Montage à droite



Dispositifs de déclenchement LA1-LC071

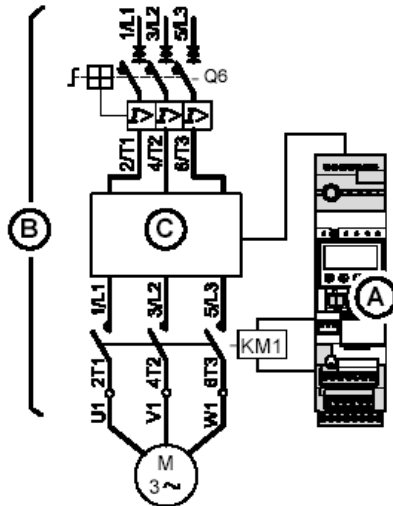
Dispositifs de réarmement électrique à distance LA1-LC052



Les symboles ci-dessus montrent les différents modules qu'il est possible d'associer à un disjoncteur-contacteur-inverseur de type Intégral 32 à savoir :

- des contacts auxiliaires (droite et gauche, signalisation et protection),
- un module de déclenchement à distance (type MX)
- et un module de ré armement motorisé ...

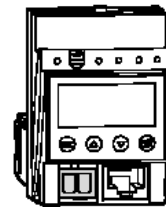
2.5.2 Contrôleur communicant.



Le départ moteur regroupe les fonctions classiques annoncées : sectionnement et protections contre les courts-circuits au niveau de Q6, commutation à l'aide de KM1.

L'intelligence réside dans l'unité de contrôle A et les capteurs de courant C.

Un module communication peut être rajouté pour connecter ce départ sur un réseau.



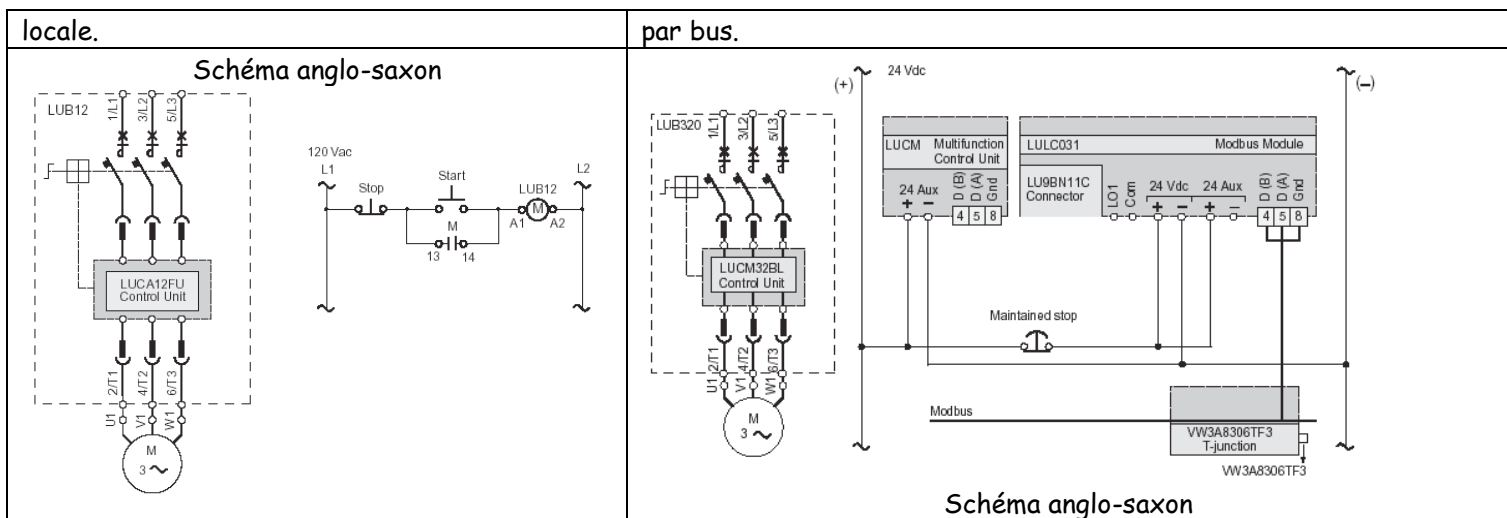
2.5.3 Données de communication ...

Les informations de protection et de contrôle disponibles dépendent de l'unité de contrôle à laquelle le module de communication est associé. Les informations traitées sont échangées par une liaison série.

Commandes de marche et d'arrêt ; Etats (prêt, en marche, défaut) ; Réarmement automatique et à distance par le bus ; Différenciation des défauts ;

Alarme ; Indication de la charge moteur ; Paramétrage et consultation à distance de toutes les fonctions ; Fonction "historique" ; Fonction "surveillance" ...

2.5.4 Commande.



Conversion de l'énergie électrique



(Notes)

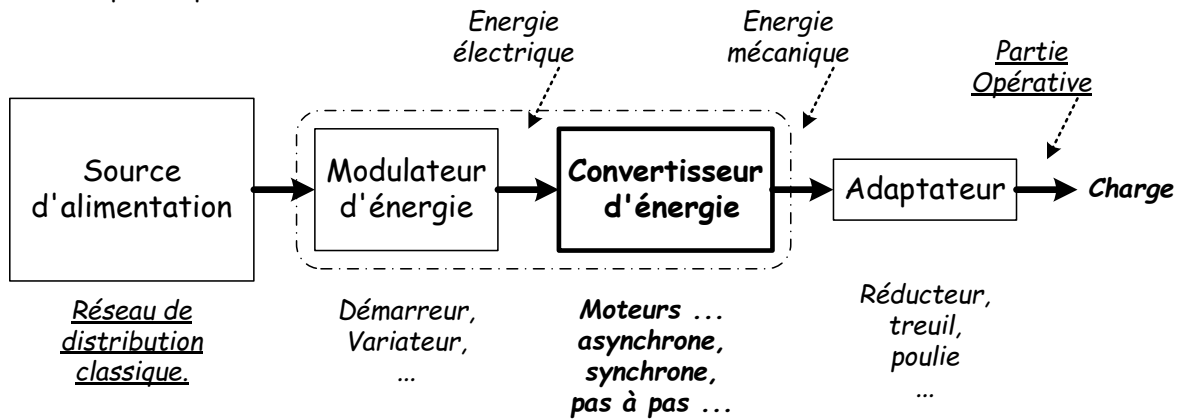
Ce document vient en complément des cours de Sciences Appliquées et des essais de systèmes ...

1 L'entraînement électrique.

1.1 Mise en situation.

Une chaîne cinématique modélise de manière claire les dispositifs concourant aux mouvements d'une partie opérative. Elle définit les relations qui en lient les variables.

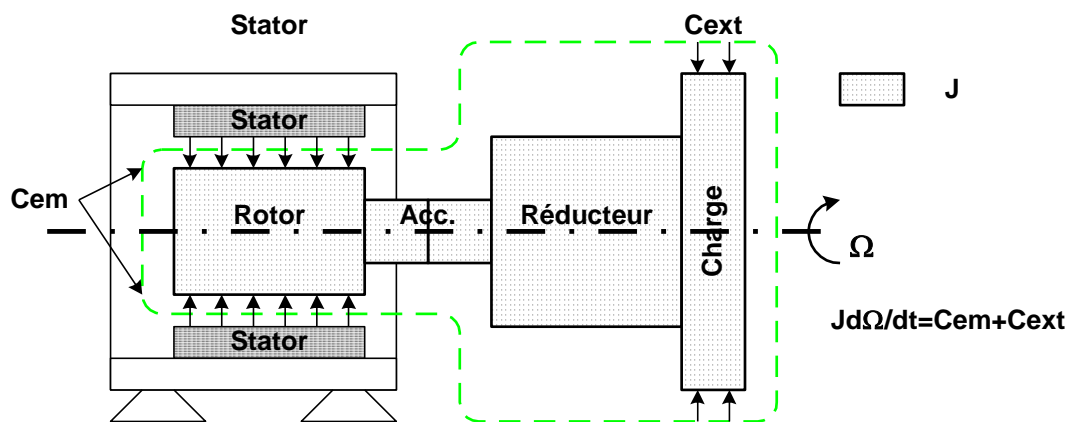
La structure la plus répandue est la suivante :



Il devient de moins en moins possible de dissocier l'étude, le choix et la mise en œuvre du modulateur et du convertisseur. En gros : moteur et variateur c'est du pareil au même !

2 Définitions mécaniques.

2.1 Efforts.



Le **couple** est la grandeur qui pour un mouvement de **rotation** est analogue à la **force** pour un mouvement de **translation** et analogue au courant en électricité.

Pour le système isolé ci-dessus, deux couples s'appliquent :

Le couple électro-magnétique du stator sur le rotor : C_{em} ,
 Le couple des autres efforts extérieurs¹ sur le système : C_{ext} .

C_{ext} peut être **résistant** ou **entraînant** en fonction du type de récepteur mécanique.

On distingue 4 lois de couple fonction de la vitesse² :

constant : $C_{ext} = k$, levage, convoyeur, broyeur...
 quadratique : $C_{ext} = k \cdot \Omega^2$, ventilation, pompage,

¹ souvent appelé de manière impropre « charge »

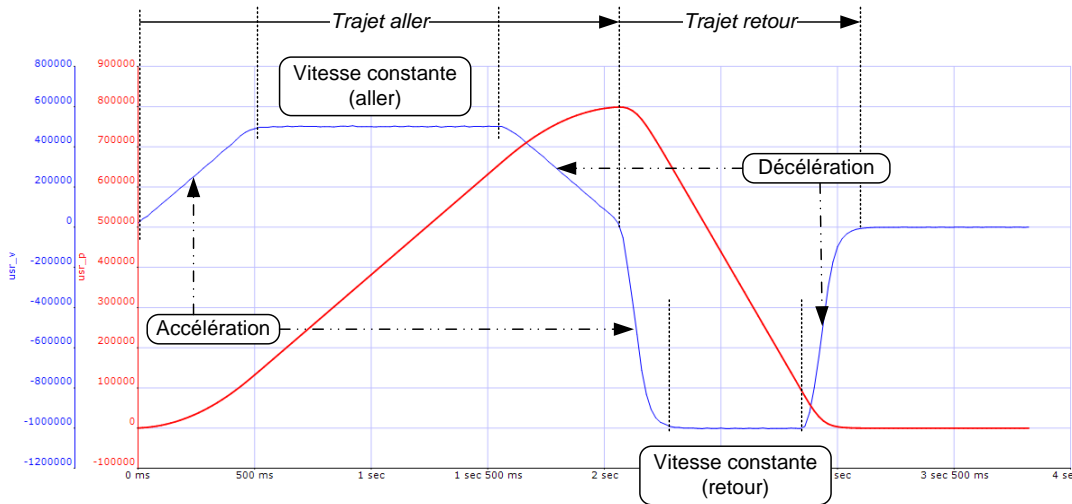
² En fonctionnement nominal généralement $\Omega = Cte$, $C_{em} = -C_{ext}$.

(conséquence directe du PFD voir plus loin)

linéaire : $C_{ext} = k \cdot \Omega$, pompe volumétrique (rare),
 hyperbolique : $C_{ext} = k / \Omega$, enrôleurs, machines outils ...

2.2 Phases d'un mouvement.

2.2.1 Profil de vitesse.



Matériel :

Lexium 32
Servo BHM

Trajet :

Aller
Retour
Pause

Légende :

Rouge : Position
Bleu : Vitesse

On distingue généralement trois types de fonctionnement, à savoir :

- le démarrage ou mise en mouvement ou accélération, passage de 0 à la vitesse nominale,
- le régime établi ou fonctionnement à vitesse constante,
- enfin l'arrêt ou décélération, passage de la vitesse constante à la vitesse nulle (voir ci-dessus).

2.2.2 Précision sur l'arrêt.

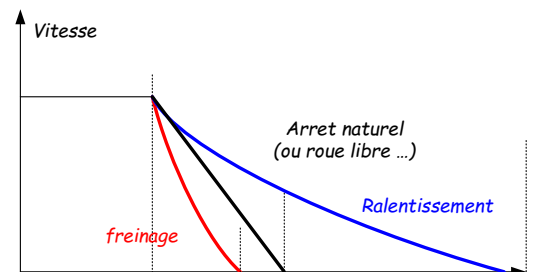
On distingue deux types d'arrêt autres que l'arrêt en « roue libre » :

Le ralentissement :

C'est un arrêt dans un temps supérieur au temps naturel,

Le freinage :

C'est un arrêt dans un temps inférieur au temps naturel.



2.3 Puissances mises en jeu.

2.3.1 Aspect mécanique.

$P = F \cdot v$ en $N \cdot m \cdot s^{-1}$ pour un mouvement de translation³ classique avec F et v //. Les unités sont à connaître.
Avec un effort F se déplaçant à une vitesse v.

$P = C \cdot \Omega$ ou $P = T \cdot \Omega$ en $(N \cdot m) \cdot (rad \cdot s^{-1})$ pour un mouvement de rotation classique⁴.

Avec un couple C et une vitesse de rotation Ω .

Dans le cas d'un système type levage, le moment de la pesanteur est négatif : il tire la charge vers le bas tandis que le moment du moteur est positif (quel que soit le sens de rotation) : il tire vers le haut.

2.3.2 Aspect électrique.

en continu classique : $P = V \cdot I$, V et I sont les valeurs moyennes de la tension et du courant.

en monophasé : $P = V \cdot I \cdot \cos(\phi)$ il s'agit alors des valeurs efficaces du courant et de la tension (en sinusoïdal).

en triphasé : $P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\phi) = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\phi)$ (valeurs efficaces des courants en lignes et tensions entre phases).

En présence de signaux non sinusoïdaux il faut revoir les formules ci-dessus.

2.3.3 Conventions.

³ Rappel : $v = r \cdot \omega$ avec r le rayon qui porte le vecteur v.

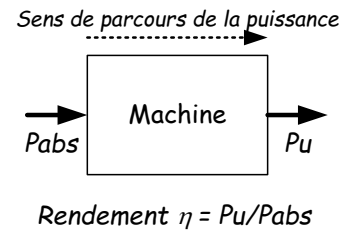
⁴ Rappel : $C = F \cdot r$ avec r le rayon qui porte le vecteur F.

On définit le rendement : $\eta = P(\text{sortie})/P(\text{entrée}) \times 1$ sans unité (ou en pourcentage).

Les fonctionnements récepteur (ou moteur) et générateur sont définis par le signe de la puissance absorbée par l'élément concerné :

Un moteur électrique fonctionne en récepteur si :
 $P_{elec} > P_{méca}$

Il fonctionne en générateur si :
 $P_{elec} < P_{méca}$



Rappel : $P = W/t$ avec W l'énergie exprimée en Joules.

2.4 Aspects dynamiques.

A revoir en Sciences Appliquées !!

En régime dynamique, l'étude des couples devient plus complexe et dépend généralement de l'inertie J du système ainsi que de la variation de la vitesse.

Le principe fondamental de la dynamique énonce que :

$$J \cdot d\Omega/dt = \Sigma C = C_{em} + C_{ext}$$

Avec : J le moment d'inertie de l'ensemble isolé (rotor+ charge) sur l'axe moteur,
 C_{em} le moment du couple du stator sur « le rotor + la charge »,
 C_{ext} le moment du couple exercé par l'extérieur sur « le rotor + la charge ».

en zone d'accélération,
 en zone de ralentissement naturel,
 en zone de freinage⁵,

$$J \cdot d\Omega/dt = C_{em} - C_{ext},$$

$C_{em} = 0$ donc $J \cdot d\Omega/dt = C_{ext}$ (< 0 si le couple est résistant),
 $C_{em} = C_f$ donc $J \cdot d\Omega/dt = C_f + C_{ext}$.

3 Transferts d'énergie.

3.1 Quadrants de fonctionnement.

3.1.1 Quadrants mécaniques.

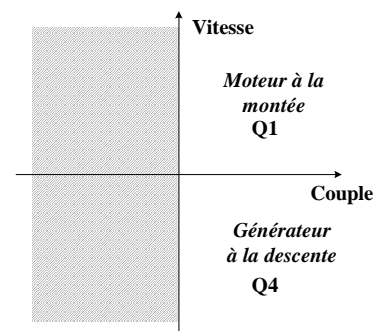
Ces quadrants sont donnés pour n'importe quel récepteur mécanique, on remarquera que le fonctionnement est moteur pour $P = C \cdot \Omega > 0$ et générateur sinon.

Exemple n°1 :

Levage en fonctionnement nominal.

Le couple est constant et positif donc les quadrants sont forcément 1 ou 4, comme la vitesse peut changer de signe les quadrants sont 1 et 4.

Autrement dit, le système fonctionne en moteur à la montée et en générateur à la descente lorsque la masse entraîne l'ensemble.



Attention, dans le cas de la descente, c'est-à-dire en fonctionnement générateur, l'énergie provient de la masse en mouvement, elle traverse le moteur du rotor au stator ...

Le rendement du moteur est alors défini par :

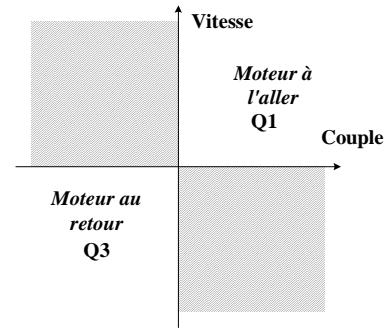
$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{méca}} < 1$$

⁵ le moteur fournit le couple de freinage.

Exemple n°2 :

Portail en fonctionnement nominal.

Le couple est constamment résistant donc opposé à la vitesse (fonctionnement moteur), comme la vitesse peut changer de signe les quadrants sont 1 et 3. Dans ce cas on doit fournir de l'énergie au système à l'ouverture comme à la fermeture pour pouvoir déplacer la porte.



3.1.2 Quadrants électriques.

Voir le cours de SPC.

3.2 Parcours de l'énergie.

3.2.1 Chaîne directe.

On appelle **chaîne directe de transfert de l'énergie** le parcours que suit l'énergie généralement prélevée au réseau de distribution pour agir sur la matière d'œuvre.

3.2.2 Chaîne inverse.

On appelle **chaîne inverse de transfert de l'énergie** le parcours inverse que suit l'énergie lorsqu'elle est produite par le récepteur et remonte en direction du réseau.

- Celle-ci peut être soit :
- renvoyée au réseau,
 - stockée dans des accumulateurs (batteries),
 - dissipée sous forme de chaleur pour accélérer son évacuation.

3.2.3 Exemples.

Chaînes irréversibles : élec / lum, élec / chaleur.

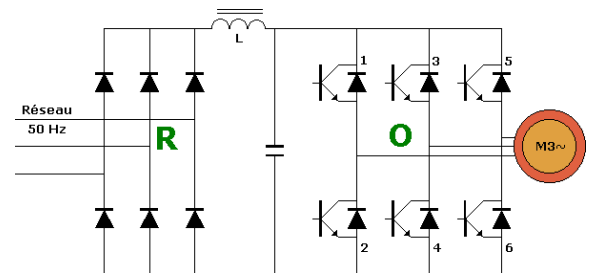
Dans ces deux cas, lampes ou résistances, les récepteurs sont généralement irréversibles ce qui empêche le renvoi de l'énergie vers la source, seule la chaîne directe est concernée.

Chaînes réversibles : élec / élec / méca.

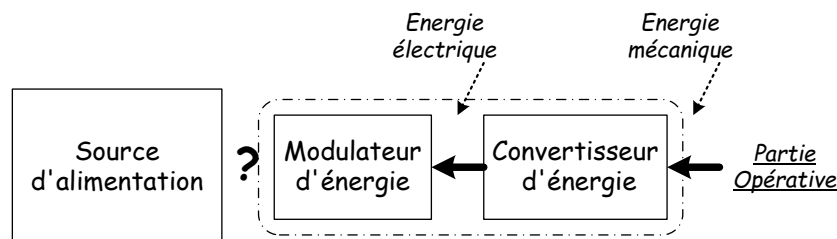
Tous les moteurs sont bien entendu réversibles et donc susceptibles de fonctionner en générateurs en renvoyant de l'énergie à leur source d'alimentation.

Quand ils sont alimentés par un variateur, les moteurs synchrones et asynchrones renvoient l'énergie vers un variateur. Ce variateur est constitué en entrée par un pont de diodes qui est par nature irréversible (le courant ne peut pas « remonter » dans une diode) ...

Il faut donc trouver une solution pour évacuer l'énergie !
(voir le chapitre 33).



Pour que la chaîne soit totalement réversible il suffit alors que les convertisseurs élec/élec soient aussi réversibles.



4 Choix (ou justification) d'une motorisation.

4.1 Principes généraux.

Voir le cours de physique appliquée.

4.1.1 Aide au choix.

Type de moteur	Asynchrone monophasé	Asynchrone triphasé	Synchrone	Pas à pas
Démarrage direct	Oui		Non	
Variation de vitesse	Rare	Facile	Toujours	
Performances	Très faibles	Elevées	Très élevées	Elevées
Puissance	*	***	**	*
Couple/Vitesse	*/*	***/*	***/* ou */***	*/**
Utilisations	P faibles V=Cte	Universelles V=Cte ou non	Machines outils, robotique Besoin dynamique	Positionnement, robotique V variable

4.1.2 Efficacité énergétique.

Sur une « vie », le coût d'achat d'un moteur ne représente que 2,5 % de son coût total, 96 % sont liés à l'énergie consommée ...

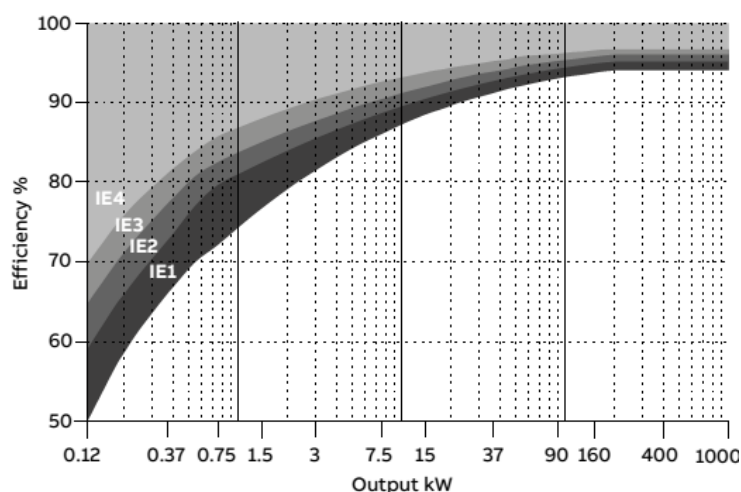
Le rendement est donc un paramètre essentiel à prendre en compte dans le choix d'un moteur.

La norme CEI 60034-30-1 définit 4 classes d'efficacité EI1 à EI4 qui limitent les rendements minimaux des moteurs électriques.

L'Union Européenne impose l'obligation suivante :

IE2 pour tous les moteurs (2011).

IE3 dès que $P > 7,5$ kW (2017)



5 Choix électriques.

5.1 Principes.

Quelle que soit la motorisation choisie, le principe du choix s'articulera autour de deux valeurs nominales déterminées en **fonctionnement statique**, c'est-à-dire à **vitesse nulle ou constante** :

La vitesse à obtenir,

La puissance **mécanique** à fournir⁶.

Mais il faut, de plus, prendre en compte les conditions de **fonctionnement dynamiques** à savoir :

accélération et temps de démarrage d'une part,

décélération et freinage d'autre part.

On parle de vérifications dynamiques.

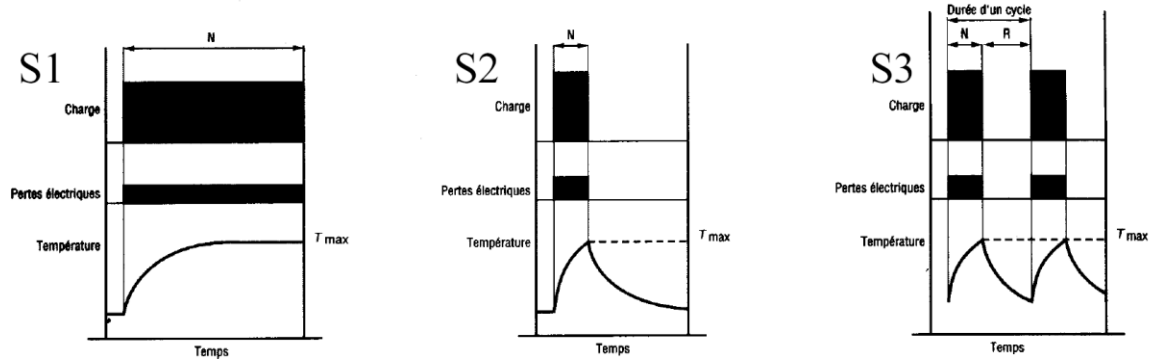
⁶ Ou le couple qu'on déduit de la formule classique $P=C.\Omega$.

5.1.1 Conditions d'exploitations : Services.

Sauf cas particuliers, les constructeurs conçoivent un moteur pour un régime de fonctionnement permettant à la machine de se stabiliser autour de son équilibre thermique pour la puissance nominale. Ce régime est appelé **Service type S1**, il s'agit d'un **service continu**.

Le temps de fonctionnement est au moins égal à 10 mn et il y a au plus 6 démarrages par heure.

Les conditions d'exploitation n'étant pas toujours aussi simples, la norme a défini d'autres services-types dits intermittents, dont les chronogrammes sont donnés ci-après :



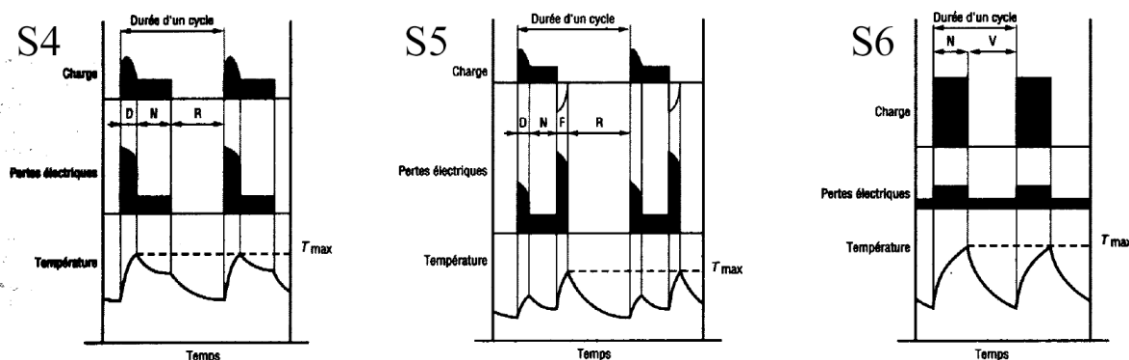
a) **Service continu - Service type S1** : Fonctionnement à charge constante nominale d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint. Fdm (facteur de marche) = 1 et n (nombre de démarrages équivalent par heure) <= 6.

b) **Service temporaire - Service type S2** : Fonctionnement à charge constante nominale pendant un temps déterminé N, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir à 2° C près l'égalité de température entre la machine et le fluide de refroidissement. Fdm selon cahier des charges et n = 1.

	Temps de marche par période de 90 min			
	10 min	30 min	60 min	90 min
Facteur de correction	1,6	1,3	1,1	1

c) **Service Intermittent périodique - Service type S3** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R. Dans ce service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de façon significative. Fdm = N/N+R et n = 0.

	Facteur de marche N/N+R			
	15 %	25 %	40 %	60 %
Facteur de correction	1,6	1,4	1,2	1



d) **Service intermittent périodique à démarrage - Service type S4** : Suite de cycles de service identiques comprenant une période appréciable de démarrage D, une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R. Fdm = N+D/N+D+R et n selon cahier des charges, remplacer n par 4n dans la formule.

e) **Service intermittent périodique à freinage électrique - Service type S5** : Suite de cycles de service périodiques comprenant chacun une période de démarrage D, une période de fonctionnement à charge constante nominale N, une période de freinage électrique rapide F et une période de repos R. Fdm = N+D+F/N+D+F+R et n selon cahier des charges, remplacer n par 4n dans la formule.

f) **Service ininterrompu périodique à charge intermittente - Service type S6** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de fonctionnement à vide V . Il n'existe pas de période de repos. $Fdm = N/N+V$ et $n = 0$. Calcul de P pour régime intermittent.

	Facteur de marche $N/N+V$			
	15 %	25 %	40 %	60 %
Facteur de correction	1,6	1,4	1,3	1,2

Selon les services, on peut alors déterminer une **puissance dimensionnante** P_d calculée à partir de formules simple :

$$P_d = P_u \cdot \sqrt{Fdm}$$

ou plus complexes ...

$$P_d = \sqrt{\frac{n \cdot t_d \cdot (P_u \cdot (I_d / I_n))^2 + (3600 - n \cdot t_d) \cdot P_u^2 \cdot Fdm}{3600}}$$

5.1.2 Couple équivalent thermique.

Une autre méthode, équivalente à celle ci-dessus consiste à calculer le couple constant qui procurerait le même échauffement que le service intermittent constitué de successions de couple C_i de durée t_i .

C'est ce couple équivalent qui sert alors à choisir un moteur.

$$C_{méq} = \sqrt{\frac{C_1^2 \cdot t_1 + C_2^2 \cdot t_2 + \dots + C_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

5.1.3 Conditions d'environnement : Facteur de correction.

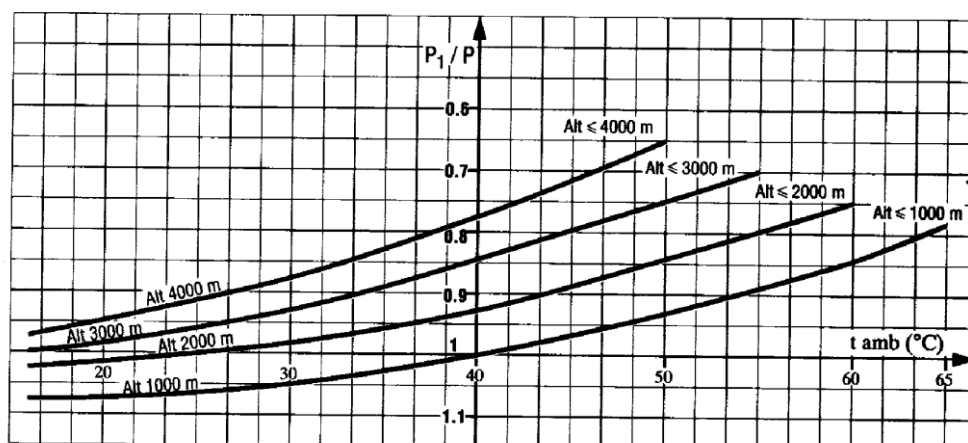
Un moteur s'échauffe en fonctionnement normal. Il est conçu pour un échauffement nominal⁷.

Si la température ambiante est plus élevée, l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur sera plus difficile, il faudra donc sur-dimensionner le moteur pour qu'il fonctionne correctement. Inversement, une température faible : $< 40^\circ\text{C}$ permet de sous-dimensionner le moteur. Cela amène à appliquer des coefficients correcteurs à la puissance théorique calculée, voir ci-dessous.

Remarque : l'altitude aussi a une influence sur l'échauffement du moteur.

Attention à bien réfléchir pour déterminer quelle est la puissance théorique calculée et quelle est la puissance équivalente ...

▼ Coefficients de correction en fonction de l'altitude et de la température ambiante.



Déterminer la puissance de choix d'un moteur qui doit fournir 15 kW :

- à 50°C à Marseille,
- à 30°C à Villard de Lans,
- à 50°C à Villard de Lans.

⁷ c'est-à-dire pour atteindre une température nominale quand il est utilisé à une température ambiante de 40°C

Les courbes ci-dessus sont parfois remplacées par les relations suivantes :

Aucun problème pour $\theta_a \leq 40$ °C. Au dessus, déclasser de 1 % par °C.

Aucun problème si l'altitude est inférieure à 1000 m, au-dessus :

déclasser de 0,6 % par tranche de 100 m ou

abaisser la température ambiante de 0,8 °C par tranche de 100 m.

5.2 Démarrage.

5.2.1 Principe.

Un moteur doit vaincre pendant la phase d'accélération (ou de mise en mouvement) le couple résistant auquel s'ajoute le couple nécessaire pour vaincre l'inertie du système entraîné :

$$C_{em} = -C_{ext} + J \cdot d\Omega/dt. \quad (C_{ext} \text{ est généralement } < 0)$$

En simplifiant, on pose souvent que :

$$C_a = J \cdot \Omega / td$$

Avec C_a le couple moteur **moyen pendant le démarrage** diminué du couple résistant,
 J l'inertie totale de l'ensemble ramenée sur l'axe moteur,
 Ω la vitesse nominale du moteur,
 Td le temps de démarrage.

5.2.2 Evaluation de C_a .

En se reportant à la courbe de couple du moteur on peut calculer C_a en fonction des grandeurs ci-dessus :

$$C_a = \frac{C_d + 2 \cdot C_m + 2 \cdot C_M + C_n}{6} - C_{ext} \quad \text{avec :}$$

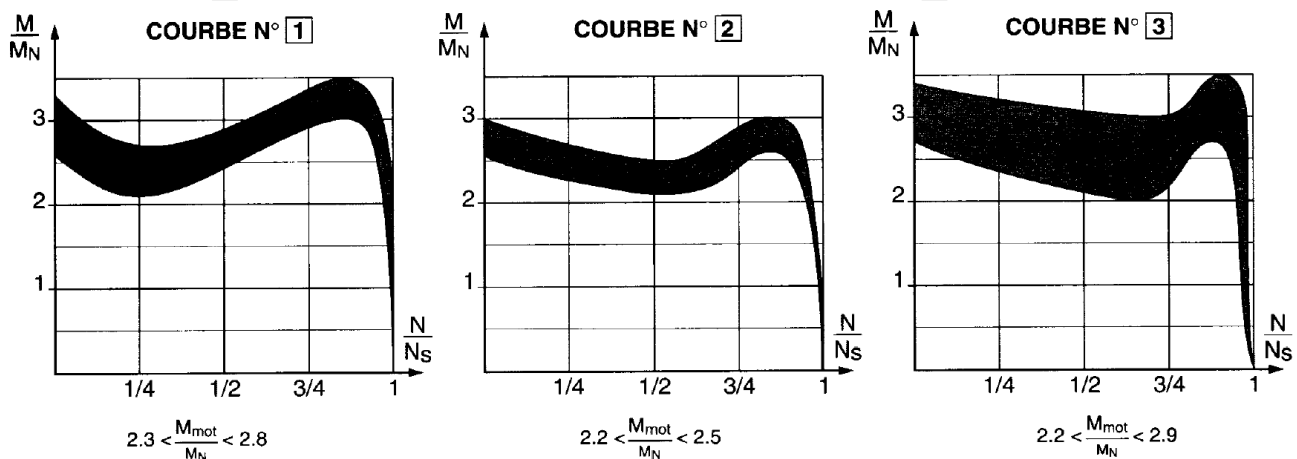
C_d : couple de démarrage

C_m : couple d'accrochage (ou minimal)

C_n : couple nominal.

C_M : couple maximal (ou de décrochage)

Exemples de courbes de couples :



On peut alors soit faire le calcul en faisant attention aux unités utilisées ...
 soit opter pour une détermination graphique comme vu précédemment.

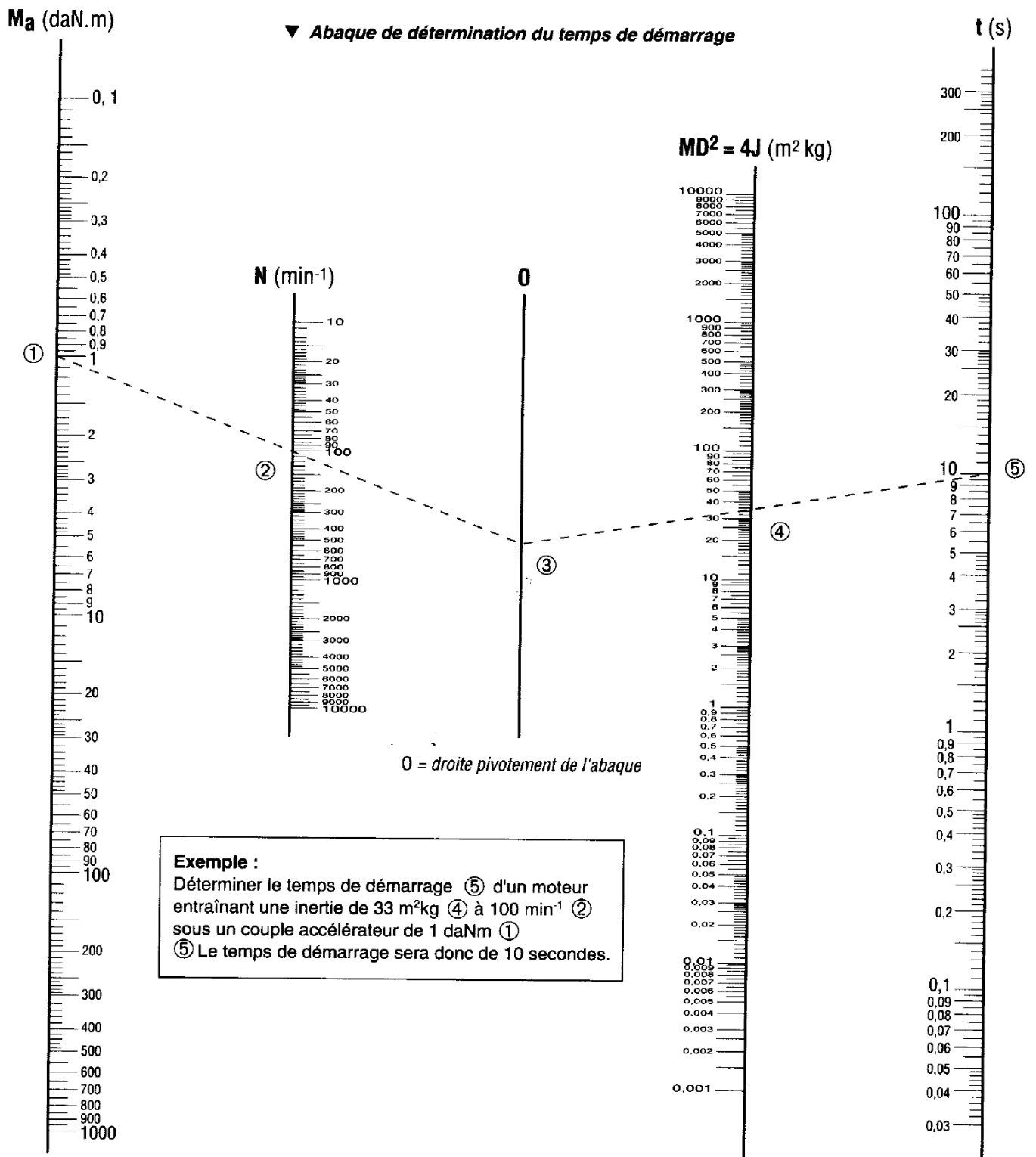
Deux problèmes peuvent alors se poser à l'électrotechnicien :

- (1) **Combien de temps (td)** le moteur mettra-t-il pour atteindre sa **vitesse nominale (Ω)** ?
- (2) Le moteur peut-il fournir **le couple suffisant** pour assurer un **temps d'accélération (td)** donné ?

L'un des moyens classiques de répondre à ces deux problèmes si on connaît trois valeurs sur les quatre consiste à utiliser l'abaque en annexe.

6 Annexes.

6.1 Temps de démarrage.



Encore faut-il pouvoir évaluer Ma ... (voir plus loin)

(Notes)

Variateurs de vitesse



(Notes)

1 Présentation.

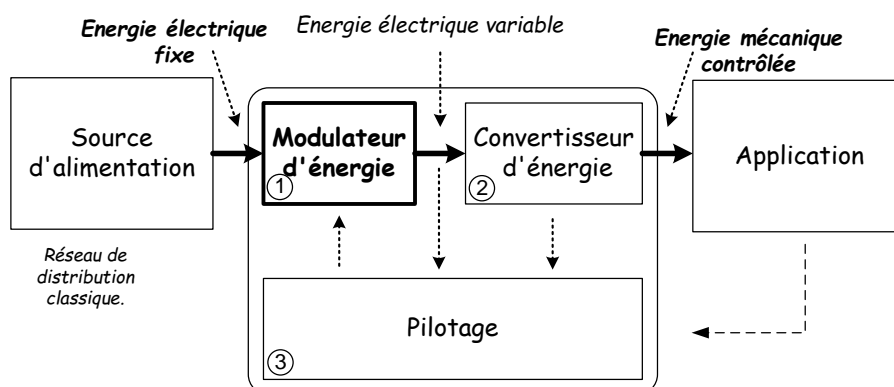
1.1 Avertissement ...

Ce n'est pas dans ce document que vous trouverez les principes de fonctionnement « physiques » des démarreurs ou variateurs de vitesse ... Le cours de sciences appliquées est à votre disposition pour vous les expliquer en détails comment moduler l'énergie en vue d'obtenir un fonctionnement voulu.

Argumenter⁴ une solution de modulation
Dimensionner et choisir⁴ des modulateurs
Adapter⁴ les paramétrages des dispositifs de modulation
Concevoir/adapter⁴ des schémas électriques de raccordement des dispositifs de modulation

1.2 Précisions.

A l'heure actuelle (années 2010/20), les trois fonctions : modulation, conversion et pilotage ne sont pas forcément séparées.



On peut trouver des associations :
 - motovariateur (1+2) avec automate (3),
 - variateur séquentiel (1+3) avec moteur (2),

Ces associations sont des rapprochements afin de limiter les longueurs de câbles de puissance ou des intégrations qui les éliminent !

1.3 Principe.

«Comment faire son choix ? Un seul mot d'ordre : se poser la question de son application.

Ai-je besoin de réguler la vitesse de mon moteur, ou de contrôler le mouvement et le positionnement de mes pièces avec précision ? Voici la question à se poser pour faire le choix de la bonne technologie.

Dans le premier cas [non], des variateurs "standards" peu coûteux feront l'affaire.

Dans le second [oui], un variateur doté de fonctions élaborées pourrait être indiqué. »¹

2 Choix.

2.1 Choix par rapport au moteur.

2.1.1 Moteur asynchrone.

Association classique, interchangeabilité des composants !

2.1.2 Moteur brushless.

Nécessité d'adaptation au moteur et au codeur ou résolveur ...

2.1.3 Moteur pas à pas.

Variateur spécifique.

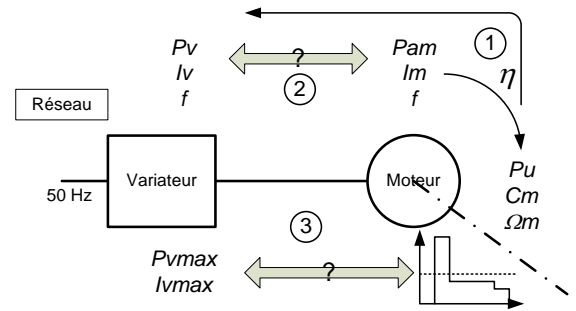
¹ Extrait de « MESURES 809- NOVEMBRE 2008 - www.mesures.com »

2.1.4 Paramètres de choix.

Etape 1 : un variateur se choisit en fonction de la puissance indiquée sur la plaque du moteur, donc sans tenir compte du rendement réel du moteur.

Etape 2 : il faut ensuite vérifier qu'il peut fournir le courant nécessaire au moteur : $I_v < I_m$.

Etape 3 : enfin, il faut prendre en compte le régime dynamique de la machine et vérifier si le variateur peut supporter les phases maximales : $I_{vmax} < I_{max}$.



Pour un moteur marqué 3 kW on choisit le 1 qui a un courant nominal $I_n=7,8$ A.

Si le rendement est de $\eta=65\%$ et que $\cos(\phi)=0,65$, il absorbe $I_m=9,6$ A il faut faire le choix 2

avec $I_v=10,5 > 9,6$ A.

Si pendant l'accélération $I_{ma}=15$ A pour pouvoir démarrer il faut faire le choix 3

avec $I_{vmax}=17,7 > 15$ A ...

Exemple ATV :

Moteur (1)	Réseau		Altivar 5SE		Courant nominal (2)	Courant transitoire maxi (4)	Puissance dissipée à la charge nominale (5)	Référence	
Puissance indiquée sur plaque (3)	Courant de ligne (2)		Icc ligne présumé maxi						
kW	HP	A	A	kA	kA	A	A	W	
0,75	1	3,4	2,6	5	5	2,3	3,1	55	ATV-58FHU18N4
1,5	2	6	4,5	5	5	4,1	5,6	65	ATV-58FHU29N4
2,2	3	7,8	6	5	5	5,8	7,9	105	ATV-58FHU41N4
3	-	10,2	7,8	5	5	7,9	10,6	145	ATV-58FHU54N4
4	5	13	10,1	5	5	10,5	14,3	180	ATV-58FHU72N4
5,5	7,5	17	13,2	5	5	13	17,7	220	ATV-58FHU90N4
7,5	10	26,5	21	22	22	17,6	24	230	ATV-58FHD12N4

2.2 Choix par rapport à l'application.

2.2.1 Simples : ventilation, pompage etc ...

2.2.2 Levage.

Nécessité d'avoir du couple en basse vitesse donc vrai ou faux contrôle vectoriel de flux².

Gestion possible d'un frein extérieur.

Fonctionnement générateur donc résistance ou module de freinage

2.2.3 Positionnement.

Nécessité vraisemblable d'avoir un retour position précis codeur et de fonctionner en boucle fermée.

Si contrainte dynamique sévère (freinage rapide) ajout d'un module de freinage.

2.2.4 Spécifiques ...

Enrouleur dérouleur ... Carte métier pour la gestion de la loi de couple

2.3 Choix par rapport aux fonctions de base.

2.3.1 Entrées TOR.

Les fonctions de base qu'on retrouve toujours sur chaque variateur sont :

Run/Stop ordre de fonctionnement du variateur (il faut qu'il soit d'abord alimenté)
(une ou deux bornes)

FW/RW ordre pour le sens de rotation (marche avant ou marche arrière)
(une ou deux bornes)

HSP/LSP Consigne de vitesse TOR (max ou min)

Reset Ordre d'effacement des défauts (permet de reprendre le fonctionnement ...)

² voir cette notion en SPC.

2.3.2 Gestion vitesse.

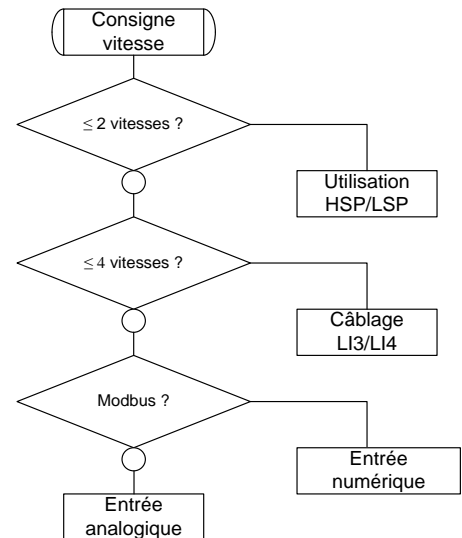
Les consignes de vitesse peuvent être données au variateur de différentes manières.

On peut utiliser des entrées logiques TOR si on a seulement besoin de quelques vitesses (<5). Il faut alors aller paramétrer dans le variateur une table de vérité pour passer de 2 entrées logiques à 4 valeurs de consigne.

On peut utiliser la liaison ModBus si le variateur en a une. La consigne lui parvient alors sous forme d'un mot.

Sinon il reste la possibilité de transmettre les consignes sous forme analogique en utilisant les entrées correspondantes.

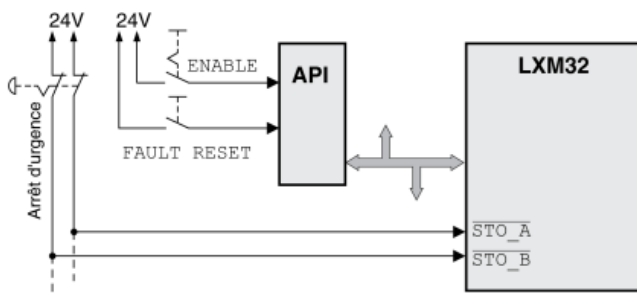
Le choix du variateur se fait donc en lien étroit avec le pilotage qui lui est associé !!



2.3.3 Sortie TOR.

- Relais sécurité,
- Inhib, Commande de frein, Sous ou Sur puissance, Fin de démarrage etc ...

Exemple d'arrêt de catégorie 0



Doc LEXIUM

La fonction de sécurité STO est déclenchée si les entrées de signaux présentent simultanément (décalage temporel inférieur à 1 s) un niveau 0. L'étage de puissance est désactivé et un message de classe d'erreur 3 est généré. Le moteur ne peut plus générer de couple.

Si, lors du déclenchement de la fonction de sécurité STO, le moteur ne se trouvait pas déjà l'arrêt, il décélère sous l'effet des forces physiques opérant à ce moment (force de gravité, frottement, etc.) jusqu'à ce qu'il s'arrête probablement.

2.3.4 Communication.

(a venir) ...

3 Mise en œuvre.

3.1 Raccordements.

Voir schéma de raccordement types fournis en annexe.

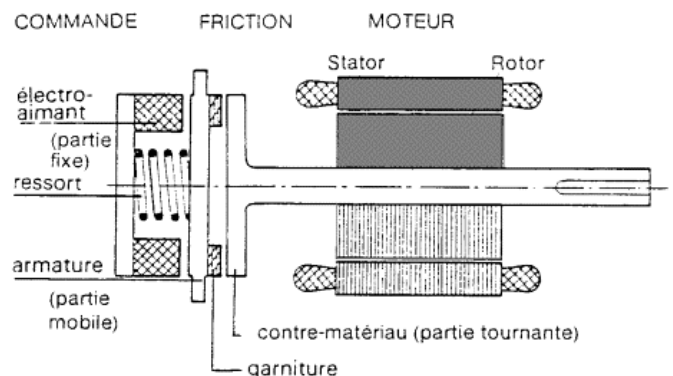
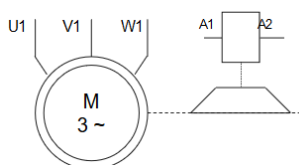
3.2 Freinage.

3.2.1 Commande TOR.

Dans les systèmes à charge entrainante, ou qui ont besoin d'être immobilisés quand ils sont au repos, on ajoute un frein au moteur. Ce frein est à manque de courant :

Quand A1/A2 est alimenté, l'électro-aimant comprime le ressort et lâche le frein.

En cas de coupure, il se referme !

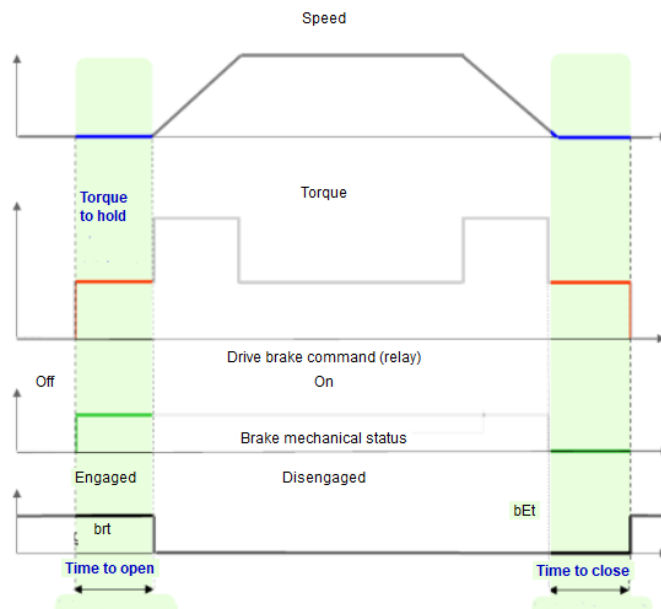


La commande d'un frein à « manque de courant » suit une séquence paramétrable dans le variateur :

Le variateur commence par alimenter le moteur de manière à ce qu'il puisse fournir le couple nécessaire au maintien de la charge.

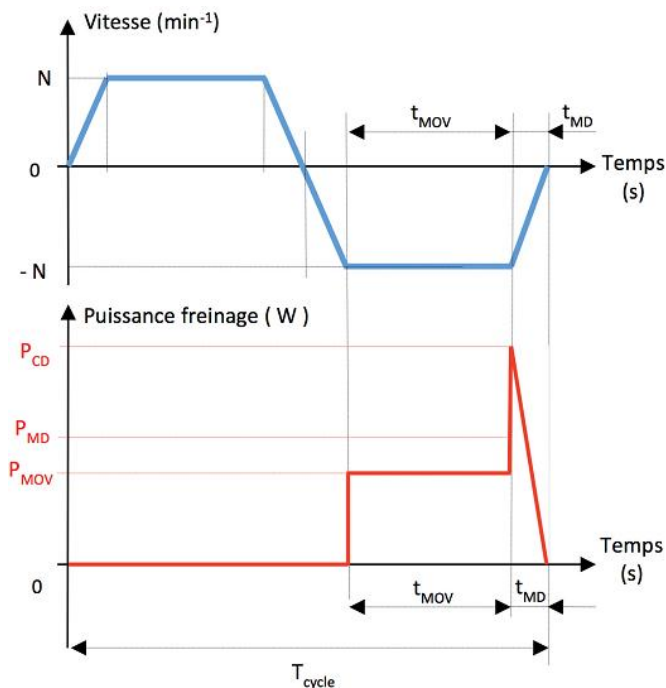
Une fois ce couple assuré, le frein est relâché et le mouvement commence.

Pour l'arrêt, la séquence se déroule de la même manière, le variateur alimente le moteur après l'arrêt de manière à maintenir la charge immobile le temps de fermeture du frein.



Ecran configuration Somove =>

3.2.2 Freinage dynamique.



Pendant les phases de descente d'une machine type levage et/ou de freinage d'une machine entraînée, l'énergie mécanique de la charge est convertie en énergie électrique qui augmente la tension du bus continu du variateur. La résistance de freinage permet de dissiper cette énergie sous forme de chaleur.

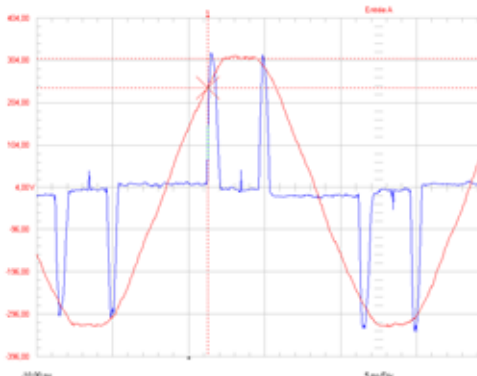
On dimensionne cette résistance en fonction de la puissance crête et moyenne à dissiper³.

La température de la résistance de freinage est parfois surveillée par une sonde PTC qui est alors utilisée pour la protéger.

<= Doc Leroy Somer

3.3 Qualités.

3.3.1 Problème amont.



Le pont redresseur en tête entraîne l'apparition de **courant de ligne très déformé** (voir le chapitre 34 et le cours de SPC). Cette perturbation entraîne une hausse de la puissance apparente en amont du variateur et peut être atténuée par l'ajout d'une inductance de lissage :

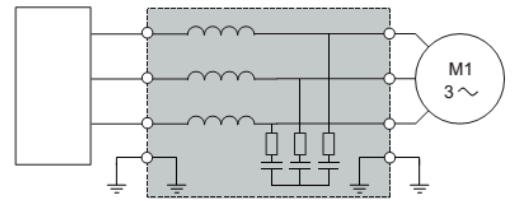
Variateur correspondant	Icc réseau	Inductances de ligne		Référence
		Valeur d'inductance	Courant nominal		Pertes
	kA	mH	A	W
Tension d'alimentation triphasée : 500...690 V 50/60 Hz				
ATV930U22Y6...40Y6	22	10	4	45
				VW3A4551

³ (Voir le cours de SPC pour le calcul d'une résistance de freinage).

3.3.2 Problème aval.

En aval du variateur, le problème est celui des harmoniques de tension liées à la modulation de largeur d'impulsion.

Pour améliorer la compatibilité électromagnétique on utilise des « filtre CEM » insérés entre le variateur et le moteur =>



4 Pilotage.

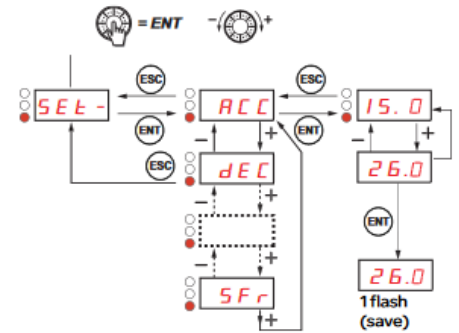
4.1 Paramétrages.

4.1.1 Clavier.

En principe avec deux touches « ESC » et « ENT » ainsi que deux touches ↓ & ↑ ou une molette rotative, on peut naviguer dans des menus (↓ & ↑) ou entre des menus (« ESC » et « ENT »).

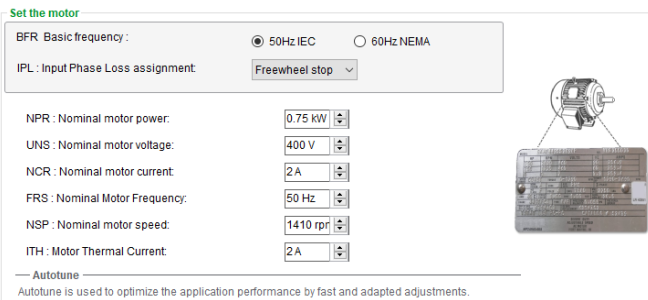
La touche « ENT » permet en outre de valider le contenu d'une mémoire ou la valeur d'un paramètre.

- On différencie les paramètres :
 - d'affichage (lisibles le variateur en fonctionnement)
 - de réglage (modifiable en fonctionnement)
 - de configuration (modifiables uniquement à l'arrêt)



4.1.2 Configuration logicielle.

Dès qu'une machine devient complexe, il est préférable d'utiliser un logiciel pour paramétrer le variateur :



De plus la configuration peut être sauvegardée.

Code	Long Label	Current Value
BFR	Motor Standard	Drive 50 Hz
NPR	Nominal Motor Power	0.75 kW
UNS	Nominal motor voltage	400 V
NCR	Nominal motor current	2 A
FRS	Nominal motor frequency	50 Hz
NSP	Nominal motor speed	1400 rpm
COS	Nominal motor cos phi	0.77
TCC	Type of control	2 wires control
TFR	Top frequency	60 Hz
STUN	Autotune selection result	Default values are used to control the motor
ITH	Motor thermal current	2 A
ACC	Acceleration time (between 0 and FRS)	3 s
DEC	Deceleration time (between FRS and 0)	3 s
LSP	Low speed	0 Hz
HSP	High speed	50 Hz

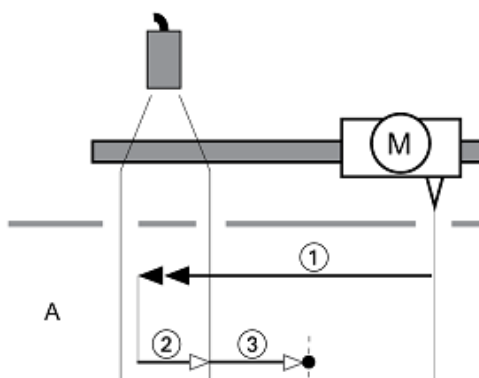
Exemple Somove

4.1.3 Blocs séquentiels intégrés.

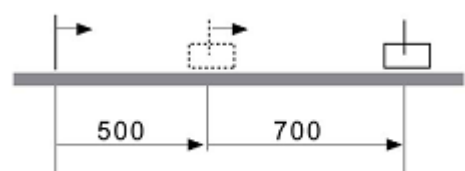
Certains variateurs proposent des logiques intégrées qui permettent de soulager l'automatisme qui les pilote. Il s'agit de morceaux de programme « motion sequences » internes au modulateur que l'API n'a plus qu'à lancer sous forme d'un ordre TOR simple par exemple :

Mouvement trapézoïdal, prise d'origine, séquence répétitive etc ...

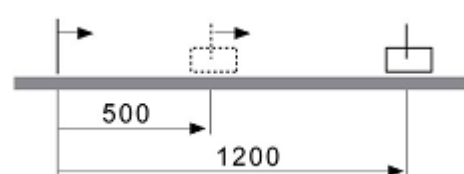
Prise d'origine sur capteur :



Déplacement relatif :



Déplacement absolu :

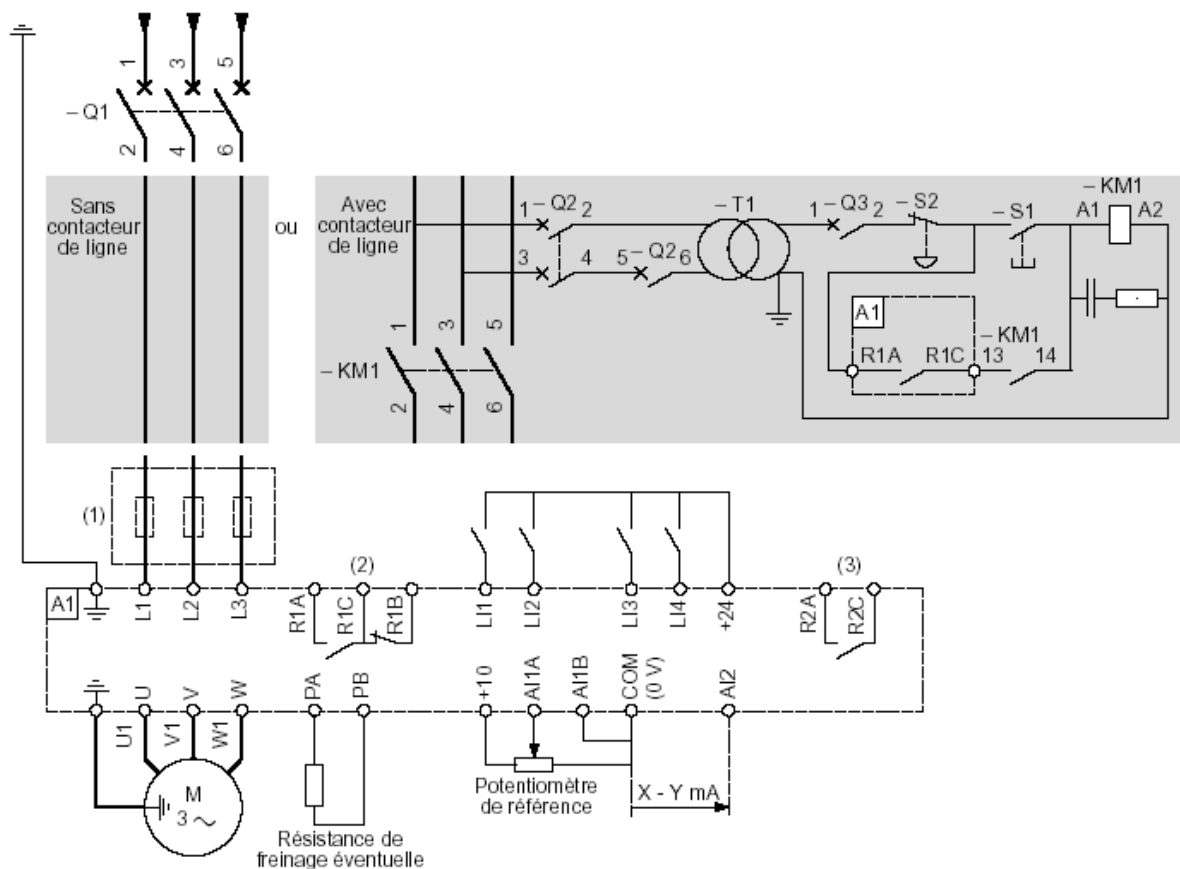


Plusieurs séances de TP sont prévues pour vous familiariser avec ces fonctionnements ...

5 Annexes.

5.1 Exemples de Schémas types.

5.2 Variateur de vitesse pour Mas simple: ATV 58



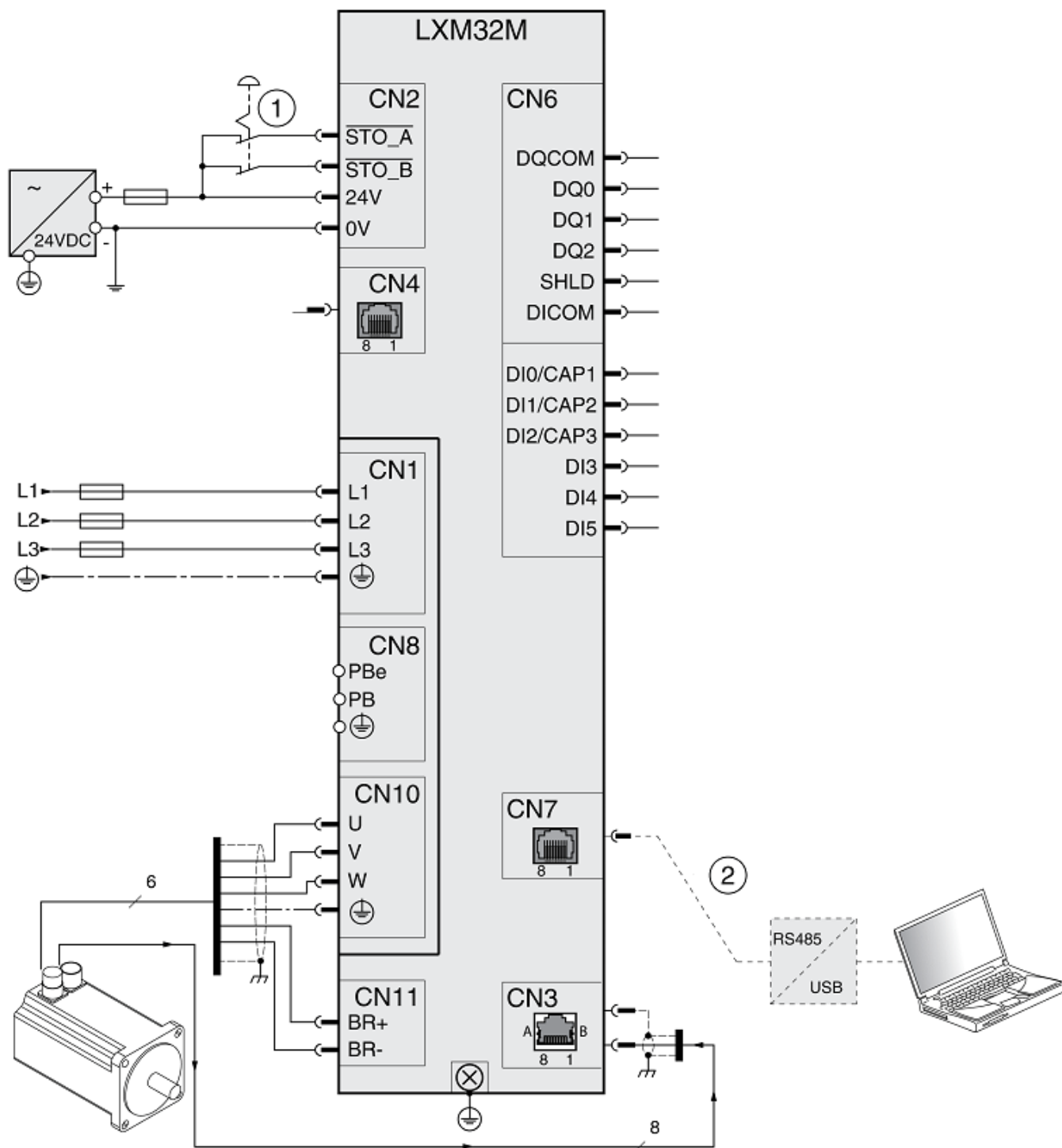
- (1) Inductance de ligne éventuelle (ATV-58FHU18N4 à D23N4).
 (2) Contacts du relais de sécurité, pour signaler à distance l'état du variateur.
 (3) Relais R2 réaffectable

Nota :

Equiper d'antiparasites tous les circuits inductifs proches du variateur ou couplés sur le même circuit tels que relais, contacteurs, électrovannes, éclairage fluorescent...

Surligner : *en rouge les conducteurs de « puissance » ...*
 En jaune les entrées de commande et en bleu les sorties de commande.

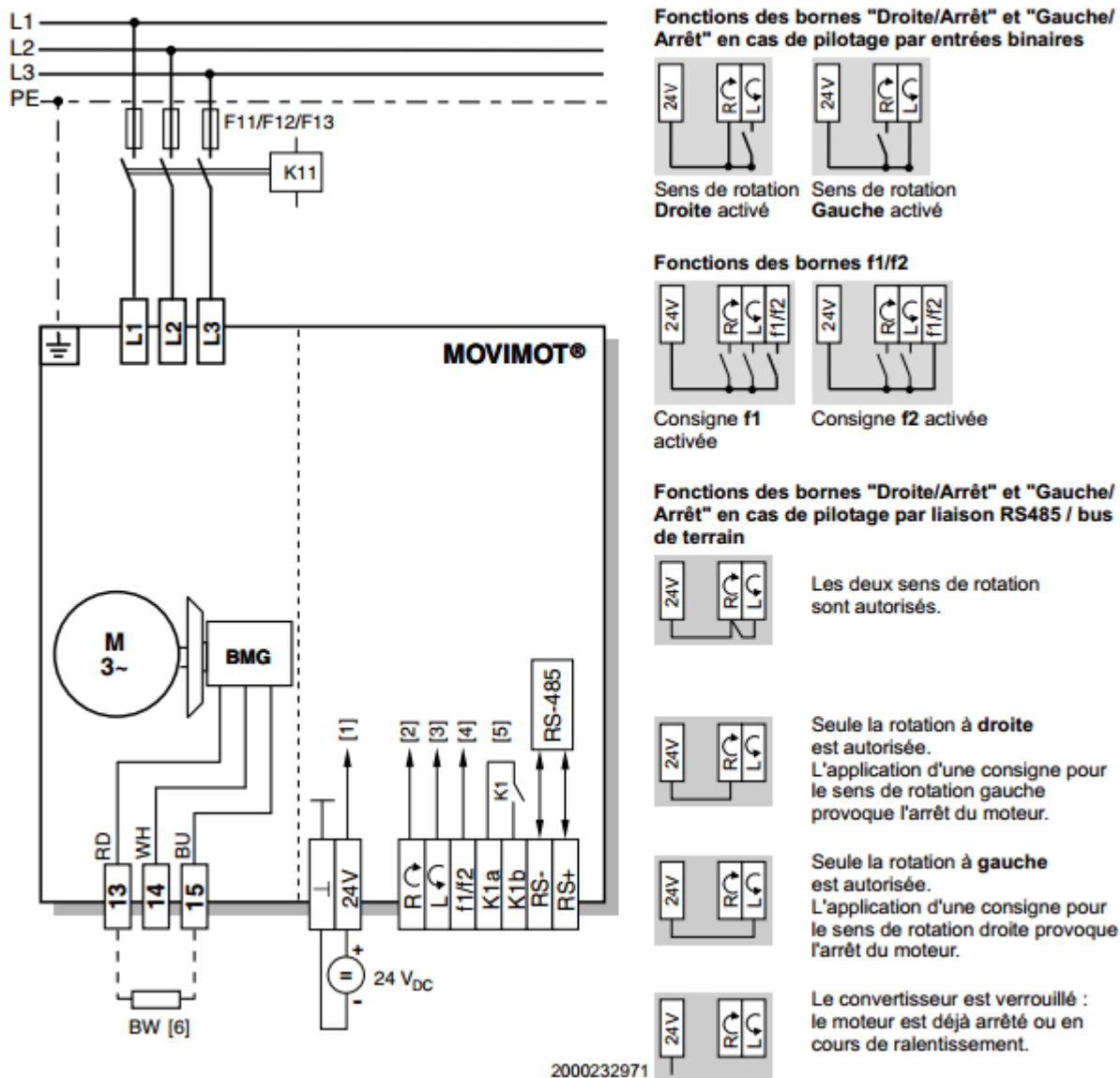
5.2.1 Servo moteur : Lexium LXM32M



- 1 ARRÊT D'URGENCE
- 2 Accessoires pour la mise en service

0-Lexium32M-Manuel.pdf (page 444)

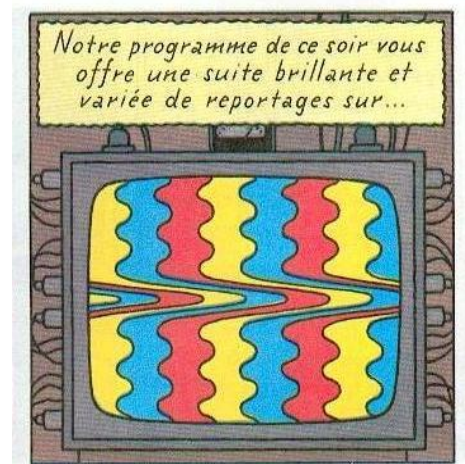
5.2.2 Servo moteur : Movimot



Movimot-fr.pdf (page 20)

Surligner : en rouge les conducteurs de « puissance » ...
 En jaune les entrées de commande et en bleu les sorties de commande.

Qualité du courant



(Notes)

1 Introduction.

C'est la Norme internationale CEI 61000-3-2 qui traite des limites pour les courants harmoniques (I par phase $< 16 A$).

Quatre paramètres peuvent affecter la qualité du courant : **la forme, l'équilibre, l'amplitude et la fréquence**. Ce document **ne traite pas** des défauts d'utilisation entraînant des surintensités (courts-circuits ou surcharges), mais des conséquences d'une utilisation apparemment normale.

Par la suite, seuls sont retenus : **les déséquilibres,**
 les perturbations de forme (Pb d'harmoniques)

2 Déséquilibres (cf TP SPC).

2.1 Introduction.

2.1.1 Rappel :

Pour quantifier le **déséquilibre** d'une installation, on définit deux grandeurs : la **composante directe** (I_+ ou I_d) et la **composante inverse** (I_- ou I_i) du courant appelé par une charge et on calcule $I_-/I_+(\%)$.

Il n'y a pas actuellement de limite normalisée pour ce rapport mais certains appareils de mesure le proposent. En revanche, la CEI 61000-3-2 définit dans le paragraphe 3-14 :

un appareil triphasé équilibré est un appareil dont les modules des courants assignés par phase ne diffèrent pas de plus de 20 % les uns par rapport aux autres ...

Cependant, c'est plus la répartition des appareils monophasés sur les différentes phases qui peut poser problème, notamment en termes de perturbations héritées¹ ...

2.1.2 Problème posé en sinusoïdal.

(Voir TD étuve ...)

Il est établi que le neutre permet de fixer les « tensions simples » aux bornes des récepteurs monophasés, cependant, cela entraîne la circulation d'un courant dans ce conducteur en cas de déséquilibre ... C'est la raison pour laquelle ce conducteur est considéré comme un conducteur actif (§ 232-1) et est potentiellement dangereux (§ 232-4) !!

2.2 Charge du neutre.

2.2.1 Circulation dans le neutre.

Si le neutre est chargé, on ne peut plus réduire sa section de moitié (§ 524-2-3).

Dans le meilleur des cas on doit la prendre égale à la section des phases, mais dans ce cas il faut considérer un conducteur chargé de plus et appliquer un coefficient correcteur de 0,84 aux câbles multiconducteurs triphasés. (§ 523-5-2).

Dans le cas où le courant dans le neutre devient supérieur au courant de phase (présence d'harmoniques telle que TDHI $> 33\%$ uniquement), il faut alors choisir la section du neutre avec un courant supérieur à 1,45 fois celui des phases.

Ce qui entraîne des problèmes de raccordement (différences de sections) ou de coût (surdimensionnement des phases en cas de multiconducteur par exemple).

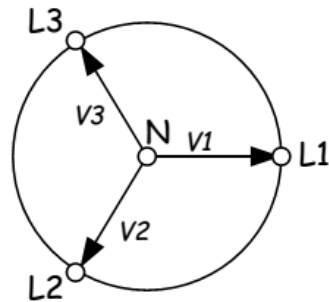
2.2.2 Rupture du neutre.

En l'absence de neutre, un déséquilibre de la charge peut entraîner, des surtensions allant jusqu'à 73 % ! Les équipements doivent donc être conçus pour les supporter².

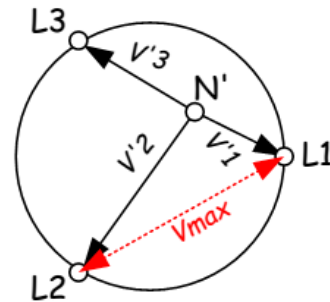
¹ C'est-à-dire chute de tension sur une phase ...

² Voir le chapitre 16 sur la qualité de la tension, c'est une perturbation héritée !

Réseau triphasé déséquilibré avec neutre



Réseau triphasé déséquilibré sans neutre



Cela pose le problème de la protection ou de la coupure du conducteur neutre ... Ce problème est complexe, on retiendra simplement que :

« Lorsque la coupure du conducteur neutre est prescrite, la coupure et la fermeture du conducteur doivent être telles que le conducteur neutre ne soit jamais coupé avant les conducteurs de phase et qu'il soit fermé en même temps ou avant les conducteurs de phase. » (§ 431-3)

3 Pollution harmonique.

3.1 Rappel.

Ce cours suppose acquises les notions abordées en cours de sciences appliquées aux chapitres concernant les développements en série de Fourier et les puissances en régime périodique perturbé.

On rappellera seulement les points suivants :

3.1.1 Différence entre charge linéaire et non linéaire.

Une charge est dite linéaire si, alimentée par un système de tensions sinusoïdales, elle absorbe (appelle) un système de courants sinusoïdaux de même fréquence ...

3.1.2 Puissances actives et réactives.

Pour simplifier, les formules sont établies en monophasé, à vous de les adapter à vos besoins ...

$$P = V_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(\phi_1)$$

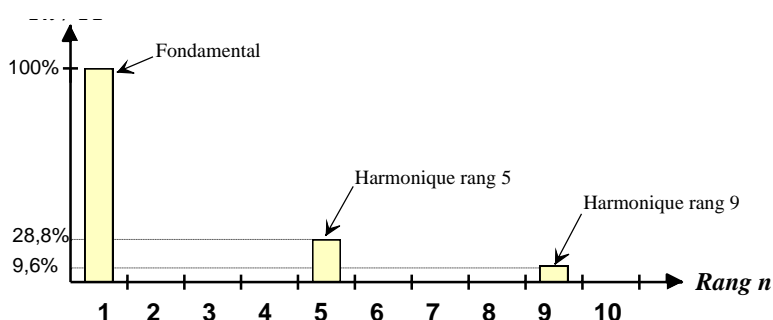
$$Q = V_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin(\phi_1)$$

Avec ϕ_1 le déphasage du fondamental par rapport à la tension qui lui a donné naissance,
 I_{eff} la valeur efficace du fondamental du courant,
 V_{eff} la valeur efficace de la tension simple supposée sinusoïdale.

Les puissances actives et réactives sont donc véhiculées par le premier harmonique (ou fondamental) qui est à la même fréquence que la tension d'alimentation ...

3.1.3 Valeur efficace d'un courant et relation de Parseval.

La valeur efficace (RMS : Root Mean Square) d'un courant conditionne les échauffements son expression est en utilisant la relation de Parseval :



$$I_{\text{eff}}^2 = I_{\text{moy}}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{\text{neff}}^2$$

ou en simplifiant :

$$I_{\text{eff}}^2 = I_1^2 + (I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_{25}^2)$$

Avec I_{neff} les valeurs efficaces des courants harmoniques.

Le courant efficace (celui qui dimensionne donc ...) est la somme quadratique de tous les harmoniques ...

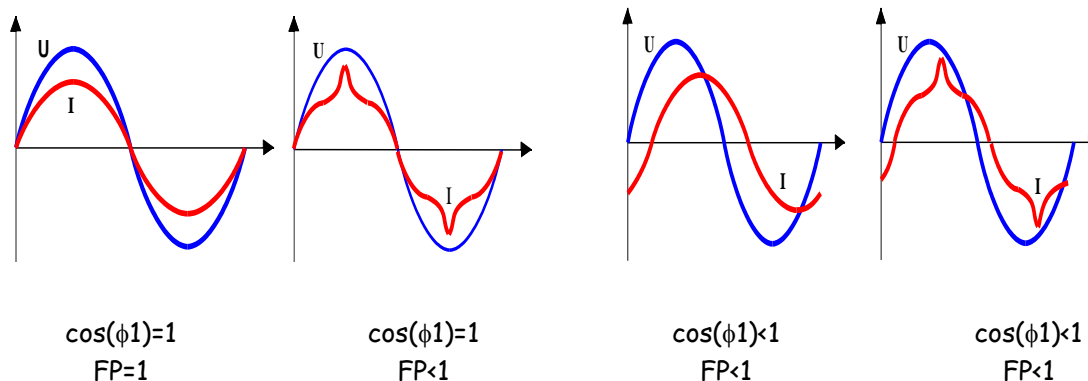
3.1.4 Puissance de dimensionnement S.

La puissance apparente (toujours dite de dimensionnement !) dépend, elle, de tous les harmoniques ...
 $S = V_{eff} \cdot I_{eff}$.

Il y a donc apparition d'une puissance dite **déformante D** telle que : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

3.1.5 Facteur de puissance et facteur de déphasage.

$$FP = \frac{P}{S} \text{ alors que } \cos(\phi_1) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$



Remarque 1 : on relève le **cos phi** à l'aide de **condensateurs**.
 on relève le **facteur de puissance** à l'aide de **filtres et de condensateurs**.

Remarque 2 : souvent les appareils mesurent la puissance réactive avec la formule classique suivante :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

(ce qui est faux en présence de courants harmoniques ... ATTENTION !!)

3.1.6 Définition du TDHI.

C'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental (selon la CEI 1000-2-2) :

$$TDHI = \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{25} I_n^2}}{I_1} \text{ un courant propre a donc un TDHI=0 ...}$$

On trouve souvent le TDHI exprimé en %, il s'agit alors d'un pourcentage du fondamental !

On utilise parfois une relation entre le facteur de puissance et le TDHI :

$$Fp = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1+TDHI^2}} \quad \text{ou} \quad Fp = \frac{1}{\sqrt{1+TDHI^2}} \text{ pour un redresseur}$$

3.2 Causes.

3.2.1 Condensateurs et circuits magnétiques.

(voir le TP d'ADM correspondant).

3.2.2 Redresseurs.

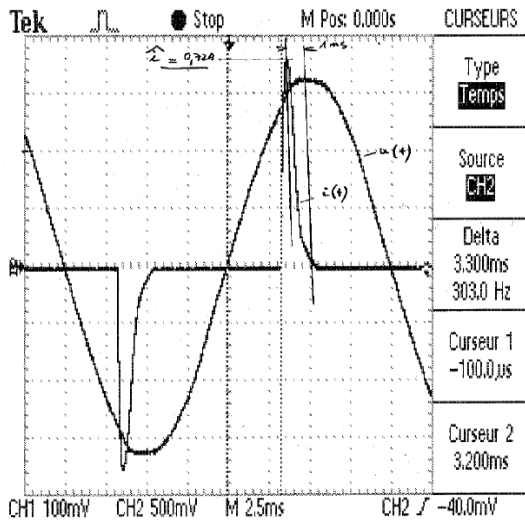
La NFC 15-100 (§330-1-1) distingue :

les redresseurs monophasés :

- les matériels bureautiques, les équipements informatiques et leurs périphériques,
- les matériels électroménagers (micro-ondes, TV, Hi-fi,...).
- certains luminaires à lampe à décharge dont les tubes fluocompact,

et les redresseurs triphasés :

- Les équipements d'électronique de puissance (redresseurs, variateurs de vitesse),

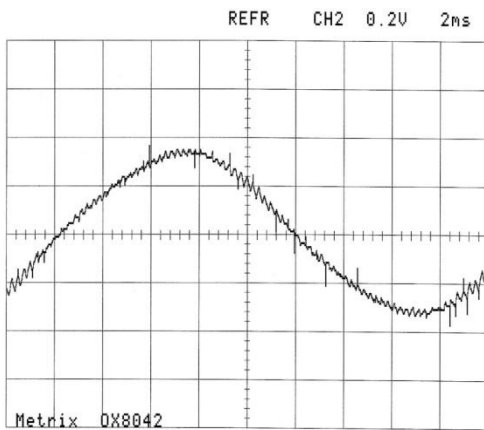


L'oscillogramme ci-contre représente le courant absorbé par une lampe fluocompacte 22 W / 230 V.

$i_{max} = 0,72A$ pour une valeur efficace de 0,2A environ. La crête de courant se produit pendant le maximum de tension. Cela correspond au courant appelé par un pont redresseur débitant dans un condensateur, ce qui est le cas des alimentations à découpage et des lampes fluocompactes.

3.2.3 Découpage.

□ Les équipements d'électronique de puissance (onduleurs, variateurs de vitesse, gradateurs).



Le courant dans une phase de moteur alimenté par un variateur de vitesse fait apparaître clairement une fréquence « parasite » liée au découpage (la **Modulation de Largeur d'Impulsion** ou **MLI**) de l'onduleur.

On peut même la mesurer avec précision sur le chronogramme.

Ce type de perturbation entraîne essentiellement des problèmes de CEM qui seront abordé dans un TP.

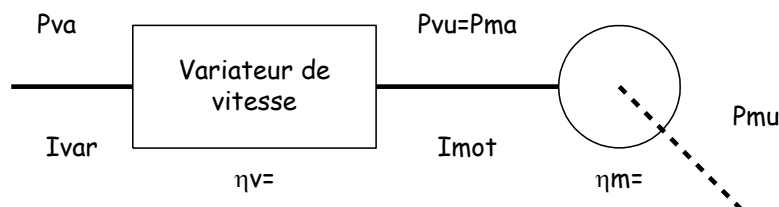
3.3 Conséquences sur le réseau.

3.3.1 Phases.

Les conducteurs sont parcourus par les harmoniques, or ceux-ci participent à l'échauffement (par I_{eff}) sans véhiculer la puissance utile (active ou réactive) puisque celle-ci est liée à I_{1eff} ...

La première conséquence va être de prendre les harmoniques en compte dans le dimensionnement des conducteurs.

L'exemple qui suit montre comment dimensionner un câble alimentant un départ moteur (2,2 kW) en variation de vitesse. (le rendement du moteur est évalué à 85%).



On peut prédéterminer les facteurs de puissance des variateurs 2,2 kW :

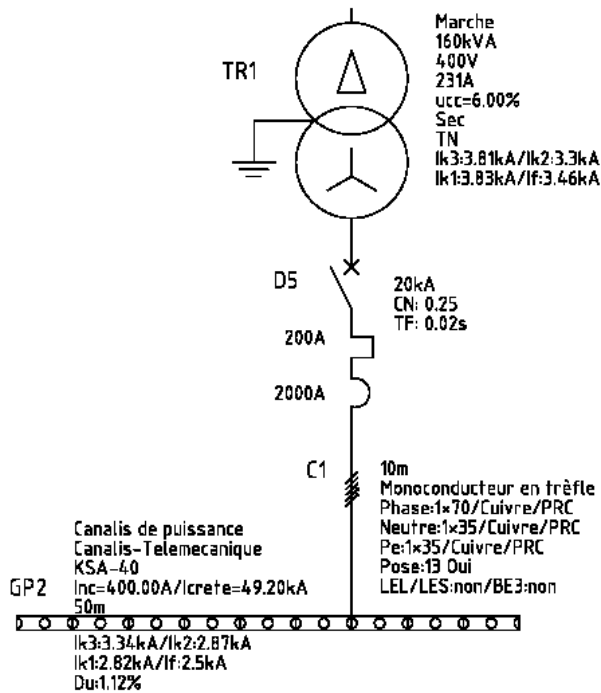
$F_p = P/S \Rightarrow$ puis les TDHI attendus en considérant que le fondamental est en phase avec la tension ...

	P_{mu} (W)	$P_{ma}=P_{vu}$ (W)	P_{va} (W)	S (VA)	F_p	TDHI
Monophasé 240 V	2200	2588	2695	$240 \cdot 18,6 = 4464$	60 %	133 %
Triphasé 380 V	2200	2588	2669	$\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 8,4 = 5529$	48 %	182 %

Dans les deux cas, les harmoniques « dépassent » largement le fondamental ...

3.3.2 Neutre.

En présence d'harmoniques, le conducteur neutre ne véhicule plus le même courant que les phases³ ...
Ce qui suit correspond à un TD fait en classe à l'aide du logiciel de calcul Elec Calc.



Modéliser une installation comme suit :

Le SLT est TNS
 (c'est-à-dire départ tétraphasé).
 L'installation est compensée (cos(phi)=1),
 Le courant d'emplois vaut 195 A.
 Le taux d'harmonique est <15%.
 (Il s'agit de TDHI3 ...)
 Le neutre est chargé à 0,25.
 Il faut penser à affecter la bonne référence à la canalisation Télémécanique.

Vérifiez les sections de C1 et justifiez-les.
 (Vous relèverez les sections proposées et retenues pour Ph, N et PE).

Que deviennent-elles si 15% < Th < 33% ?

Et si Th > 33% ?

Conducteur :	TDHI3 < 15 %	15 % < TDHI3 < 33 %	33 % < TDHI3
Phase	Sph =<.....	<	<
Neutre	Sn =<.....	<	<
PE	Spe =<.....	<	<

Conclusions :

Taux d'harmoniques « 3k »	Recommandations issues de la norme ...
< 15 %	Si le neutre est peu chargé, sa section peut être diminuée jusqu'à 50 % si les sections de phases sont supérieures à 16 ou 25 mm ² . Sinon : non !
Entre 15 % et 33 %	Le neutre doit obligatoirement avoir la même section que celle des phases déterminée avec un coefficient supplémentaire : « de charge » de 0,84.
> 33 %	La section du neutre est choisie pour un courant véhiculé de 1,45 fois le courant d'emplois réel (hors autres coefficients).

³ Le cahier technique n°202 de Schneider décrit comment évaluer le courant dans le neutre.

4 Remèdes et solutions ...

4.1 Appareillage propre ... Que disent les normes ?

La CEI 61000-3-2 classe les appareils de faible puissance en 4 catégories (voir en [annexe](#)).

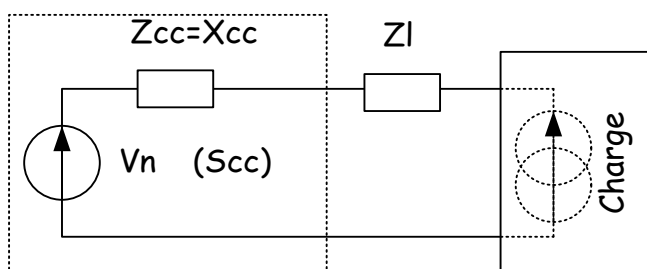
Puis, en fonction de cette classe, elle définit des niveaux de courant harmonique à ne pas dépasser ...

Ci-dessous l'exemple des appareils appartenant à la classe A :

Classe A :	
Rang de l'harmonique	Courant maximal autorisé en Ampères ...
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
...	...
9	0,40
Etc ...	Etc ...

4.2 Structures.

4.2.1 Modélisation simple.



Le schéma ci-contre modélise la charge polluante comme un générateur de courant harmonique I_h . On pourrait représenter autant de schéma qu'il y a de rang harmonique dans la décomposition de Fourier du courant réel et appliquer le théorème de superposition.

L'impédance Z_l est nécessaire au raccord entre une source de tension et une source de courant, il s'agit de l'impédance de liaison.

4.2.2 Scc.

La puissance de court circuit est définie par : $S_{cc} = \sqrt{3} * U_n * I_{cc}$

Elle caractérise la sensibilité du réseau aux perturbations en courant ... Ou aussi sa capacité à résister ! Elle permet de modéliser le réseau sous la forme d'une impédance qui est en fait souvent une réactance et qui a pour

valeur : $Z_{cc} = X_{cc} = \frac{U_n^2}{S_{cc}}$

Plus cette impédance est élevée, et plus elle entraînera une chute de tension à ses bornes et donc « abimera » la forme de la tension aux bornes de la charge. C'est ce qu'on appelle une perturbation héritée :

A vide la tension est bonne,

En charge elle devient mauvaise ...

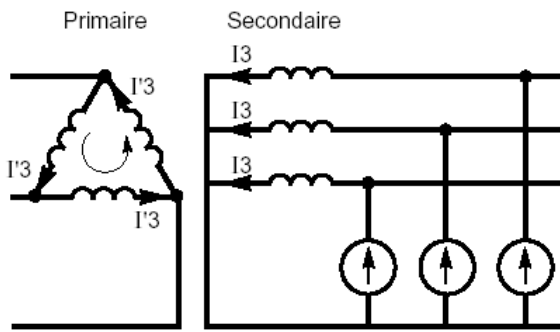
Plusieurs solutions consistent donc à diminuer l'influence de cette impédance de ligne ...

- alimenter les charges polluantes par des circuits dont l'origine est la plus proche de la source,
- alimenter les charges sensibles et les charges polluantes par des circuits séparés,
- réduire la tension harmonique en diminuant l'impédance de source (augmentation de P_{cc}).

4.2.3 Confinement.

- utiliser des transformateurs à couplage spéciaux,

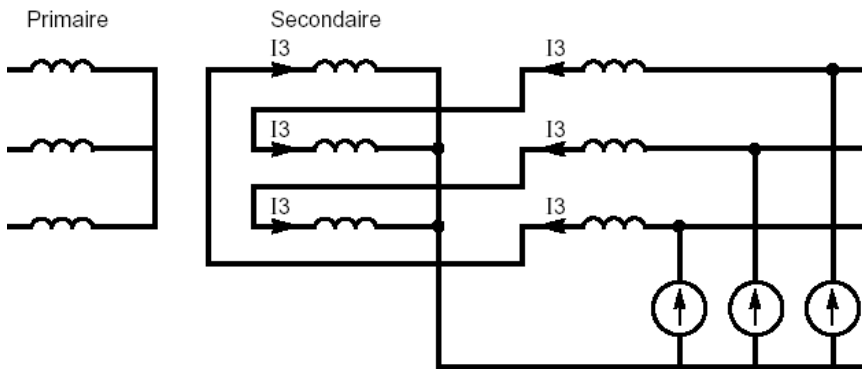
(Voir les TP de SPC ...)



Le schéma ci-contre illustre clairement le comportement d'un couplage DY face aux harmoniques de rang $3k$!

Elles sont capturées dans le triangle donc :

- 1) : le réseau amont est nettoyé.
- mais,
- 2) : le primaire du transformateur chauffe ...



Dans le cas d'un couplage :

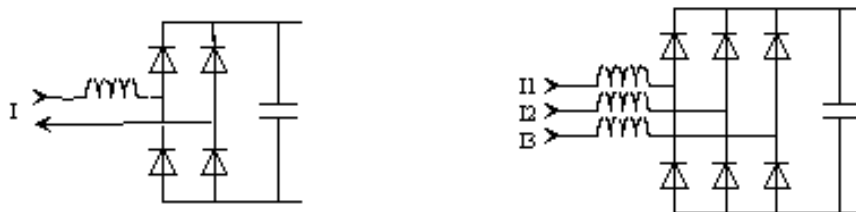
Primaire : étoile (sans neutre)
 Secondaire : zig-zag,

les ampères-tours générés par la composante harmonique de rang $3k$ s'annulent par colonne, l'étage magnétique ne transmet donc pas la perturbation au primaire !

4.3 Filtres.

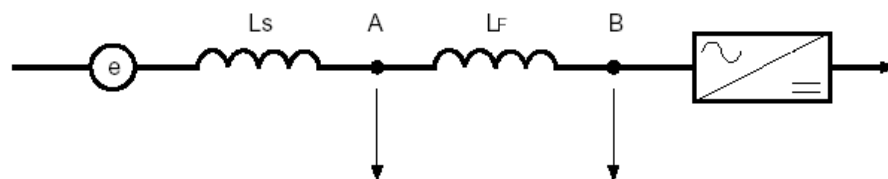
□ réduire les courants injectés par l'utilisation de filtres actifs, passifs ou hybrides et/ou de ponts dodécaphasés,

4.3.1 Lissage.



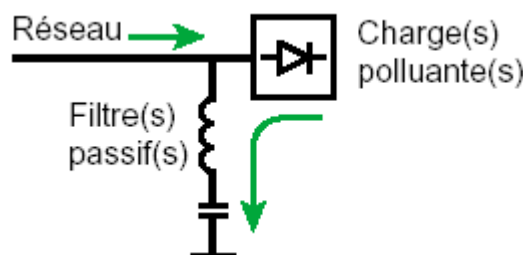
L'une des solutions consiste à insérer une ou plusieurs inductances en série dans les phases (ou coté continu pour les redresseurs commandés) Pour « aplatir » les pics de courant ...

Cela améliore le THDU au point A mais le dégrade au point B ...



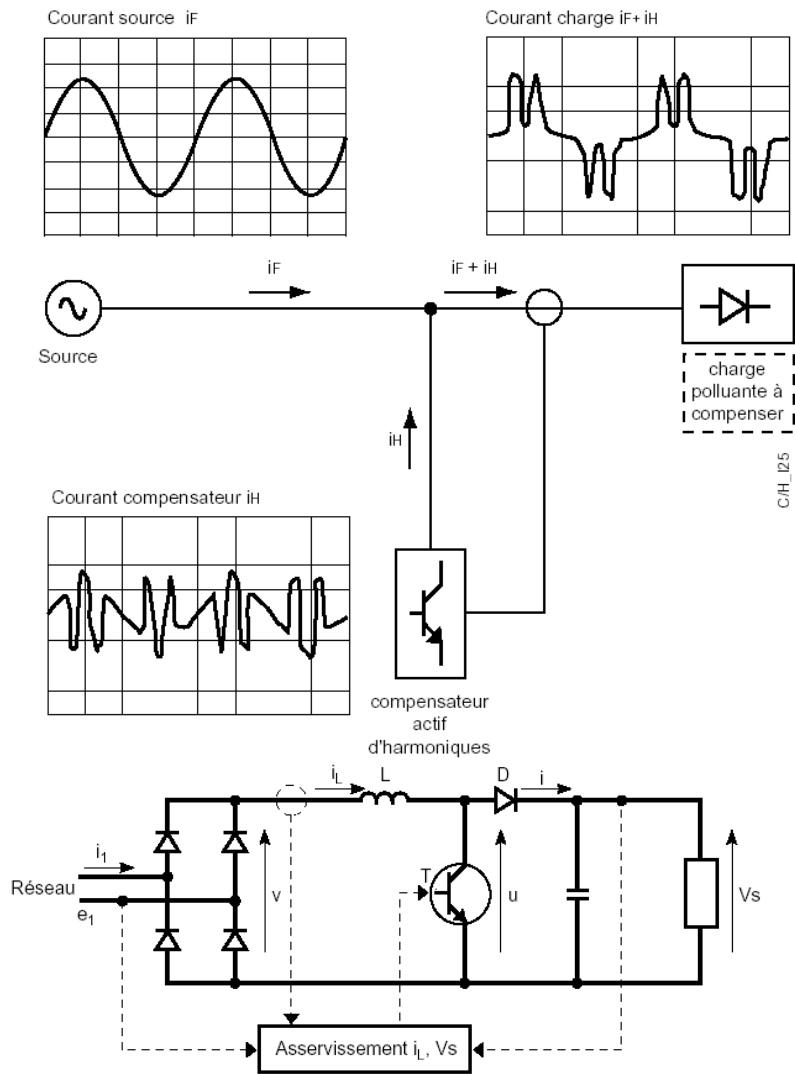
De plus, cela diminue la déformante en augmentant le réactif ...

4.3.2 Filtres passifs.



4.3.3 Compensateurs actifs

(Voir la synthèse) ...

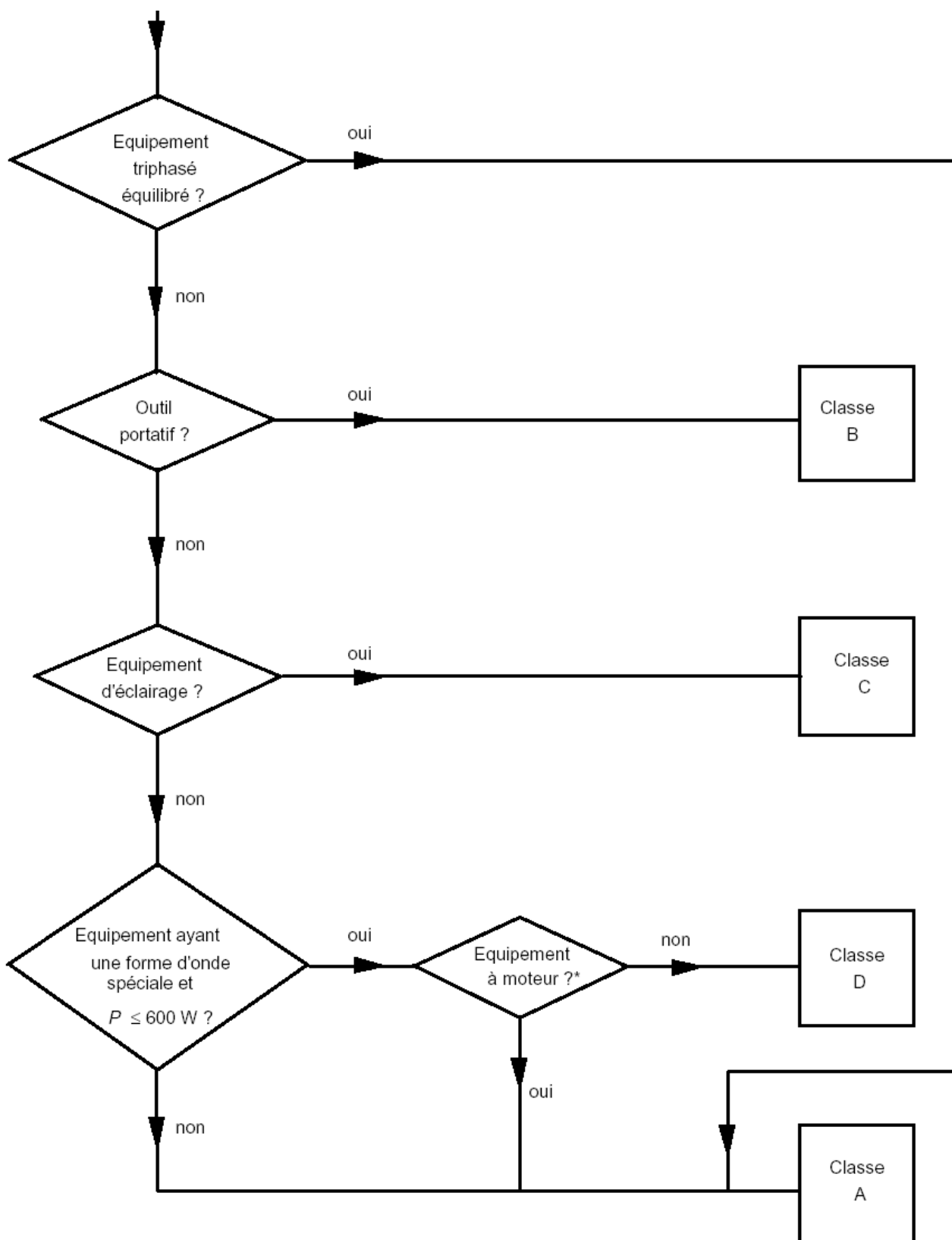


4.3.4 Convertisseur à absorption sinusoïdale.

<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> -Courant absorbé quasi-sinus -Possibilité de fournir du réactif -Réversibilité en 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> -Complexité -Tension de sortie réglable mais supérieure à la tension max du réseau. 	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> -Simplicité, robustesse en forte puissance -Tension de sortie réglable de 0 à $V_{C_{max}}$ -Réversibilité en 	<p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> -Pollution harmonique -Consommation de réactif

5 Annexe.

5.1 Classification des appareils selon la CEI 61000-3-2 :



* Commandé par angle de phase

5.2 Synthèse intermédiaire ...

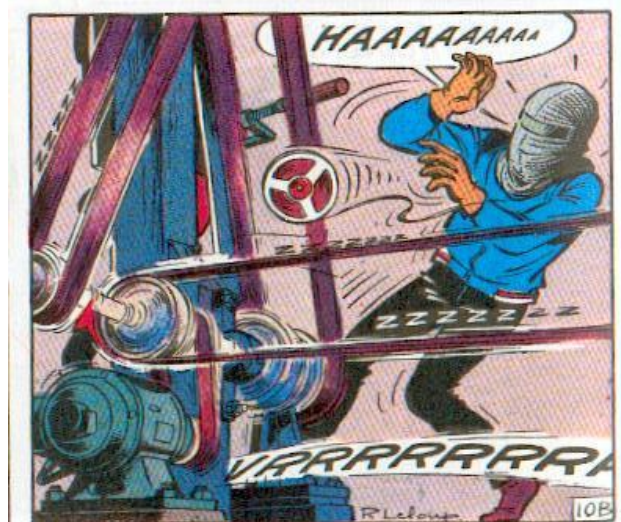
Type de convertisseur	Schéma	Allure du courant
1 : Gradateur de lumière ou de chauffage		
2 : Redresseur d'alimentation à découpage, par exemple : ■ ordinateur ■ électroménager		
3 : Redresseur triphasé avec condensateur en tête par exemple : variateur de vitesse pour moteurs asynchrones		
4 : Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu, par exemple : chargeur de batterie.		

N°	H ₃	H ₅	H ₇	H ₉	H ₁₁	H ₁₃	H ₁₅	H ₁₇	H ₁₉
1	54	18	18	11	11	8	8	6	6
2	75	45	15	7	6	3	3	3	2
3	0	80	75	0	40	35	0	10	5
4	0	25	7	0	9	4	0	5	3

Documentation Schneider

Voir le TD correspondant qui permet de calculer les THDI de ces différents modulateurs à l'aide des valeurs efficaces des rangs harmoniques ...

Sécurité des machines



(Notes)

1 Présentation.

Déterminer ³ le contexte normatif et réglementaire d'une installation, d'un équipement électrique
Choisir ⁴ des constituants de sécurité
Concevoir/Adapter ⁴ les schémas de raccordement des constituants de sécurité
Raccorder/installer ³ un constituant de sécurité
Réaliser ³ les paramétrages des constituants de sécurité, des fonctions de sécurité

1.1 Réglementations.

1.1.1 Directive machine et normes.

La sécurité des machines est un domaine qui est complexe et peut occuper un technicien à temps plein !!!
Depuis 2008, et la dernière version de la directive machine européenne, ce sont deux normes qui aident le concepteur à produire des machines sûres d'un point de vue sécurité.

Il s'agit de normes :

EN ISO 13849-1:2008.

« Sécurité des machines - Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité ».

EN/IEC 62061.

« Sécurité des machines - Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables »

La suite du document s'appuie essentiellement sur la première.

1.1.2 Démarche.

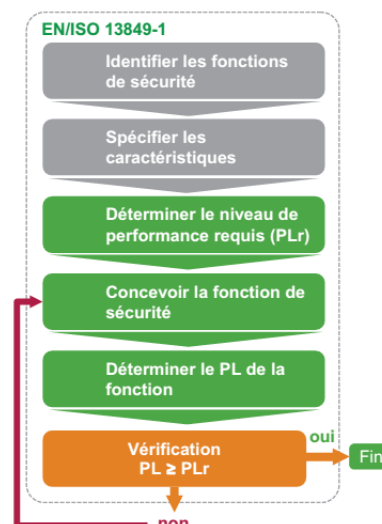
Une fois identifiés, localisés et analysés les risques, il faut déterminer le niveau de performance requis PLr.

Cette détermination se fait simplement à l'aide d'un tableau hérité de la norme EN 954-1.

Ce niveau PLr permet d'organiser la conception de la machine, notamment en choisissant un schéma électrique et les composants pour atteindre PLr.

Une fois terminée la conception, il faut calculer le niveau de performance (réel cette fois) et le comparer au PL pour vérifier (ou non !) que :

$$PL > PLr.$$



1.2 Principe.

1.2.1 Détermination de PLr.

La détermination de PLr s'effectue de manière déterministe en répondant à 3 questions simples :

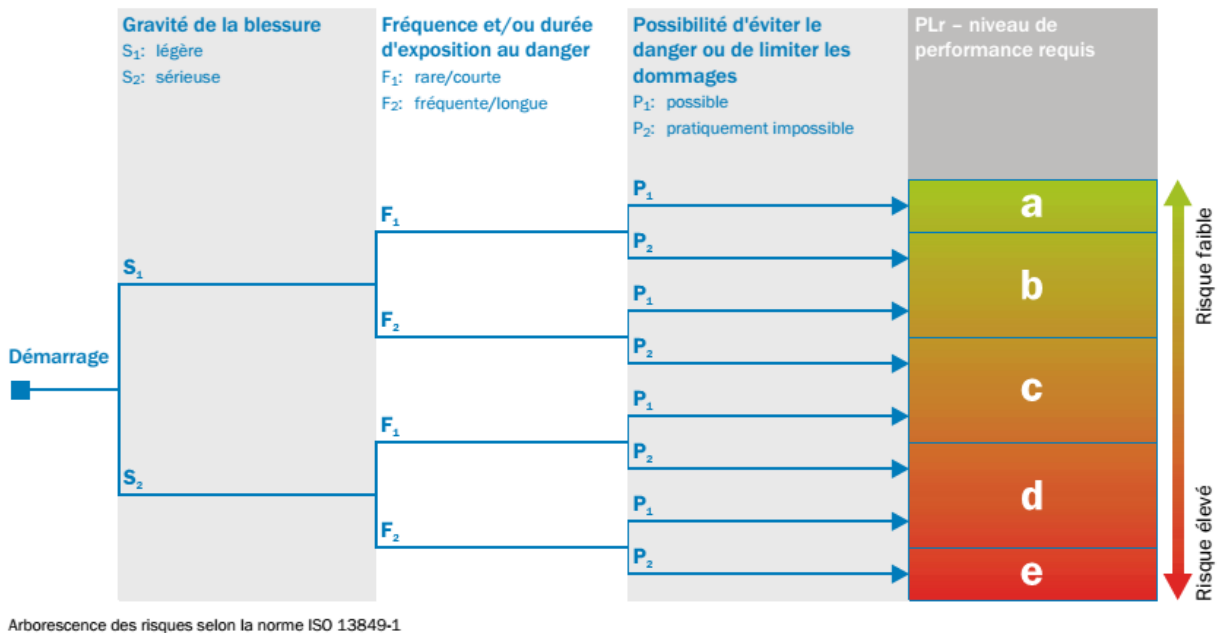
En cas de blessure, celle-ci est-elle grave ?

Le danger est-il fréquent ?

Peut-on éviter le danger ?

Après analyse, les réponses permettent de suivre un arbre de décision qui aboutit à un niveau de performance requis allant de a (risque faible) à e (risque élevé) :

Le plus dur reste cependant de répondre aux 3 questions ...



1.2.2 Catégories B/1/2/3/4.

Une fois l'analyse précédente terminée, la norme recommande des catégories de paramètres pour atteindre un PLr.

Ces catégories vont de B (basique) puis 1 à 4.

Ces catégories proposent : des structures typique de circuits de sécurité ainsi que des exigences du système de commande ...

Voir ci-dessous ↗

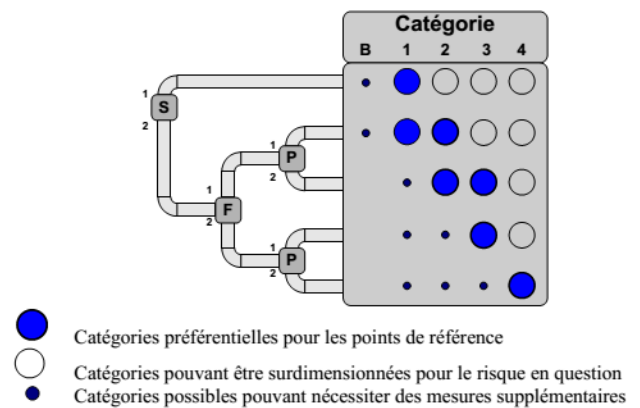
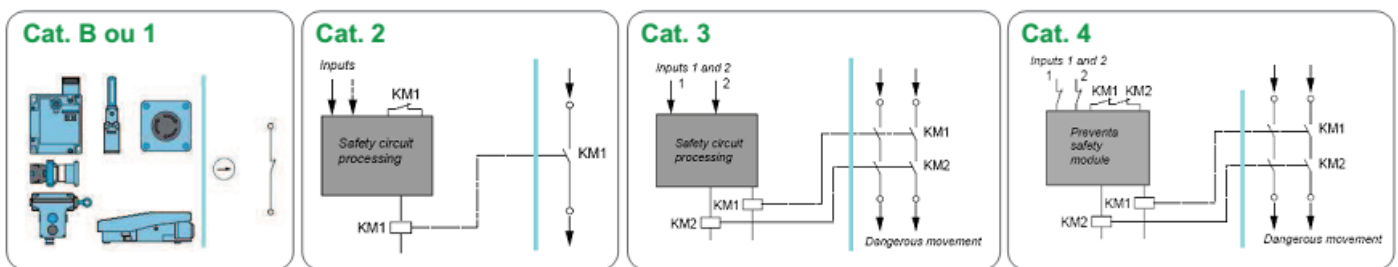


Figure 9 : Grille de sélection des catégories selon la norme ISO 13849-1:999



Pour les deux premières catégories, la sécurité repose essentiellement sur le choix des composants et constituants matériels.

En revanche, les 3 catégories suivantes qui permettent d'atteindre des niveaux de performance plus élevés font intervenir deux notions décrites plus loin : la redondance et l'auto contrôle.

Catégories	Base principale de la sécurité	Exigence du système de commande	Comportement en cas de défaut	Structure typique d'un circuit de sécurité en cas de défaut	Commentaires
B	Par la sélection des composants conformes aux normes pertinentes	Contrôle correspondant aux règles de l'art en la matière	Perte possible de la fonction de sécurité		Perte possible de la fonction de sécurité
1	Par la sélection de composants conformes aux normes pertinentes	Utilisation de constituants et de principes éprouvés	Perte possible de la fonction de sécurité. Probabilité plus faible qu'en B		<ul style="list-style-type: none"> • Pas de redondance sur E • Pas de redondance interne assurée par un relais à contacts liés mécaniquement • Pas de redondance sur S
2	Par la structure des circuits de sécurité	Test par cycle. La périodicité du test doit être adaptée à la machine et à son application	Défaut détecté à chaque test		<ul style="list-style-type: none"> • Redondance ou pas sur les entrées • La boucle de retour permet d'assurer un test cyclique sur la sortie
3	Par la structure des circuits de sécurité	Un défaut unique ne doit pas conduire à la perte de la fonction de sécurité. Ce défaut doit être détecté si cela est raisonnablement faisable	Fonction de sécurité garantie, sauf en cas d'accumulation de défauts		<ul style="list-style-type: none"> • Redondance sur les E • Redondance sur les S
4	Par la structure des circuits de sécurité	Un défaut unique (ou une accumulation de défauts) ne doit pas mener à la perte de la fonction de sécurité. Ce défaut doit être détecté dès, ou avant la prochaine sollicitation de la fonction de sécurité	Fonction de sécurité toujours garantie		<ul style="list-style-type: none"> • Redondance sur les E • Redondance sur les S • La boucle de retour permet d'assurer un test cyclique sur les sorties

1.2.3 Calculs statistiques de PL.

Une fois la machine conçue (sur le papier !), avant de passer à la réalisation, il faut calculer le niveau de performance réellement atteint.

Ce calcul est complexe et ne rentre pas dans le cadre de ce document, il s'appuie sur plusieurs paramètres :

PFH : Probability of Failure per Hour. Probabilité de défaut dans l'heure.

MTTF : Mean Time To Failure. Temps moyen avant défaut (heure).

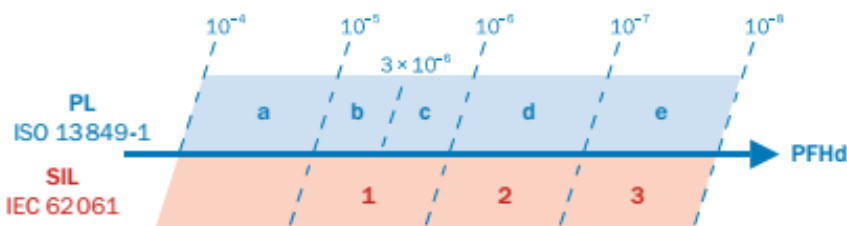
DC : Diagnostic coverage. Couverture de diagnostic.

CCF : Common Cause Failure. Défaut de cause commune.

Ces grandeurs sont fournies par les constructeurs de matériel et sont généralement utilisés dans des logiciels de calcul comme Sistema par exemple.

1.2.4 SIL¹ et PL.

Pour info, la norme IEC 62061 définit un paramètre SIL pour Safety Integrity Level qui correspond en gros au PL en suivant le graphe ci-contre :



¹ CEI 62061 & IEC/EN 61508 ou 61511

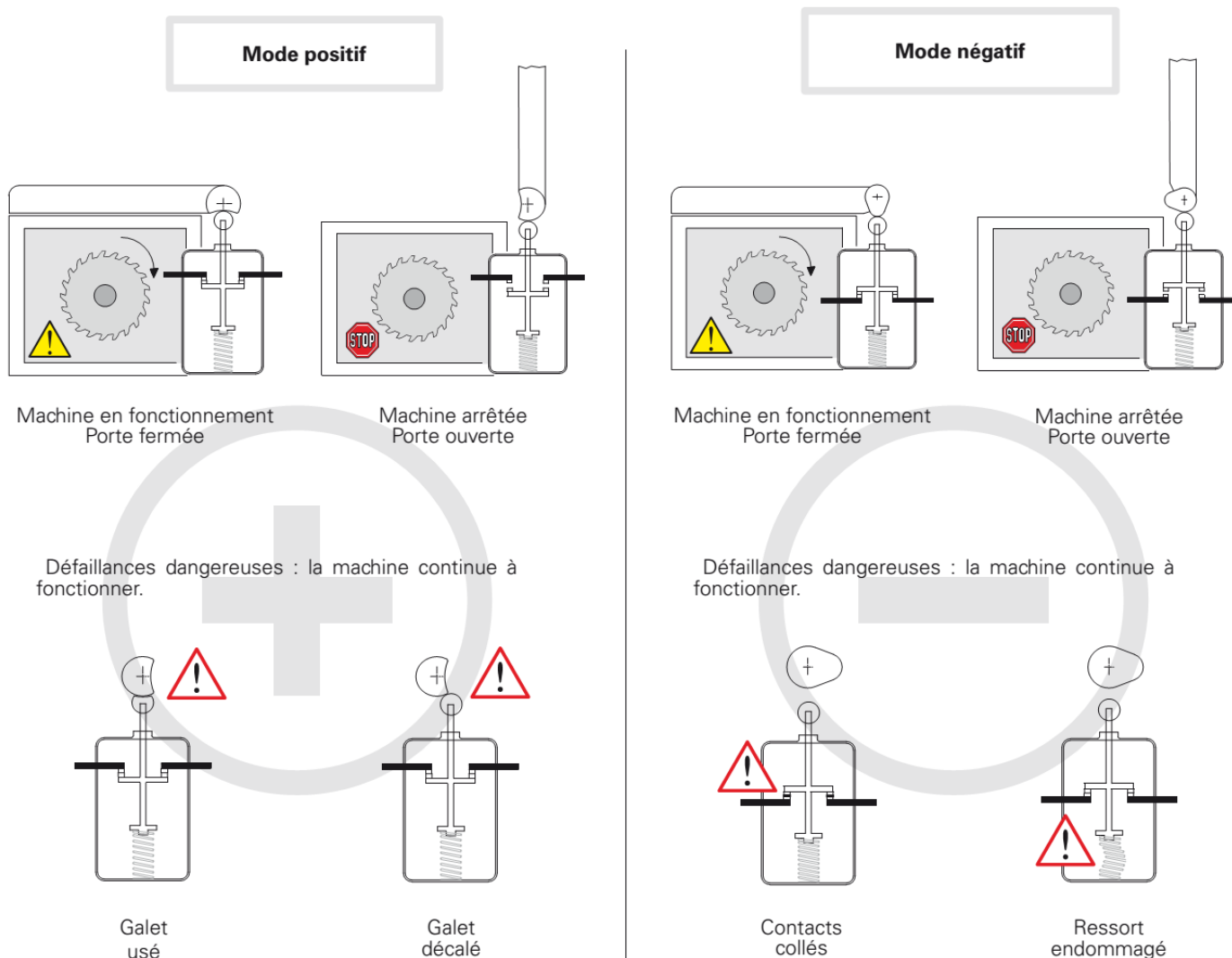
2 Mise en œuvre des principes.

2.1 Matériel.

2.1.1 Contact à ouverture.

Dans une chaîne de sécurité on utilise :
des contacts normalement fermés d'une part (avec action positive voir ci-dessous) ET
le principe de la mémorisation de la marche avec arrêt prioritaire.
Pour les différentes catégories d'arrêts d'urgence, voir le chapitre sur les variateurs de vitesse.

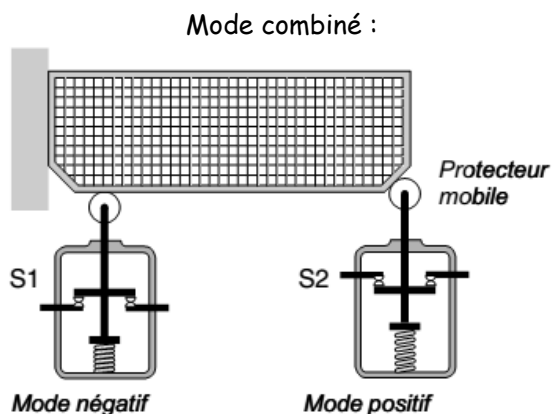
2.1.2 Mode de raccordement (positif ou négatif)



Les deux modes précédents présentent des inconvénients ...

Cependant, en mode négatifs ce sont les défaillances internes aux capteurs qui sont dangereuses. Comme elles sont invisibles, on INTERDIT ce mode là pour privilégier le mode positif qui est plus sûr s'il est accompagné d'une bonne maintenance.

Si on a plusieurs capteurs, on utilise alors le mode combiné qui résout le problème vu ci-dessus.



2.1.3 Logique négative sans retour d'énergie.

2.2 Structures.

2.2.1 Redondance.

La redondance consiste à utiliser plus d'un dispositif ou système, pour garantir qu'en cas de défaillance dans les pièces d'un de ces derniers, un autre soit disponible pour assurer les fonctions de sécurité. Si la première défaillance n'est pas détectée, l'apparition d'une deuxième pourra entraîner la perte de la fonction de sécurité².

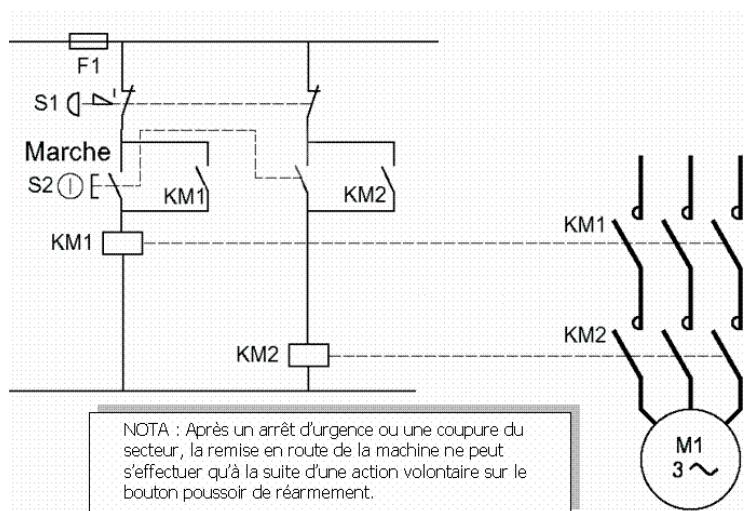
Voir le schéma de synthèse proposé en annexe ...

Sur l'exemple ci-contre :

Cette redondance doit être appliquée sur l'ensemble de la chaîne de sécurité « entrée et sortie ».

Elle consiste à utiliser :

- des BP ou des AU à deux contacts,
- à doubler relais commandés :
- les bobines des relais en //.
- les contacts des relais en série.



<https://fc-elec.pagesperso-orange.fr/>

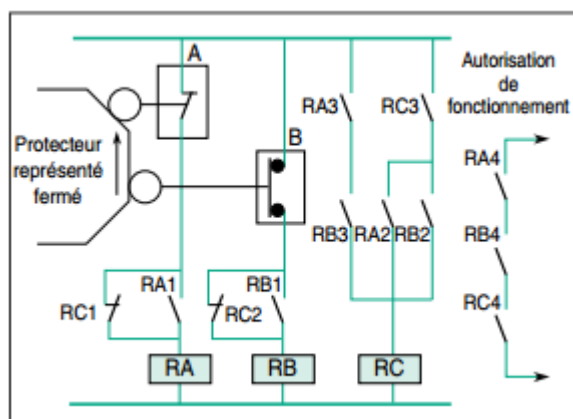
On distingue parois redondance homogène et hétérogène ...

2.2.2 Surveillance.

L'autocontrôle consiste à vérifier automatiquement le fonctionnement de tous les dispositifs qui interviennent dans le cycle de la machine. Le cycle suivant peut être interdit ou autorisé en conséquence³.

On parle aussi d'EDM : External device monitoring.

Contrôle des contacteurs commandés : moyen par lequel l'équipement de protection électro-sensible (ESPE) surveille l'état des éléments de commande qui lui sont externes (CEI 61496-1/EN 61496-1)⁴.



Dans le schéma ci-contre, plusieurs principes sont mis en œuvre :

- Association A mode >0 et B mode <0 du protecteur
- Relayage de A et B avec RA et RB.
- Surveillance de A et B par RC :

$$RC = (RA \cdot RB) + RC \cdot (RA + RB)$$

L'autorisation est elle-même redondante avec !

$$\text{Autorisation} = RA \cdot RB \cdot RC$$

² Doc PIZZATO

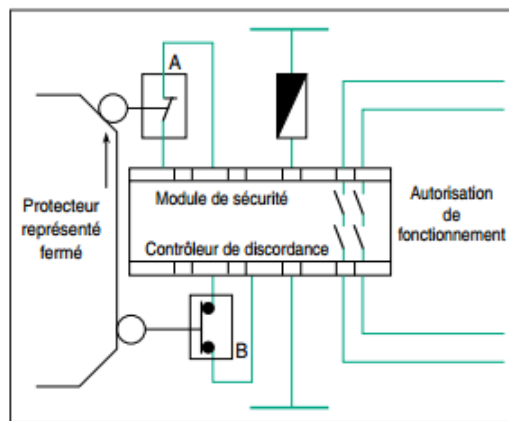
³ Doc PIZZATO

⁴ Doc SICK

Comme il est décrit plus loin, l'utilisation d'un relais de sécurité est avantageuse en gains de temps de câblage. Ci-contre on a la même fonction de sécurité que ci-dessus réalisée avec un banal relais de sécurité.

On peut compter 20 points de connexions (soit 20 vis à serrer), alors qu'en logique câblée ce nombre se monte à 50 !!

En plus du temps de câblage, c'est surtout le risque de défaillance qui se trouve accru par l'augmentation de filerie et de raccordement.



2.3 Options fonctions spéciales.

2.3.1 Redémarrage.

Remise en marche de la machine. Après le déclenchement d'une fonction de protection ou après un défaut, le dispositif de protection peut être réarmé pour autoriser le redémarrage de la machine⁵.

2.3.2 Réarmement.

Remise du dispositif de protection à l'état de surveillance.

- *Le réarmement manuel s'effectue au moyen d'un dispositif séparé à actionner manuellement, par exemple un poussoir de réarmement.*

- *Le réarmement automatique par le dispositif de protection lui-même n'est autorisé qu'exceptionnellement : une personne ne doit pas pouvoir se tenir dans la zone dangereuse sans déclencher le dispositif de protection, ou bien il faut s'assurer que personne ne stationne dans la zone dangereuse pendant et après le réarmement.*

...

Selon la norme ISO 13849-1 (al. 5.2.2), le réarmement ne doit être réalisé qu'en relâchant l'organe de service à partir de sa position active (marche). C'est pourquoi, pour le traitement des signaux, il faut détecter le front descendant du signal du dispositif de commande, c'est-à-dire que l'acquiescement ne doit être réalisé qu'en relâchant l'organe de service de sa position de marche (élément activé). Cet acquiescement ne doit être possible que si toutes les fonctions de sécurité et tous les dispositifs de protection sont opérationnels⁶.

3 Du relais à l'automate.

3.1 Relais de sécurité.

3.1.1 Présentation.

L'ensemble des principes vus ci-dessus peuvent être réalisés en logique câblée.

Cependant la logique câblée est pratiquement plus compliquée à mettre en œuvre et source supplémentaire de défaillance en raison de la quantité importante des raccordements.

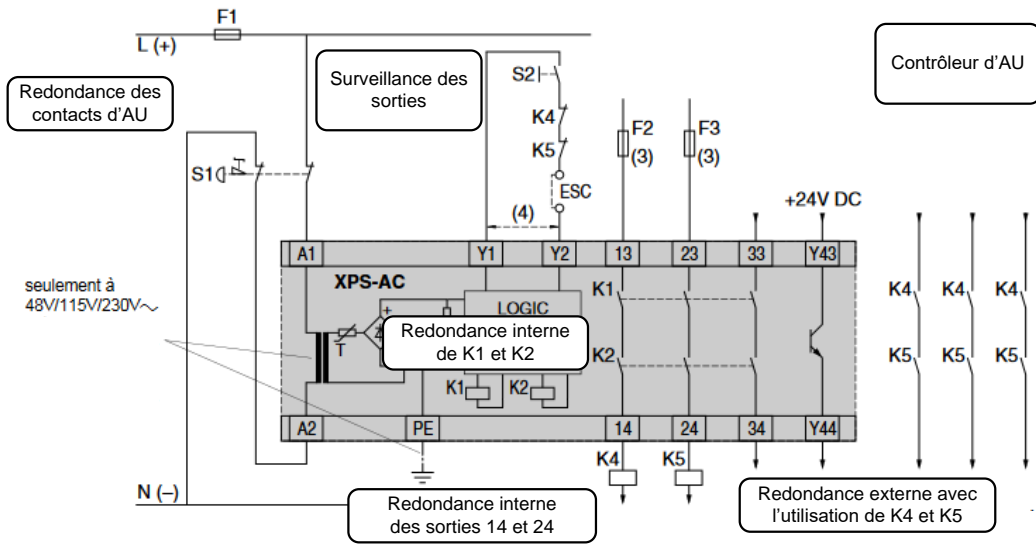
Il est actuellement avantageux de se diriger vers des relais de sécurité qui minimisent les connexions et permettent des réglages difficilement adaptables en câblage (temporisations, seuils etc ...).

Enfin, les relais de sécurité disponibles sur le marché présentent tous une certification de conformité aux normes en vigueur.

3.1.2 Redondance et surveillance.

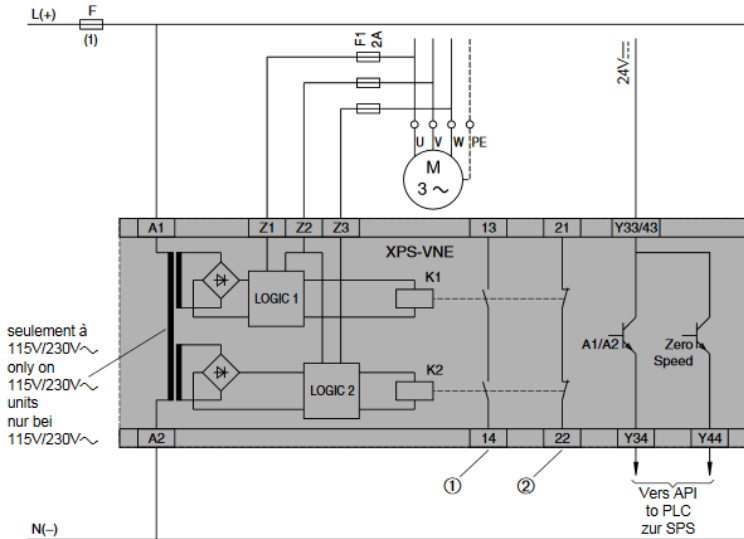
⁵ Doc SICK

⁶ Doc SICK



3.1.3 Options fonctions spéciales.

Vitesse nulle.

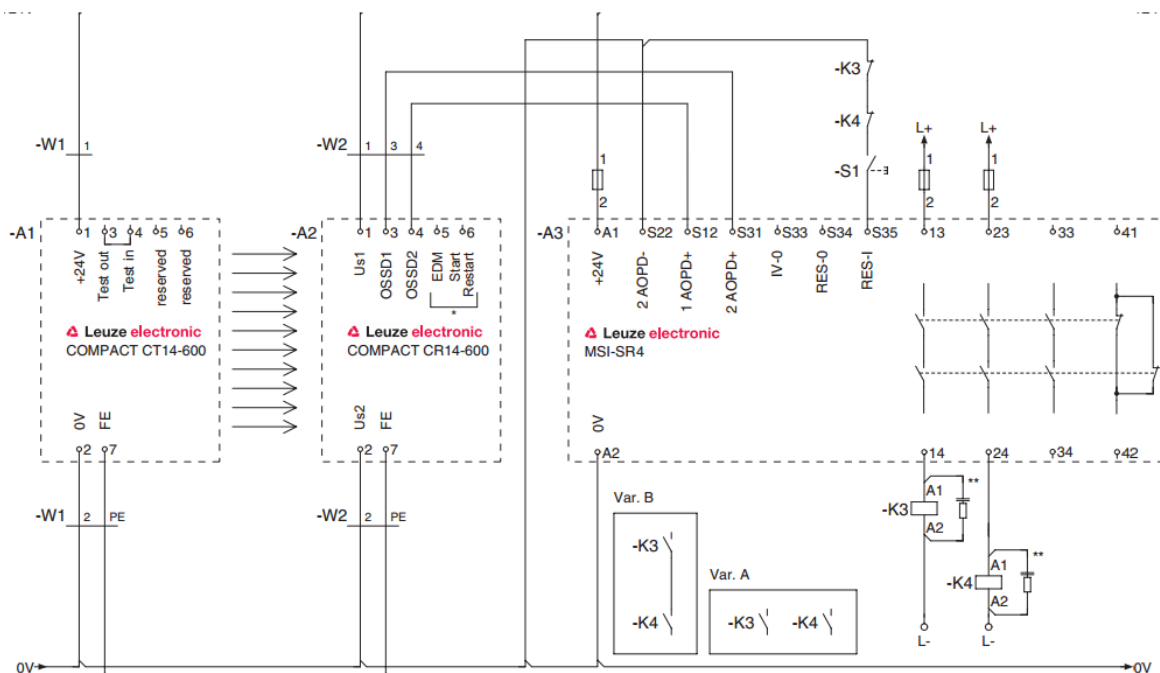


L'appareil XPS-VNE est utilisé pour la détection d'arrêt des moteurs électriques. Il est employé dans les commandes dotées d'un mécanisme d'inversion du sens de rotation ainsi que pour le déblocage du système de verrouillage des protecteurs mobiles.

Lorsqu'ils ralentissent, les moteurs électriques produisent dans leur bobinage une tension rémanente due au magnétisme résiduel, dont la valeur décroît proportionnellement par rapport à la vitesse.

Cette tension rémanente est mesurée de façon redondante par le module de sécurité afin de permettre la détection d'arrêt du moteur.

Barrière immatérielle.



3.2 Automate de sécurité.

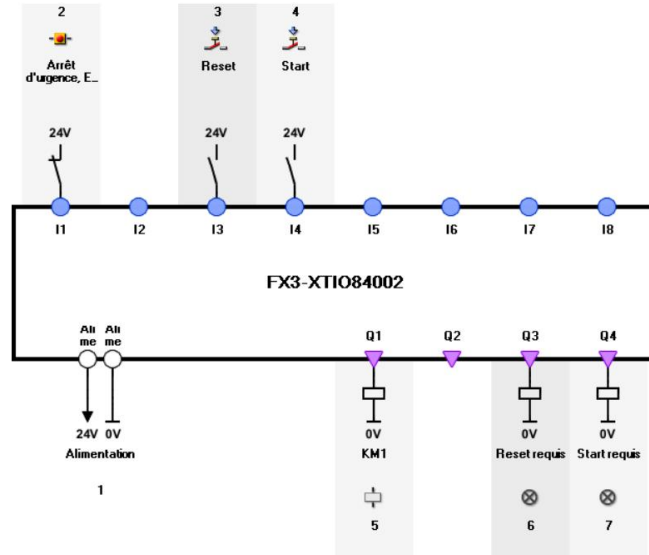
3.2.1 Description.

Un automate de sécurité est un automate auquel sont appliqués les principes de redondance et d'autocontrôle. Ils sont donc constitués de plusieurs microprocesseurs fonctionnant en parallèle et dont les calculs intermédiaires sont régulièrement comparés.

De plus ils disposent le plus souvent de sorties dites « de » sécurité qui sont régulièrement testées physiquement pendant des temps très courts qui ne perturbent pas le fonctionnement de l'ensemble ...

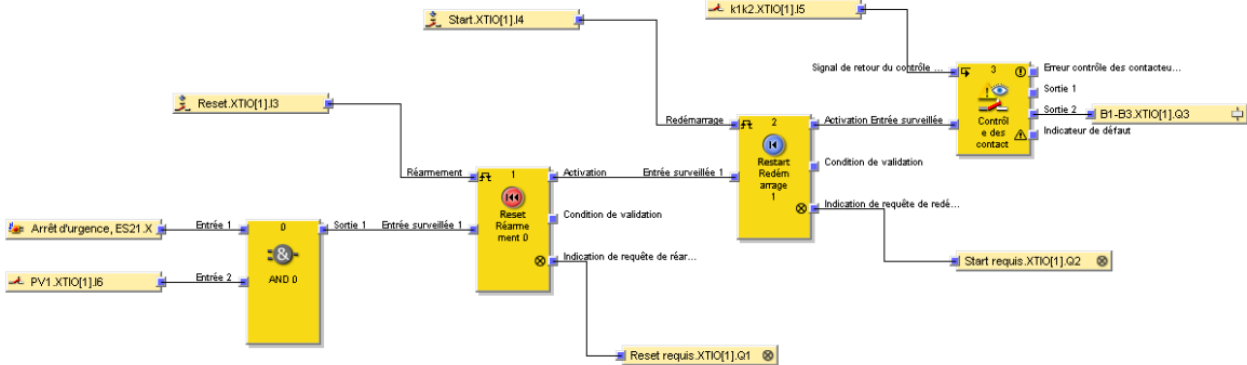
De plus, ils proposent des fonctions spéciales comme le réarmement ou la réinitialisation.

3.2.2 Raccordements.

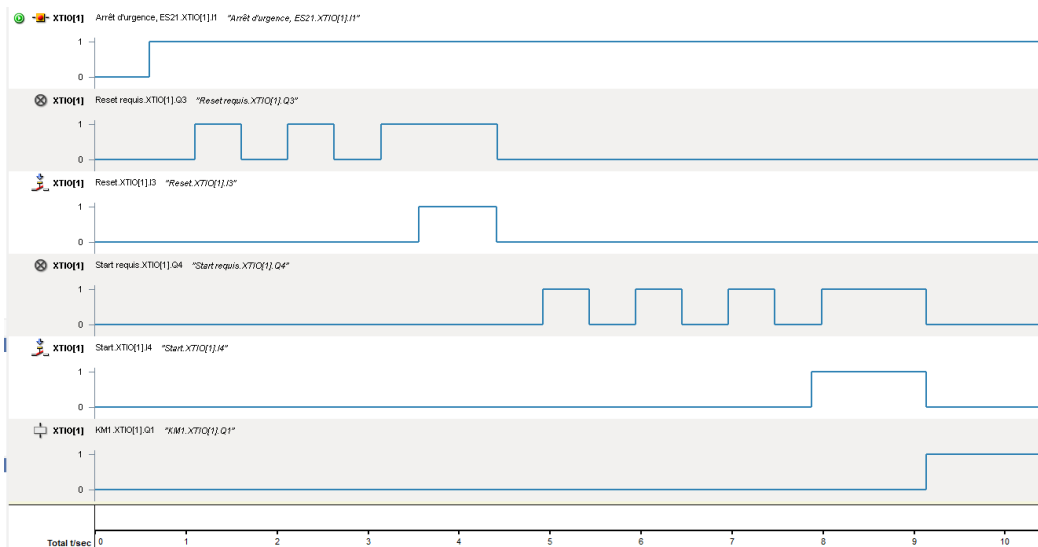


3.2.3 Exemple.

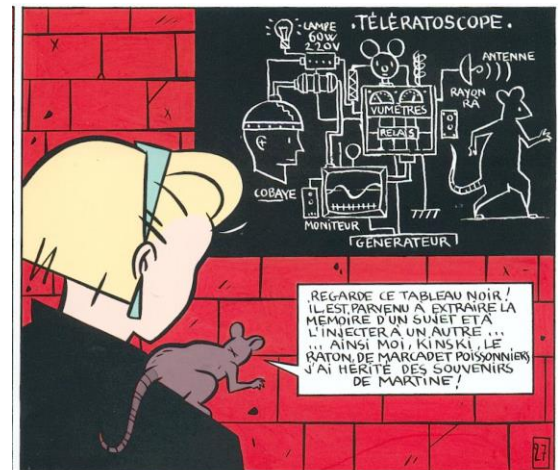
Acquittement, ré armement et surveillance par External Device Monitoring : EDM.



3.2.4 Chronogramme.



Schématisation



(Notes)

1 Principes généraux.

1.1 Introduction.

1.1.1 Avertissement !

Attention, ceci N'EST PAS :

un cours de bac pro sur le schéma,
un inventaire des symboles « normalisés » utilisés dans le domaine électrotechnique,
une liste des schémas de câblage types à connaître par cœur ...

1.1.2 Précision.

Ceci est une synthèse des grands principes qui organisent les schémas régulièrement pratiqués par le détenteur d'un BTS Electrotechnique.

Cette synthèse fait référence à différents documents utilisés durant la formation au lycée du Dauphiné ...

1.2 N°1 : Principe de traduction.

Un schéma, qu'il soit électrique, pneumatique, mécanique ou autre est une traduction graphique d'un fonctionnement. Deux problèmes se posent à l'électrotechnicien :

Lecture : déchiffrer un schéma pour en comprendre le fonctionnement,
(c'est souvent le plus simple).

Ecriture : trouver et rédiger le schéma permettant de décrire un fonctionnement voulu,
(c'est parfois plus délicat) ...

En fin de BTS Electrotechnique, on doit être capable de maîtriser les :

**« Représentations graphiques utilisées dans les domaines
de la conversion d'énergie (1511)
et de la distribution (2138) ».**

1.3 N°2 : Principe d'information.

Un schéma est une simplification de la réalité, cependant il faut utiliser toutes les astuces possibles pour concentrer les informations données !

1.4 N°3 : Principe de progression.

L'établissement d'un schéma se décompose en deux phases indispensables :

La **conception** qui consiste à rechercher au brouillon un schéma répondant à un problème posé (et l'organisation de ce brouillon en vue de faciliter sa lecture et sa saisie).

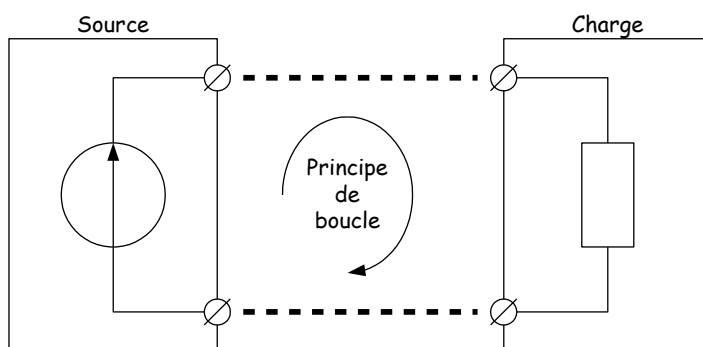
La **saisie** « au propre » d'un schéma, saisie qui est généralement logicielle.

Ces deux phases ont des contraintes qu'il ne faut pas mélanger.

1.5 Auxiliaire : Principe de boucle.

Un schéma électrique de base est **toujours** composé d'une **source** qui alimente une **charge** grâce à des **appareils** (connexion, protection, commutation etc ...) et des **fils**.

Le principe de boucle consiste à vérifier en permanence que ces trois éléments sont présents.



Ce principe est indispensable pour comprendre les raccordements de variateurs, d'automates et de capteurs.

1.6 Représentations.

1.6.1 Multifilaire.

C'est la représentation classique où chaque trait représente un fil des circuits. Classiquement il s'agit de 3 phases du neutre et du conducteur de protection en distribution classique. Dans cette représentation, il faut que chaque phase corresponde avec le câblage réel.

1.6.2 Unifilaire.

Pour simplifier les schémas (en triphasé essentiellement), on peut représenter par un seul trait les différents conducteurs (intérêt : gain de place mais inconvénient : perte d'information) ...

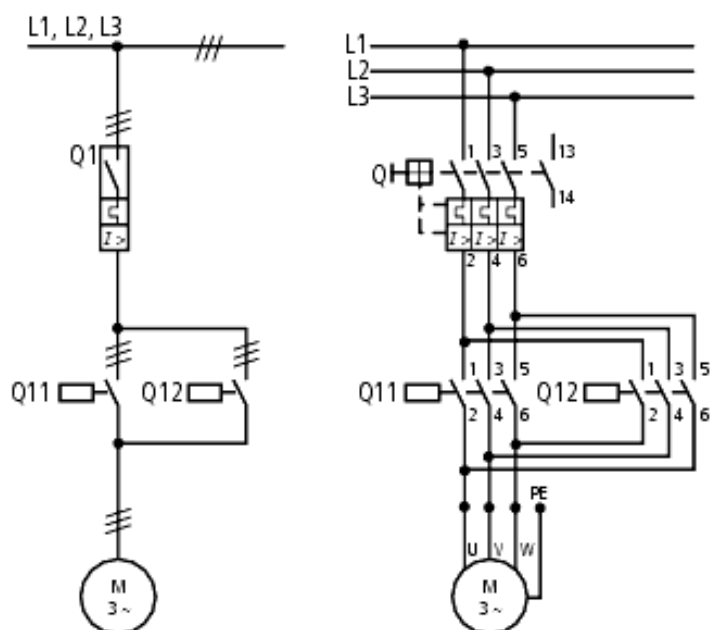
En ce cas on utilise des symboles pour indiquer la constitution du circuit comme indiqué dans le tableau 31A suivant :

Tableau 31A - Explication des symboles suivant la publication NF C 03-211

	Conducteur neutre (N)
	Conducteur de protection (PE)
	Conducteurs de protection et neutre confondus (PEN)

(Voir les exemples donnés au chapitre 4 sur la distribution BT)

1.6.3 Exemple.



Extrait d'une documentation Moeller.

Dans la représentation unifilaire il n'y a pas possibilité de savoir comment s'effectue l'inversion de sens.

En revanche il aurait été possible de représenter l'arrivée du PE sur le moteur en utilisant le symbole correct ...

2 Distribution.

2.1 HTA.

(Voir le chapitre 3 et les TP et TD qui vont avec).

En HTA, les schémas sont quasiment toujours **unifilaires** et souvent maillés.

Les circuits des postes de transformation sont le plus souvent « visuels », en se présentant comme une vue de face des cellules qui le composent ...

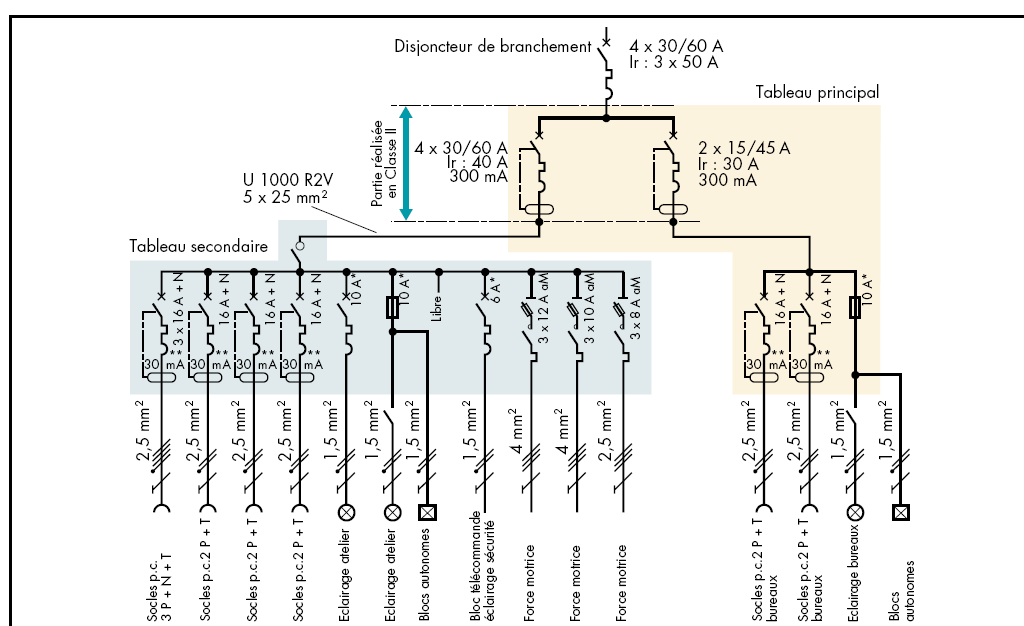
2.2 Basse tension.

2.2.1 Schéma de répartition (voir tertiaire).

Ce type de représentation met l'accent sur la **structure radiale et arborescente** de la distribution de l'énergie. On choisit ces schémas pour mettre en évidence la répartition fonctionnelle des circuits de puissance d'une installation.

Généralement, cela organise aussi la sélectivité des protections.

2.2.2 Exemple d'une petite installation domestique.



Documentation Promotelec

3 Tertiaire.

3.1 Schéma (ou plan) d'implantation (ou architectural).

3.1.1 Définition.

Cette représentation permet de localiser les différents appareils sur un plan architectural ainsi que les interactions entre eux-ci.

3.1.2 Exemples.

(Voir en annexe les circuits éclairage et prises ...).

3.2 Schéma de réalisation.

3.2.1 Définition.

Qu'il soit **unifilaire** ou **multifilaire**, c'est un mélange entre un schéma développé et un schéma architectural. Il permet d'anticiper les câblages et les raccordements en situation quasiment réelle ...

Il est cependant très vite trop complexe pour être utilisé efficacement !

3.2.2 Exemple.

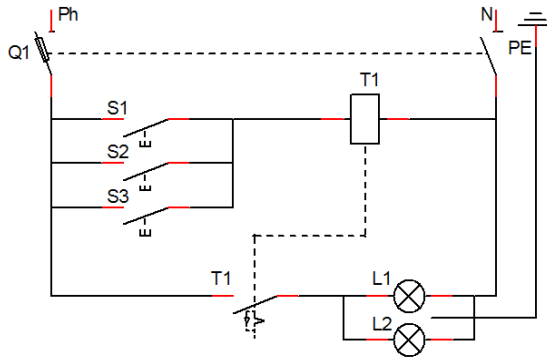
(Voir les TD proposés en organisation de chantier).

3.3 Schéma développé (ou de principe).

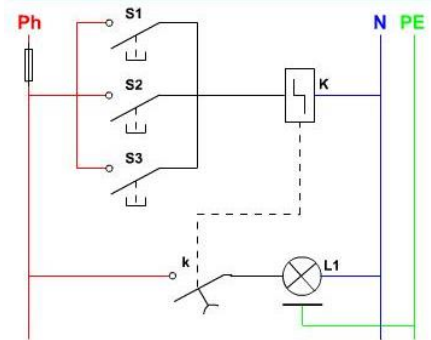
3.3.1 Définition.

Ce schéma explique le fonctionnement du circuit en le développant.

3.3.2 Exemples :



Télérupteur



Minuterie

4 Schéma industriel.

4.1 Organisation d'un folio.

4.1.1 Cartouche.

(Voir fiche synthèse).

Exemples vus en TP :

REGIME DU NEUTRE		ARMOIRE							
TNC		Marque	Type	Matiere	Fond	Dimensions			IP
TENSION	B1 B2					H	L	P	
Ic/c:	19,8 KA								


 3 Allée Pierre Curie
 91230 MONTGERON
 TEL: 01 69 52 47 00
 FAX: 01 69 52 47 01
 E-MAIL: seguin@automatismes-seguin.fr

Ce dessin est notre propriété. Il ne peut être exécuté, reproduit

CLIENT ET NOM DU DOSSIER / CUSTOMER AND NAME OF FOLDER			INDICE
E.T.D.E.			REVIEW
RESERVOIR SOUS-TERRE NORD			1
DESSINATEUR DRAWER	S.R	FOLIO SHEET	07/09
N° AFFAIRE N° PROJECT	03047.1	AUTOCAD	

ed or transmitted without autorisation (law 11 march 1957)

Les cartouches rassemblent d'abord les informations « administratives » : entreprise, client, adresses, contacts, dessinateur etc ...

Ils peuvent aussi donner des informations techniques générales : schéma de liaison à la terre, caractéristiques électriques à l'origine etc ...

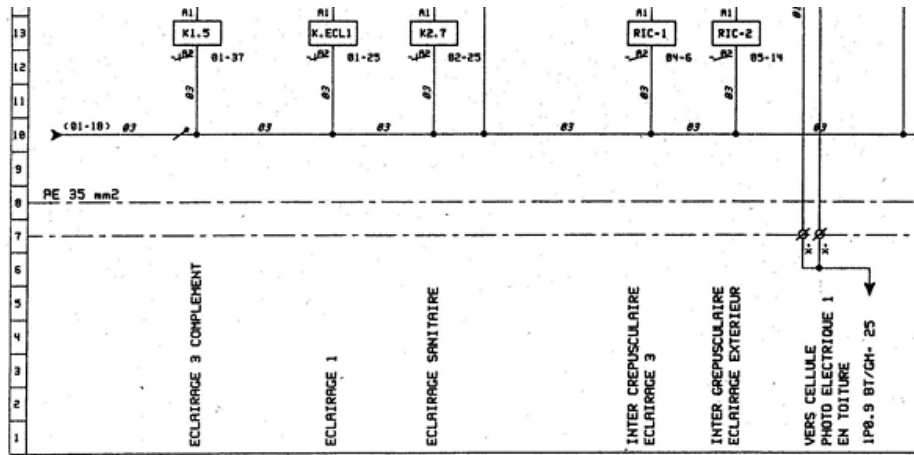
4.1.2 Répartition fonctionnelle en colonne.

(Voir fiche synthèse).

« Les circuits doivent être montrés de façon à faciliter la compréhension de leur fonction aussi bien que la maintenance et la localisation de défauts. Les caractéristiques relatives à la fonction des appareils de commande et des composants qui ne sont pas évidentes à partir de leur représentation symbolique doivent être incluses dans les schémas à côté du symbole ou référencées en note de bas de page. » (NFEN60204)

4.1.3 Zone d'information.

Elle est généralement située dans la partie basse du Folio et peut contenir les informations nécessaires à la lecture et à la bonne compréhension du schéma : définition ou localisation des départs, constitution des circuits.



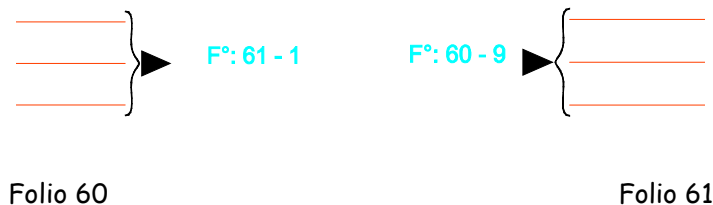
4.1.4 Renvois.

Pour des raisons esthétiques ou, lorsque les schémas deviennent trop imposants (plusieurs folios) il est nécessaire d'insérer des liens entre ceux-ci.

On parle de renvois, de tenant et d'aboutissant,

Ces renvois indiquent la continuité électrique des conducteurs d'un folio vers un autre.

Généralement les renvois de folio contiennent les informations de liaisons pour faciliter la navigation.



Folio 60

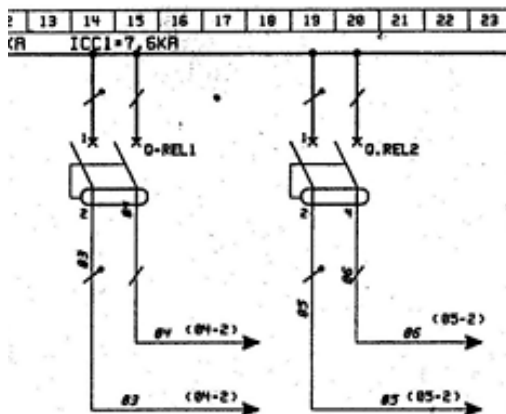
Folio 61

Dans le cas ci-dessus les trois phases :

- ❖ proviennent du folio 60 à la colonne 9 et
- ❖ vont vers le folio 61 à la colonne 1.

Dans le cas ci-contre, les renvois vont respectivement vers :

- ❖ le folio 01 à la colonne 2
- ❖ le folio 05 à la colonne 2 aussi.



4.2 Repérages.

4.2.1 Composants.

Les composants portent un nom (ou repère) qui leur est propre et unique. Leur symbole en donne la fonction (interrupteur, disjoncteur, sectionneur, contacteur, travail, repos, instantané etc ...), voir en annexe. Ces symboles sont normalisés mais il faut connaître les différentes représentations et savoir s'adapter !

Représentation au repos :

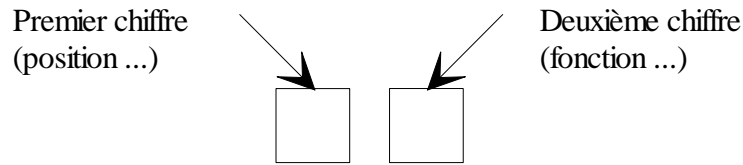
« Les symboles des appareils de coupure doivent figurer sur les schémas électromécaniques avec toutes les alimentations au repos et avec la machine et son équipement électrique dans les conditions normales de démarrage. » (NFEN60204)

Repérage des bornes.

Le repérage des contacts n'est, à l'heure actuelle, pas effectivement normalisé. Il existe cependant des règles, plus ou moins logiques, qui permettent de décoder rapidement un schéma électrique en établissant un lien entre symbole et réalité physique.

Les chiffres seuls sont réservés aux pôles de puissance : impairs pour les entrées, pairs pour les sorties.

Les nombres à deux chiffres concernent généralement les contacts auxiliaires utilisés dans la partie commande. Leur signification est la suivante :



Pour les premiers chiffres :

- 1/2 : contact auxiliaire intégré (13/14 ou 21/22)
- 1/2/3/4 : contact de relais
- 5/6/7/8 : contact additif
- 9 : protection (95/96 ou 97/98)

Pour les seconds chiffres :

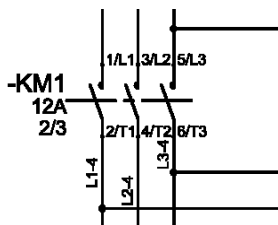
- (1/2) : contact normalement fermé (ou à ouverture).
- (3/4) : contact normalement ouvert (ou à fermeture).
- (5/6) : contact normalement fermé spéciaux.
- (7/8) : contact normalement ouvert spéciaux.

4.2.2 Références croisées.

Le système de références croisées permet d'indiquer où se trouvent les autres parties d'un composant complexe éclaté sur plusieurs folios comme par exemple :

- ❖ un contacteur : bobine ; contact de puissance ; contacts auxiliaires
- ❖ un disjoncteur : pôles de coupure ; auxiliaires de signalisation ; organe de commande (MX, MN ...).

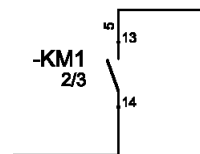
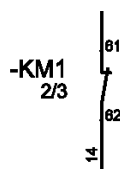
Folio n°1 colonne n°4



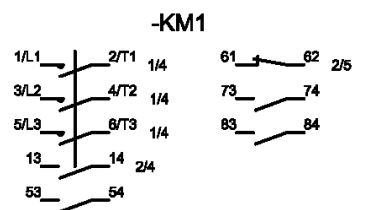
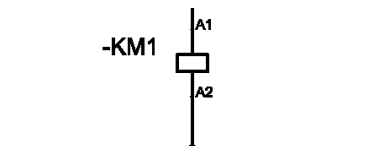
Les pôles de puissance de KM1 se trouvent au folio 1 colonne 4, dans les attributs est indiqué « : « 2/3 » l'emplacement de la bobine de commande (folio 2 colonne 3) ...

Sous la bobine de KM1 sont rappelés les contacts disponibles ainsi que l'emplacement de ceux utilisés :

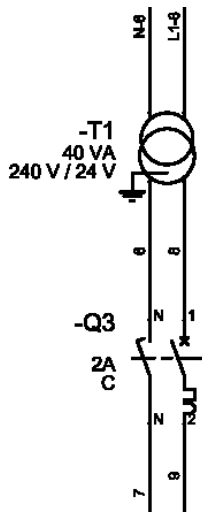
- Folio 1 colonne 4 pour les pôles de coupure,
- Folio 2 colonne 4 pour l'auto maintien,
- Folio 2 colonne 5 pour le verrouillage électrique ...



Folio n°2 colonne n°3



4.2.3 Repérage équipotentiel.



Le repérage équipotentiel permet d'identifier les conducteurs qui sont au même potentiel ce qui est pratique en cas de recherche de panne par exemple !

Ce repérage peut être constitué de simples numéros comme en aval du transformateur T1 ci-contre. Dès qu'un fil traverse un composant autre qu'un bornier son repérage change.

Dans certains cas le repérage équipotentiel indique aussi une polarité du circuit comme en amont du transformateur T1 ci-contre où l'une des bornes d'alimentation est reliée au neutre et l'autre à la phase L1 ...

4.2.4 Couleurs.

Enfin, selon les capacités du logiciel de saisie et la richesse du bureau d'étude, il est possible de distinguer les différents types de circuits présents dans le schéma ...

Classiquement le neutre est en bleu clair, le PE et toutes ses variantes en vert/jaune les phases en rouge et les autres circuits en vert, violet etc ...

4.3 Délocalisation et borniers.

4.3.1 Boîtes noires.

(Voir fiche synthèse).

4.3.2 Borniers.

(Voir fiche synthèse).

4.4 Nomenclatures. (Voir fiche synthèse).

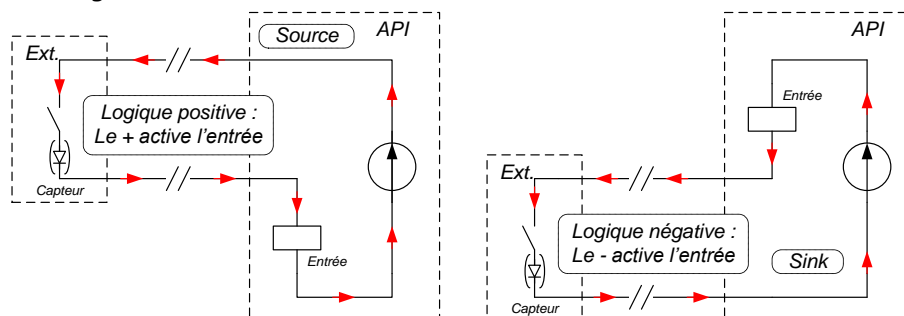
5 Raccordements.

5.1 Automatismes et capteurs.

5.1.1 Conseil : principe de boucle ET symbole interne ...

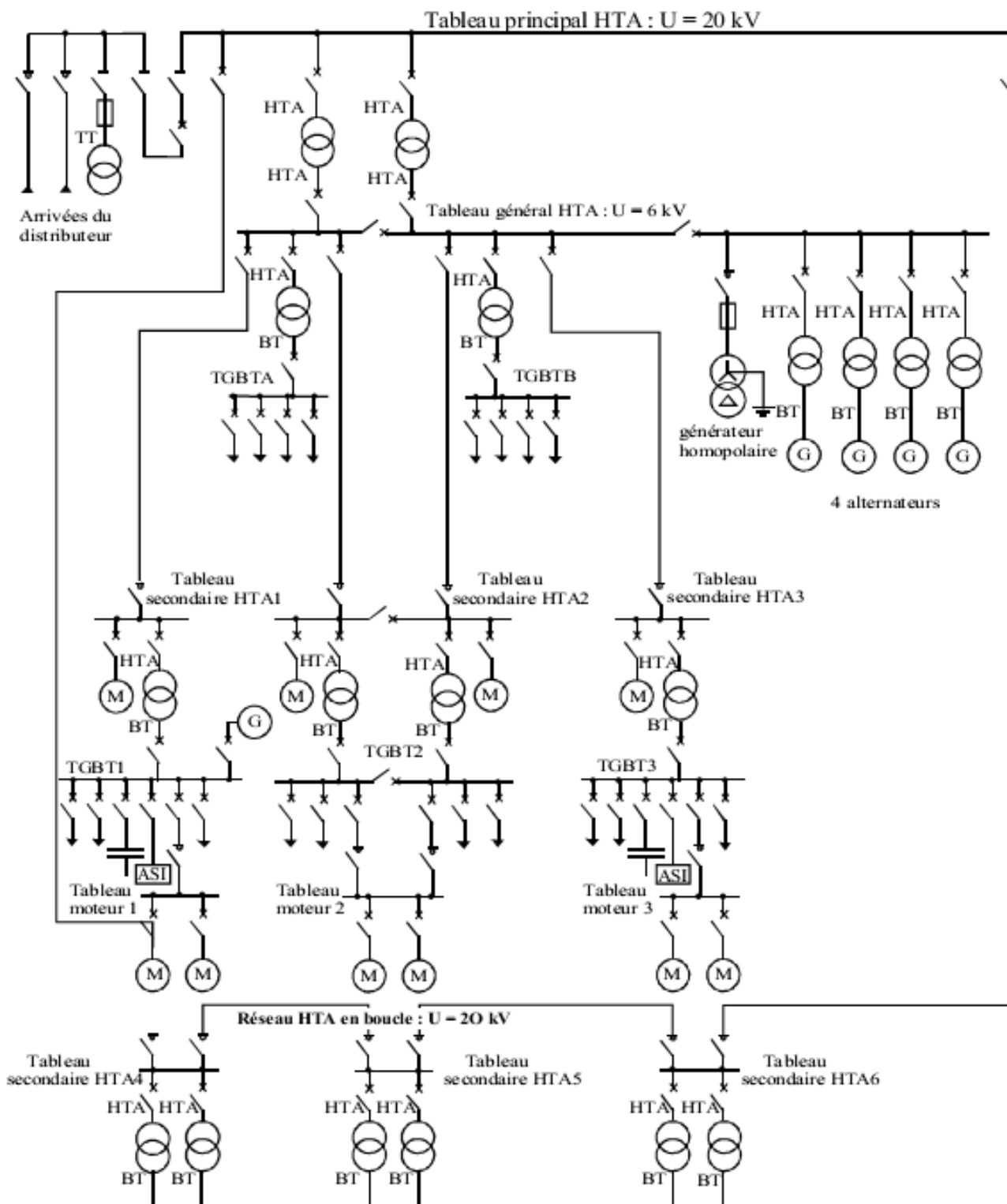
Il faut TOUJOURS dessiner les circuits internes des « boîtes noires » du type Automate, variateur, démarreur, capteur, centrale de mesure etc ...

5.1.2 Logique positive ou négative.



5.1.3 Entrée/sortie analogiques tension.

5.2 Schéma HTA.



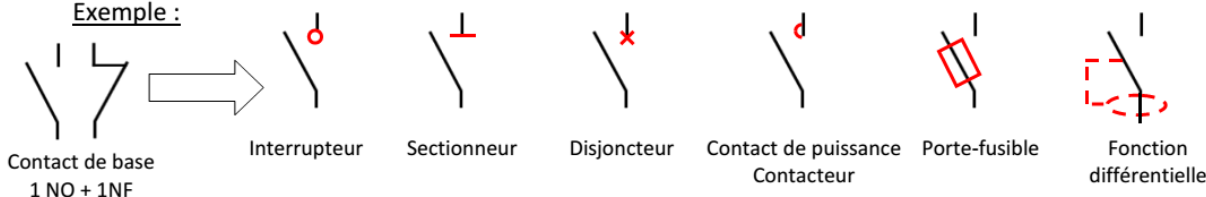
Surligner en rouge le niveau 20 kV, en bleu le niveau 6 kV et en jaune le niveau basse tension.

5.4 Symboles :

Les symboles électriques sont toujours liés à un état électrique (ouvert ou fermé) et à une fonction : Protéger, isoler, commander ...

Leur représentation correspond donc à un contact NO ou NF (Normalement Ouvert ou Normalement Fermé) auquel on associe un symbole pour la fonction.

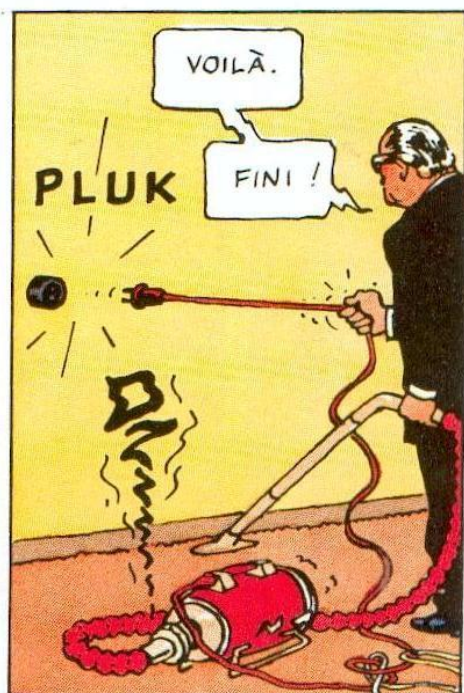
Exemple :



	SYMBOLE	NOM	FONCTION
COMMANDE ET PROTECTION		Disjoncteur Unipolaire Neutre +	Assurer une protection des matériels contre les courts-circuits et les surcharges. Seul le pôle de phase assure la protection mais la coupure est réalisée sur la phase et le neutre.
		Disjoncteur bipolaire	Assurer une protection des matériels contre les courts-circuits et les surcharges. Les pôles assurent la protection (circuit thermique et magnétique). Existe en tri ou tétra.
		Contacteur Tripolaire	Commander les récepteurs électriques de forte puissance : Moteurs, Résistances de Chauffage, Eclairage ... Existe aussi en bipolaire et tétrapolaire.
		Interrupteur sectionneur Tétrapolaire	Commander en interrupteur la mise sous tension des armoires électriques. Assure aussi le sectionnement, afin d'isoler l'équipement lors d'une intervention
		Disjoncteur Moteur	Assurer la protection des moteurs asynchrones contre les court-circuits et les surcharges.
		Disjoncteur différentiel Magnéto-thermique	Assurer la protection des personnes avec la fonction différentielle. (cercle en pointillés) Assurer la protection des matériels.
		Relais thermique	Assurer la protection des moteurs asynchrones contre les risques de surcharge. La coupure en cas de défaut est assurée par le contact NF sur la partie commande.
		Sectionneur portes fusibles.	Assurer la protections des matériels grâce aux fusibles. Assurer la fonction de sectionnement.
		Transformateur	Permettre d'abaisser ou d'élever une tension alternative. Il est composé d'un circuit magnétique et de deux enroulements primaire et secondaire distincts.
	Convertisseur	Permettre de convertir une grandeur électrique. Exemple : - AC ⇔ DC : Redresseur = Alimentation CC - DC ⇔ AC : Onduleur	
RECEPTEURS		Moteur Asynchrone Triphasé	Moteur le plus courant au niveau des applications industrielles: Convoyeur, levage, ventilation
		Résistances couplées en Etoile.	Résistances utilisées pour les applications de chauffage. Four, traitement thermique, thermoformage...
		Condensateurs couplés en triangle	Ensemble de condensateurs raccordés en triangle. Utilisé pour la compensation d'énergie réactive.

Bonne chance
pour l'examen !!

\| \| \| \| \| \| \| /
'(°..°)'
..ooO Ooo..



C'EST
TOUT
POUR
AUJOURD'
HUI.

Lycée du Dauphiné
Bd Remy Roure BP 1113
Romans sur Isère Cedex 13

D. COURT
didier.court@ac-grenoble.fr
<http://courtd2.free.fr/>

Complément Moodle : <https://moodle.ac-grenoble.fr/>