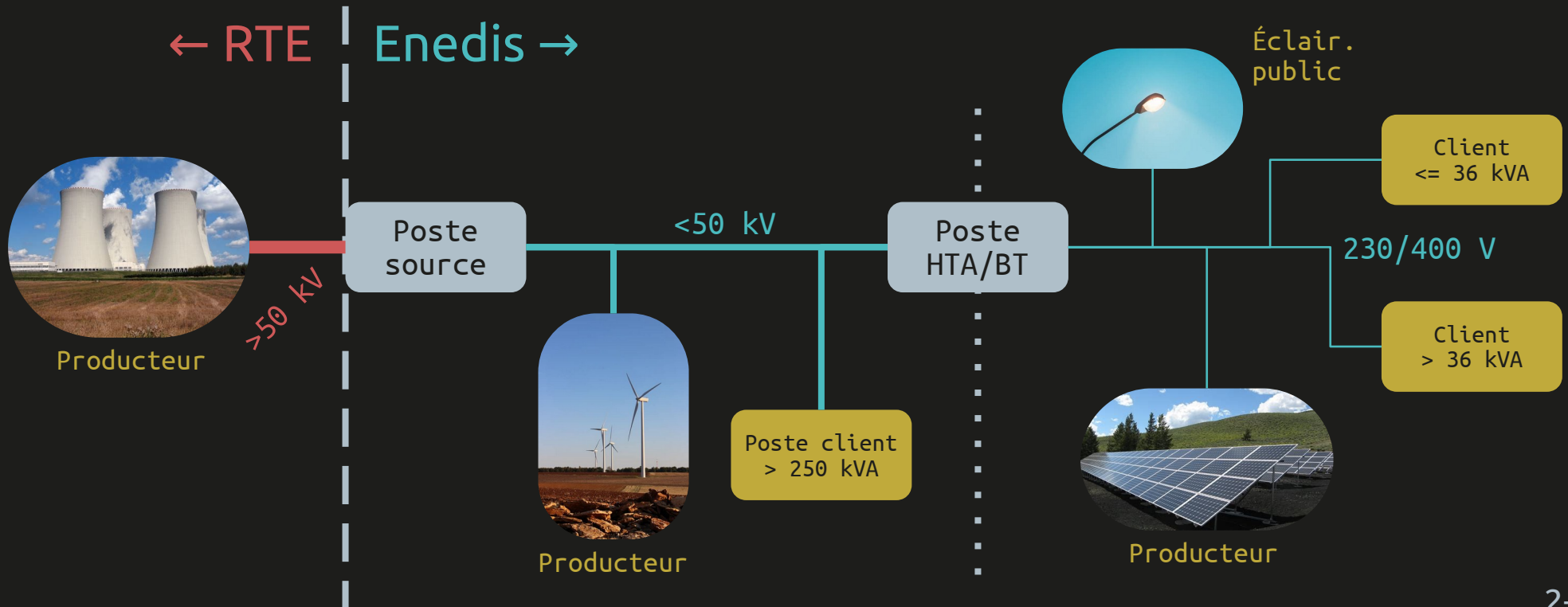


Chapitre 2

Transport et Distribution



Plusieurs acteurs sont présents sur le réseau électrique français.



La production d'électricité en France est assurée par des entreprises et particuliers.

La très grande partie de la production française est réalisée par EDF.



Production électrique française en 2020

Répartition de la production par filière



335,4 TWh

67,1 %

Nucléaire



65,1 TWh

13 %

Hydraulique



39,7 TWh

7,9 %

Éolien



37,6 TWh

7,5 %

Thermique fossile



12,6 TWh

2,5 %

Solaire



9,6 TWh

1,9 %

Bioénergies

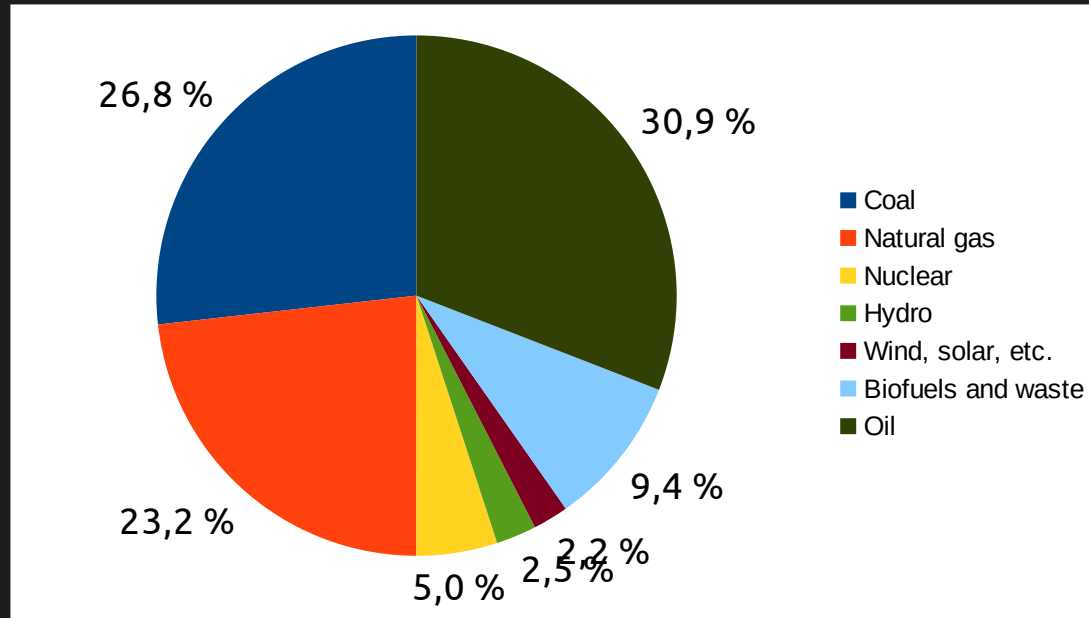
Production totale de 500,1 TWh.

Note : baisse de 7% (37,4 TWh) par rapport à 2019, plus bas niveau depuis 20 ans.

Le mix énergétique au niveau mondial est bien différent !

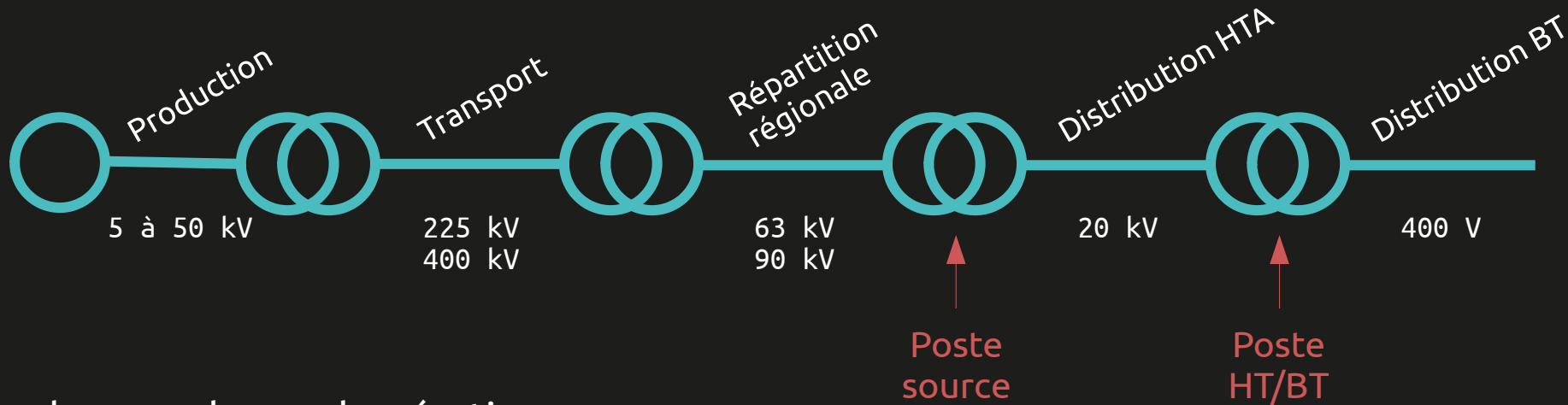
Production totale de 168,5 PWh en 2019 (≈ 313 fois la production française 2019).

Les énergies fossiles représentent 81 % de la production mondiale (7,5 % en France en 2020).

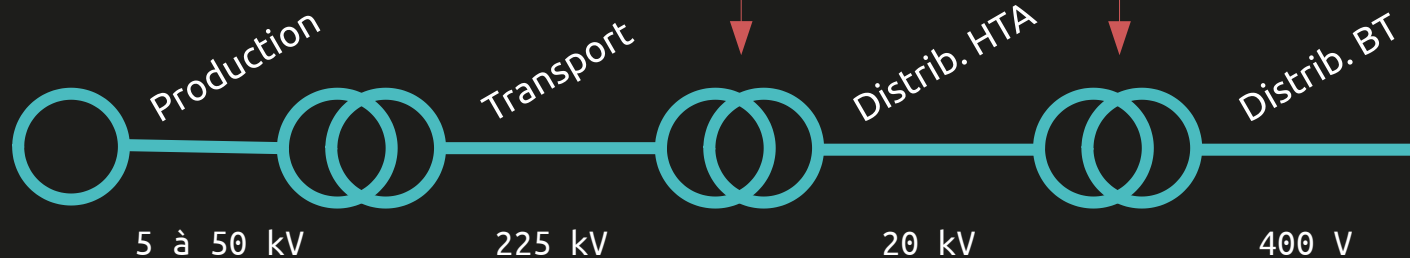


Structure du réseau

Sur de longues distances



Cas des grandes agglomérations



Les niveaux de tension sont définis par les normes NF C 15-100 et NF C 13-200.

		Courant alternatif	Courant continu	Valeurs usuelles En France
Très Basse Tension	TBT	$U_n \leq 50 \text{ V}$	$U_n \leq 120 \text{ V}$	12 – 24 – 48 V
Basse Tension	BT	$50 \text{ V} < U_n \leq 1 \text{ kV}$	$120 \text{ V} < U_n \leq 1,5 \text{ kV}$	230 – 380 – 400 V
Haute Tension	HTA	$1 \text{ kV} < U_n \leq 50 \text{ kV}$	$1,5 \text{ kV} < U_n \leq 75 \text{ kV}$	5,5 – 6,6 – 10 – 15 – 20 – 36 kV
	HTB	$U_n > 50 \text{ kV}$	$U_n > 75 \text{ kV}$	63 – 90 – 150 – 225 – 400 kV

La gestion du réseau électrique est confiée à deux entités distinctes.

RTE (Réseau de Transport de l'Électricité) assure le **transport** sur le **réseau HTB** (de 63 kV à 400 kV).



Enedis assure la **distribution** aux consommateurs sur les réseaux **HTA** (< 50 kV) et **BT** (230 V et 400 V).



Ces deux entreprises sont des filiales d'**EDF** (Électricité De France).



Note : nous ne parlerons pas dans ce cours des fournisseurs d'électricité qui assurent la facturation au client, sans *forcément* gérer la production ni la distribution. Disons simplement que ce marché est ouvert depuis 2007 et les acteurs aujourd'hui nombreux.

TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ





RTE (Réseau de Transport d'Électricité) est le garant du transport de l'énergie électrique en France.

L'électricité provient des gros producteurs nationaux (centrales) ou de ses homologues étrangers. L'énergie se dirige ensuite vers le réseau de distribution (géré par Enedis).

Derrière la "simple" consigne de transport de l'électricité sous haute tension, RTE se doit de garantir l'équilibre entre production et consommation d'électricité au niveau de la France métropolitaine afin de prévenir les black-outs.

TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ

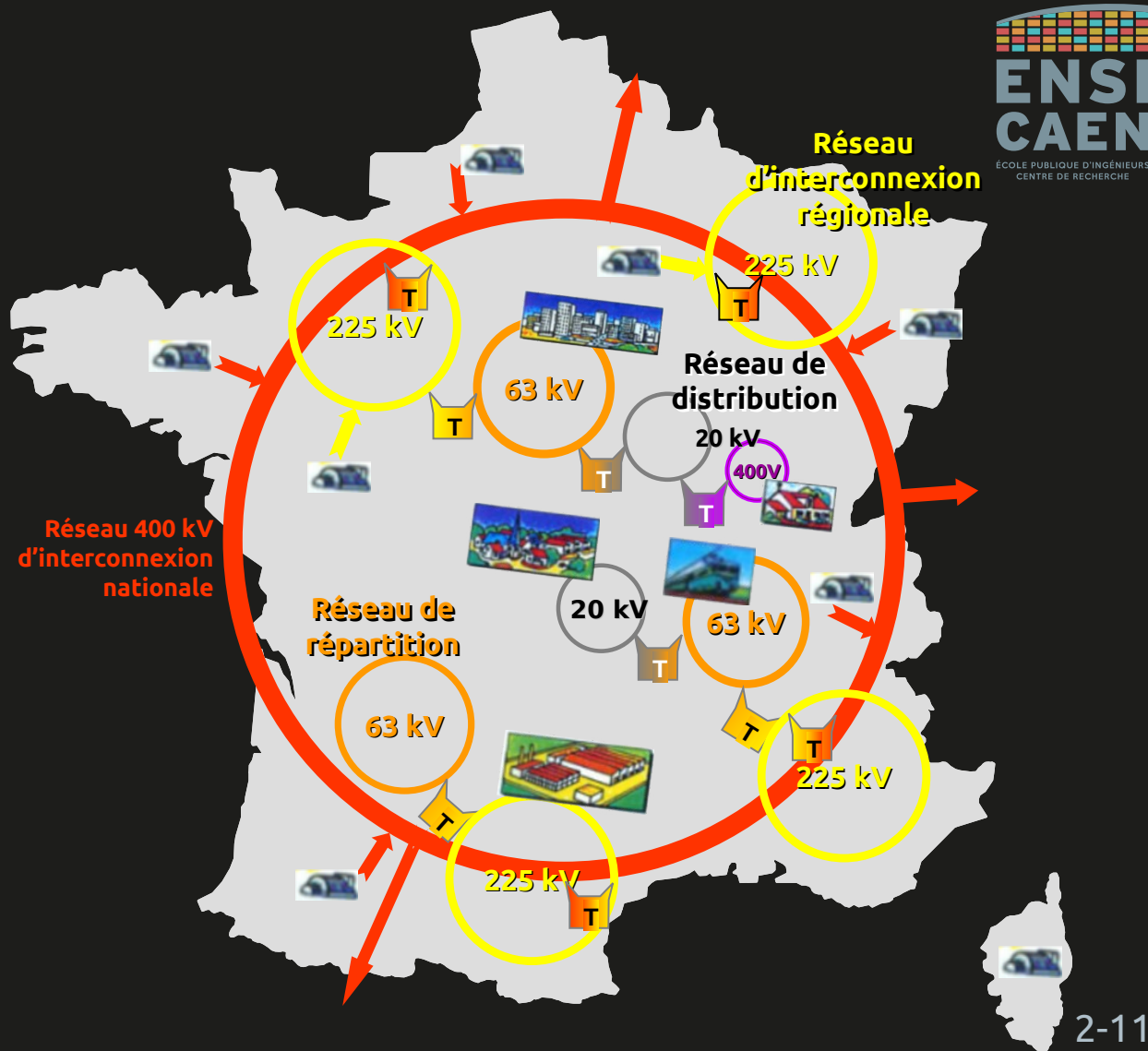
Réseau de transport

Schéma simplifié du réseau de transport géré par RTE.

Le **réseau d'interconnexion nationale** se charge de récupérer l'énergie fournie par les producteurs mais aussi des échanges avec les nations voisines.

C'est un réseau maillé.

Les **réseaux d'interconnexion régionale** sont au nombre de 7 fait l'intermédiaire entre le réseau d'interconnexion nationale et le réseau de distribution Enedis, permettant de jouer plus finement sur les producteurs et consommateurs.



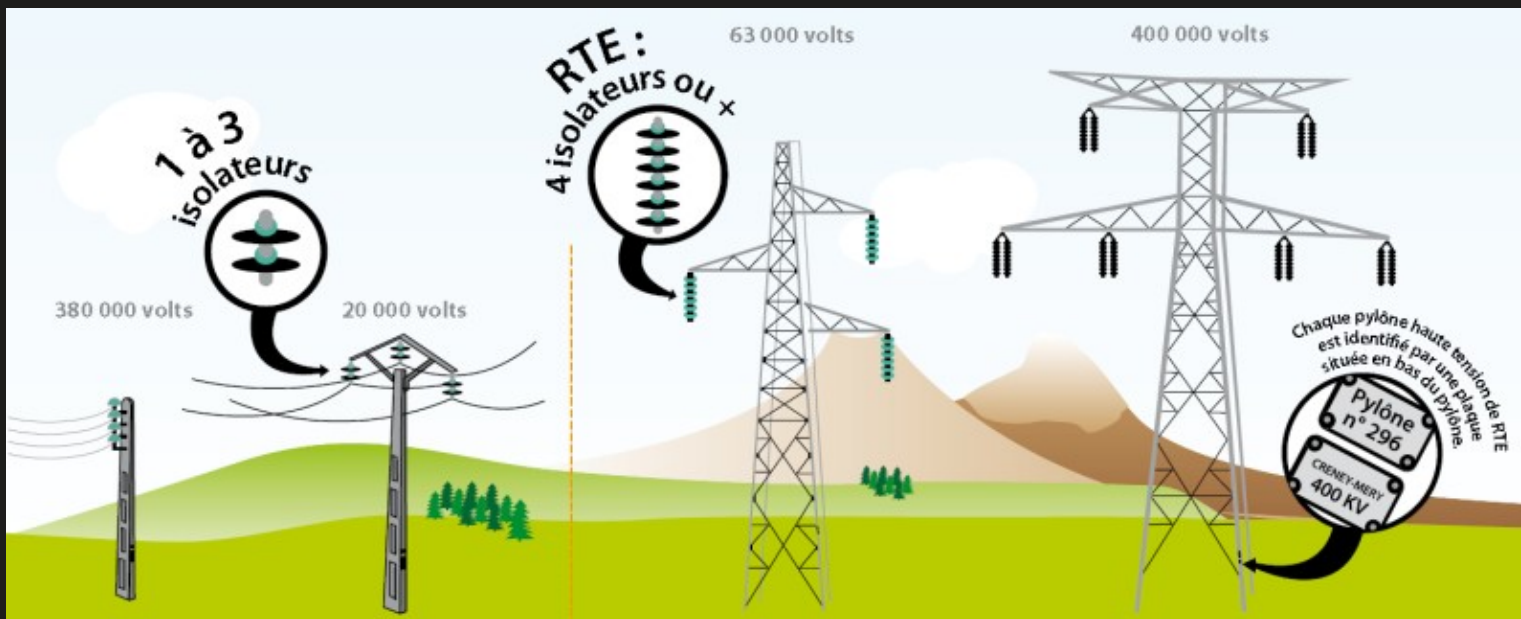
Réseau de transport 225 kV et 400 kV



Comment reconnaître le réseau en fonction des lignes ?

Plus la tension de ligne est élevée, plus les pylônes sont hauts : jusqu'à 90 m pour une ligne de 400 kV !

Les lignes BT (230 V) et HTA (~ 20 kV) sont plutôt en bois ou béton, et mesurent entre 10 et 14 m.



Source :
Pascal Zugaj,
Enedis (2017)

Poste d'interconnexion
à la frontière avec le
Royaume-Uni.

Les Mandarins, Pas de Calais.

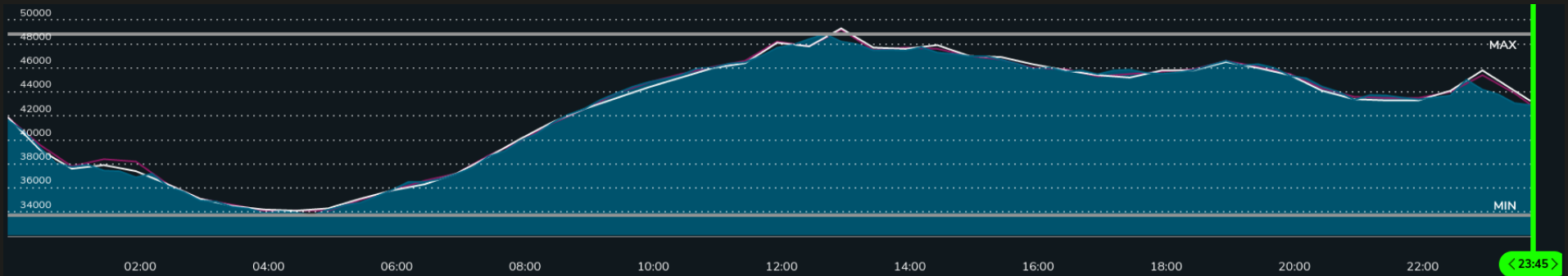
Le poste est relié au
réseau d'interconnexion
nationale (400 kV).

YouTube :

Un convertisseur AC/DC de 320 000V ?
Visite de la ligne HVDC France – Italie avec
RTE !



Observons la consommation électrique nationale et son allure très caractéristique.



Consommation nationale au mardi 09/08/2022 et du 08/08 au 21/08/2022.

<https://www.rte-france.com/eco2mix/synthese-des-donnees?type=consommation>









TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ



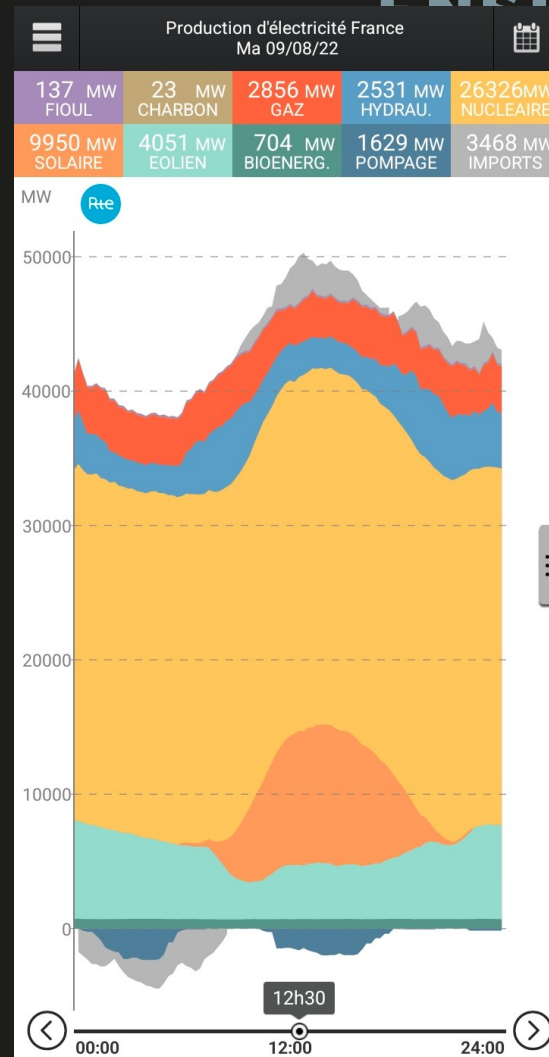
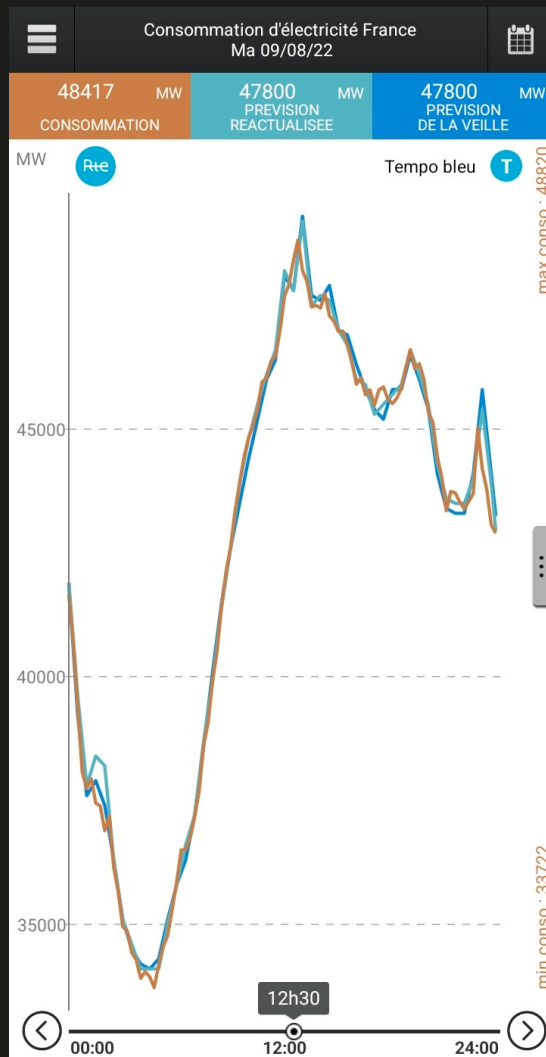
Ajuster production et consommation

RTE se doit notamment d'assurer l'**équilibre strict** entre production et consommation, sachant que l'un est l'autre variant !

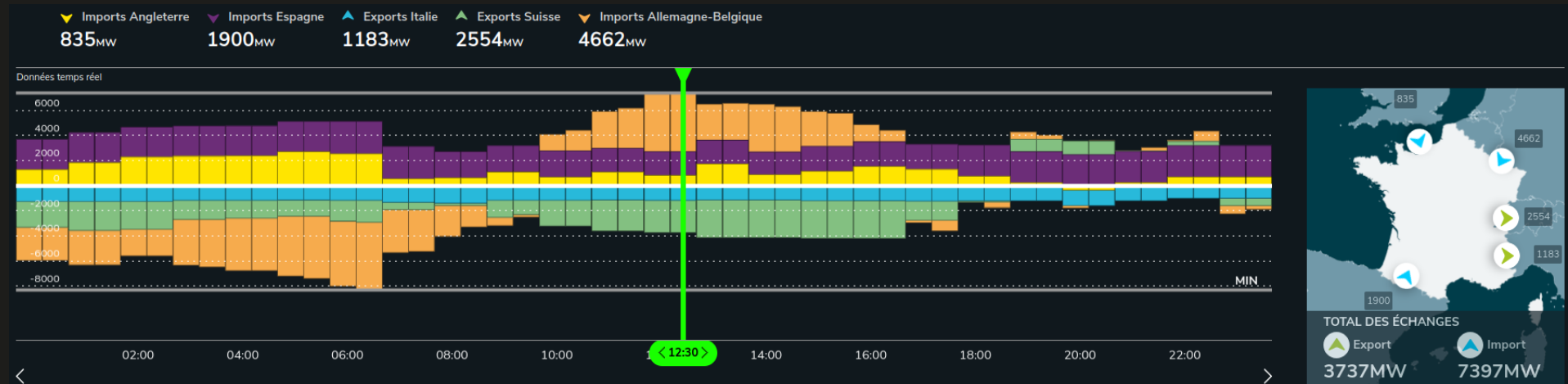
Parc installé au 01/06/2022

 Nucléaire	61370 MW
 Charbon	1818 MW
 Fioul	2890 MW
 Gaz	12752 MW
 Hydraulique	25504 MW
 Éolien	19099 MW
 Solaire	13612 MW
 Bioénergies	2234 MW

Parc installé (potentiel de production), consommation et production au 09/08/2022.
Source : application eCO2mix (Android et iOS)



Pour ce faire, RTE peut échanger l'énergie électrique avec les pays frontaliers, bien évidemment de le cadre d'accord commerciaux.



Échanges commerciaux aux frontières au mardi 09/08/2022.

<https://www.rte-france.com/eco2mix/synthese-des-donnees?type=consommation>

TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ

Centre de contrôle du réseau électrique

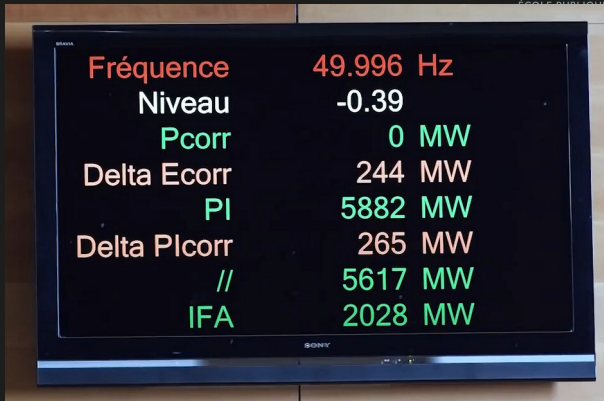


Centre de contrôle

Flamanville
(à l'arrêt)

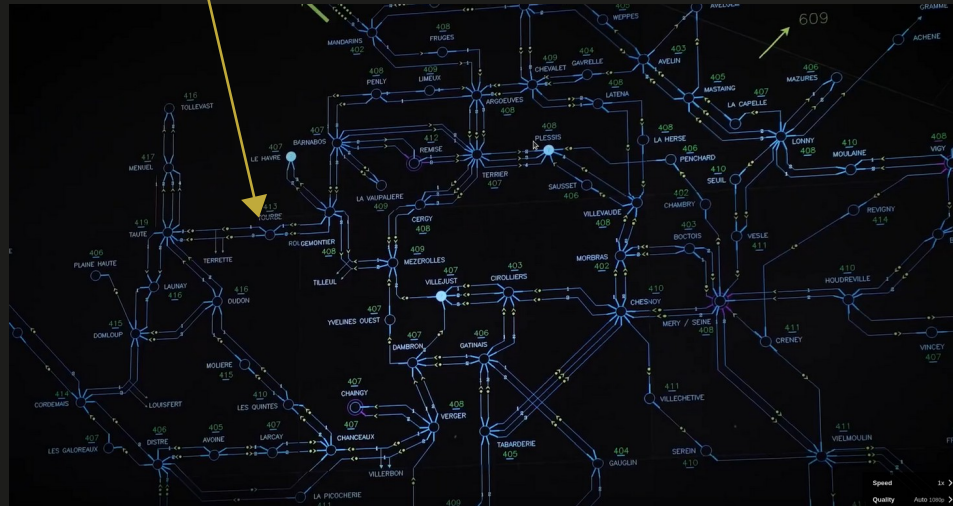
Tourbe
(Sequeville)

Fréquence du réseau



Unités de production

Lignes de transport 400 kV



YouTube : Un lieu parmi les plus importants de France ! Le centre de contrôle du réseau électrique – MB

Résister au black-out

En cas de difficulté à assurer l'équilibre, RTE dispose de certaines marges de manoeuvre avant le black-out complet :

- Activation des réserves primaires (niveau européen)
 - Les centrales ne fonctionnent jamais à 100%, elles ont donc une petite de marge pour les demandes brèves
- Activation des réserves secondaires et tertiaires (niveau national)
 - Centrales nationales activées automatiquement (secondaires) ou manuellement par RTE (tertiaires)
- Interruptibilité des 22 plus gros industriels français
 - Contrat entre industriel et RTE, pouvant réduire la consommation de 1500 MW (~ 1,5 réacteur nucléaire)
- Baisser de quelques % la tension du réseau (max 2h)
- Délestage des consommateurs répartis en 5 échelons

Résister au black-out : délestage

Les consommateurs sont répartis en 5 échelons, représentant chacun ~20% de la conso.

Le schéma de délestage (donc de coupure) des échelons se fait de manière automatique en fonction de la fréquence du réseau.

L'échelon 5 ne sera jamais coupé volontairement, il contient les services prioritaires tels que les hôpitaux.

Tableau « Organisation des Réseaux de Distribution en Schéma Normal d'Exploitation »

Regroupement des Départs HTA	Echelon 1		Echelon 2		Echelon 3		Echelon 4	Echelon 5
½ échelon	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2		
Puissance appelée en % de la puissance totale HTA à la pointe d'hiver	20		20		20		20	20
	10	10	10	10	10	10		
Affectation des clients prioritaires et de la liste (arrêté du 5 juillet 1990) et production HTA départ dédié							Liste supplémentaire	Service Prioritaire départ dédié à la Production HTA
Cas Exceptionnels					Quelques usagers Liste supplémentaire	Quelques usagers Service prioritaire		
Délestage fréquentométrique	49 Hz		48,5 Hz		48 Hz		47,5 Hz	Non délestable

En cas de délestage, un roulement est mis en oeuvre entre les différentes zones géographiques afin d'impacter le moins longtemps possible chaque zone.

Si la fréquence baisse en dessous de 47 Hz, les centrales se coupent automatiquement et le pays est coupé : c'est le black-out.

RTE surveille de près l'équilibre de cet hiver

RTE annonce un risque fort de déséquilibre entre production et consommation pour l'hiver 2022-2023.

Causes :

- Crise du gaz (ayant débuté avant l'invasion de l'Ukraine, ayant empiré depuis)
- Le parc nucléaire national est à mi-puissance
 - Les centrales nucléaires sont souvent arrêtées l'été (révisions, ...), mais la proportion est toutefois inhabituelle
 - RTE estime la production nucléaire de cette année à 280-300 TW·h, contre 400 TW·h il y a 10 ans
- Sécheresse → difficulté à assurer une production hydraulique, deuxième source de production nationale

Le Monde, "Y aura-t-il un blackout cet hiver ?"
<https://www.youtube.com/watch?v=Ut6kjMs29gE>

Source : RTE, 14/09/2022
Perspectives pour le système électrique pour l'automne et l'hiver 2022-2023
www.rte-france.com/actualites/previsions-systeme-electrique-hiver-2022-2023

RTE surveille de près l'équilibre de cet hiver

RTE annonce un risque fort de déséquilibre entre production et consommation pour l'hiver 2022-2023.

Conséquences :

- RTE a publié un rapport le 14/09/2022 dans lequel le gestionnaire détaille plusieurs scénarii sur l'équilibre offre-demande en électricité.
- *"La période de vigilance sur la sécurité d'approvisionnement électrique commence de manière exceptionnelle à l'automne et s'étend désormais sur plusieurs mois"*
- RTE mise sur une réduction de la consommation nationale de 5 % à 15 % pour éviter les coupures
- RTE élargit son dispositif **EcoWatt** pour alerter la population, les entreprises et les collectivités

Source : RTE, 14/09/2022

Perspectives pour le système électrique pour l'automne et l'hiver 2022-2023

www.rte-france.com/actualites/previsions-systeme-electrique-hiver-2022-2023

RTE surveille de près l'équilibre de cet hiver

Scenarii pour cet automne-hiver.

Variables :

Nombre de centrales nucléaires réactivées
(RTE plus "prudent" que EDF)

Rigueur de l'hiver
(-1°C en hiver ≈ +2400 MW de consommation)

En aucun cas le black-out (perte de la maîtrise du réseau) n'est envisagé.

Source : RTE, 14/09/2022
Perspectives pour le système électrique pour l'automne et l'hiver 2022-2023
www.rte-france.com/actualites/previsions-systeme-electrique-hiver-2022-2023

Exemples de configurations météo		Scénario haut (vision haute sur le nucléaire)	Scénario intermédiaire (avec prudenances sur le nucléaire et les capacités d'imports)		Scénario dégradé (limitation des échanges électriques et tensions sur le gaz)
			Cas de base	Variante sobriété	
Hiver chaud (type 2019-2020)	Pas de recours aux moyens de sauvegarde ✓ Ecowatt : ● 0 activation	Pas de recours aux moyens de sauvegarde ✓ Ecowatt : ● 0 activation	Pas de recours aux moyens de sauvegarde ✓ Ecowatt : ● 0 activation	Recours aux moyens de sauvegarde ✗ Ecowatt : ● 4-7 activations	
Médiane des simulations météo	Pas de recours aux moyens de sauvegarde ✓ Ecowatt : ● 0 activation	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 0-2 activations	Pas de recours aux moyens de sauvegarde ✓ Ecowatt : ● 0 activation	Recours aux moyens de sauvegarde ✗ Ecowatt : ● 6-12 activations	
Hiver froid (type 2012-2013)	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 0-1 activation	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 1-2 activations	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 0-1 activation	Recours aux moyens de sauvegarde ✗ Ecowatt : ● 12-20 activations	
Hiver très froid (type 2010-2011)	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 1-3 activations	Recours aux moyens de sauvegarde ✗ Ecowatt : ● 3-6 activations	Recours aux moyens de sauvegarde ! Ecowatt : ● 1-3 activations	Recours aux moyens de sauvegarde ✗ Ecowatt : ● 20-28 activations	

✓ Pas d'activation des moyens de sauvegarde
 ! Recours possibles aux moyens de sauvegarde sur quelques heures au maximum
 ✗ Multiples recours aux moyens de sauvegarde
 ✗ Recours très fréquent aux moyens de sauvegarde

Les signaux EcoWatt

www.monecowatt.fr



- **EcoWatt vert :** consommation normale
- **EcoWatt orange :** consommation élevée et réseau tendu, écocestes appréciés
- **EcoWatt rouge :** réseau très tendu et coupures inévitables

Coupures :

- En premier lieu, dispositif d'interruptibilité (industriels sous contrat avec RTE)
- Ensuite, délestages programmés (particuliers) jusqu'à 2h sur une zone limitée.

POSTE SOURCE



Les postes sources sont à l'interface du réseau de transport et du réseau de distribution. Ils sont gérés par le distributeur Enedis.

Ils convertissent les tensions du réseau de transport (63, 90 ou 225 kV) en tension adaptée à la distribution (20 kV).



Le poste source contribue :

- À la mesure des flux d'énergie (équipements de comptage d'énergie) ;
- Au changement tarifaire par la commande centralisée (175 Hz) ;
- À la sûreté du réseau de transport via le système de délestage ;
- À la qualité et à la continuité de l'alimentation électrique par les systèmes de ré-enclenchement automatiques, de réglage de la tension et de compensation de l'énergie réactive.

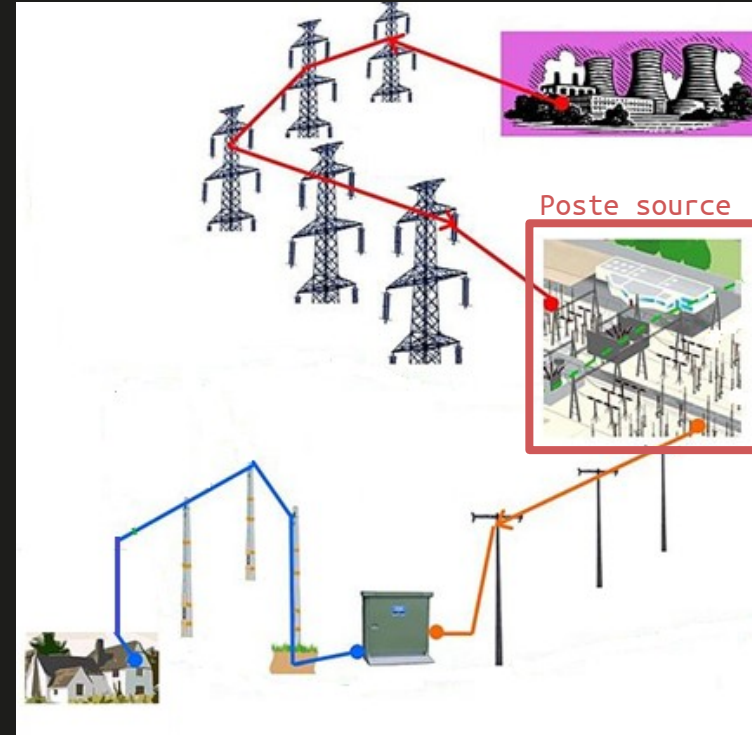
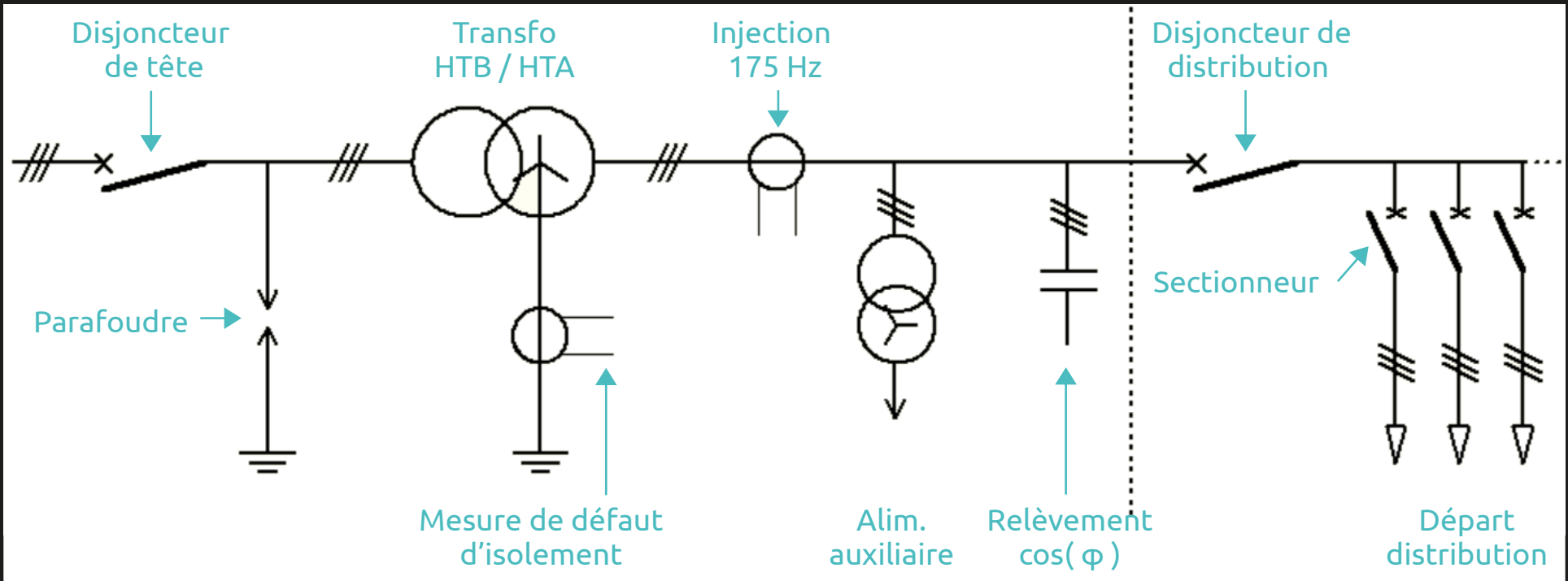


Schéma simplifié d'un poste source



DISTRIBUTION, STRUCTURE DES RÉSEAUX HTA



Distribution de l'électricité

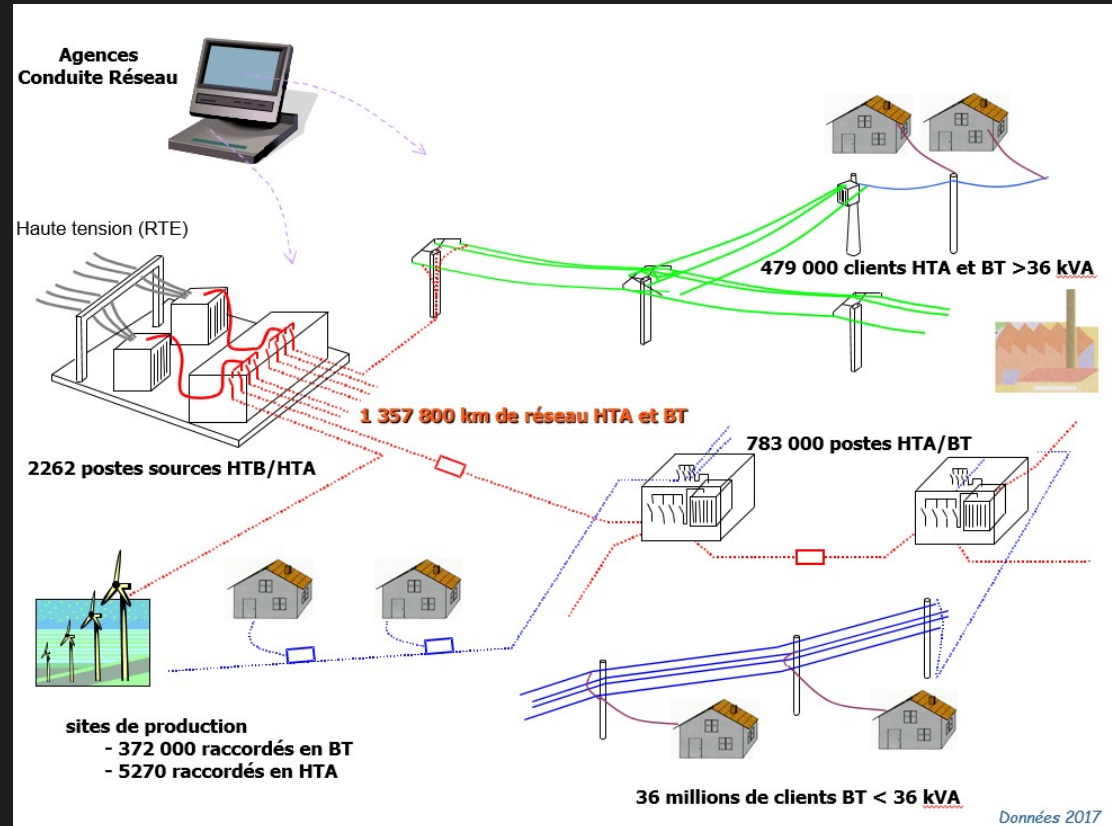
Du poste source au client final, le réseau électrique est géré par le distributeur Enedis.

Le poste source fournit une tension dans le domaine HTA, typiquement du 20 kV.

Les clients sont majoritairement alimentés en tension BT : 220 V mono ou 380 V tri.

Le distributeur se charge donc de la transformation de 20 kV vers 380 V, mais également de la sécurité du réseau et de la continuité de service.

En fonction de la densité de clients finaux, la structure du réseau HTA peut varier, comme le montre les diapositives suivantes.

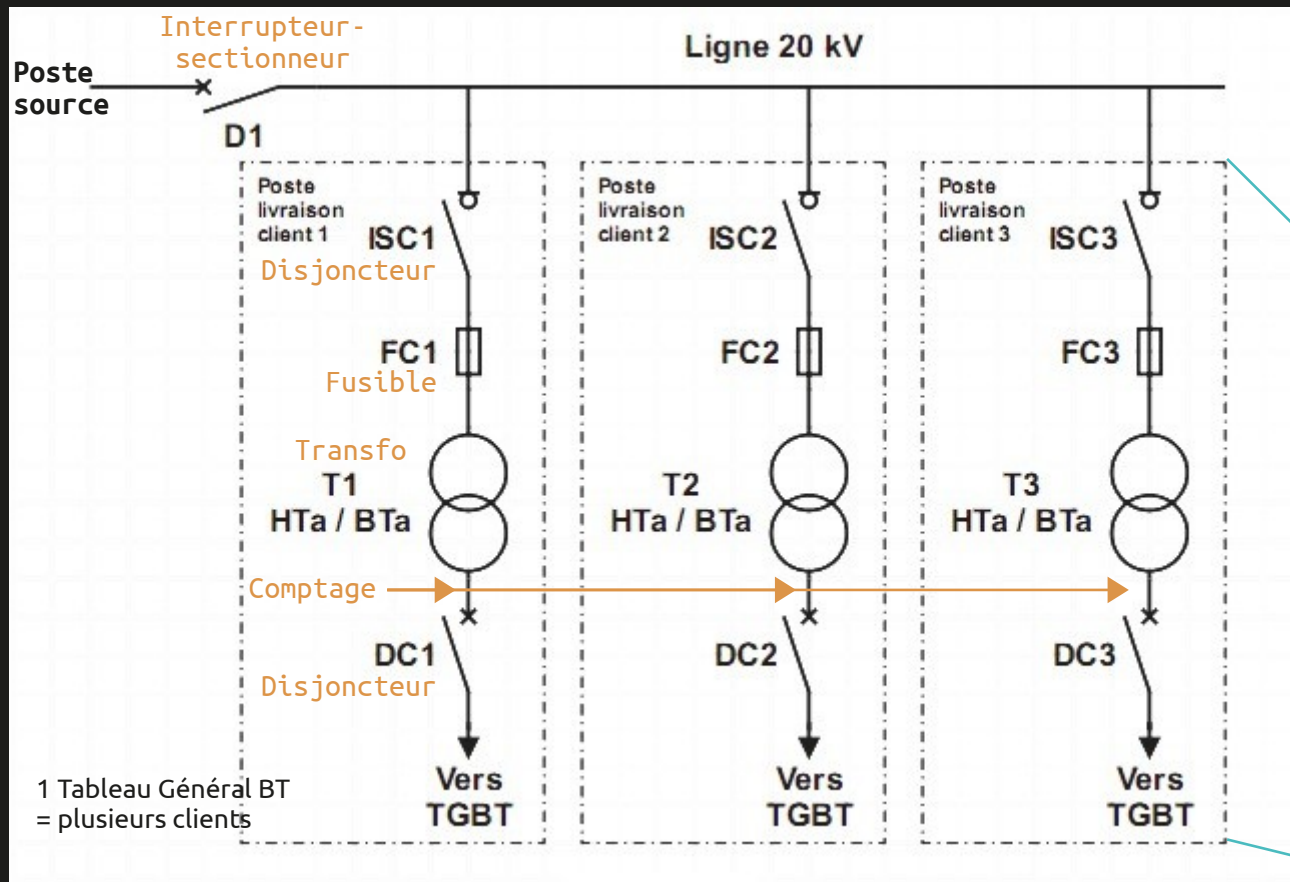


Réseaux HTA aérien et souterrain



Poste de distribution HTA/BT et transformateur





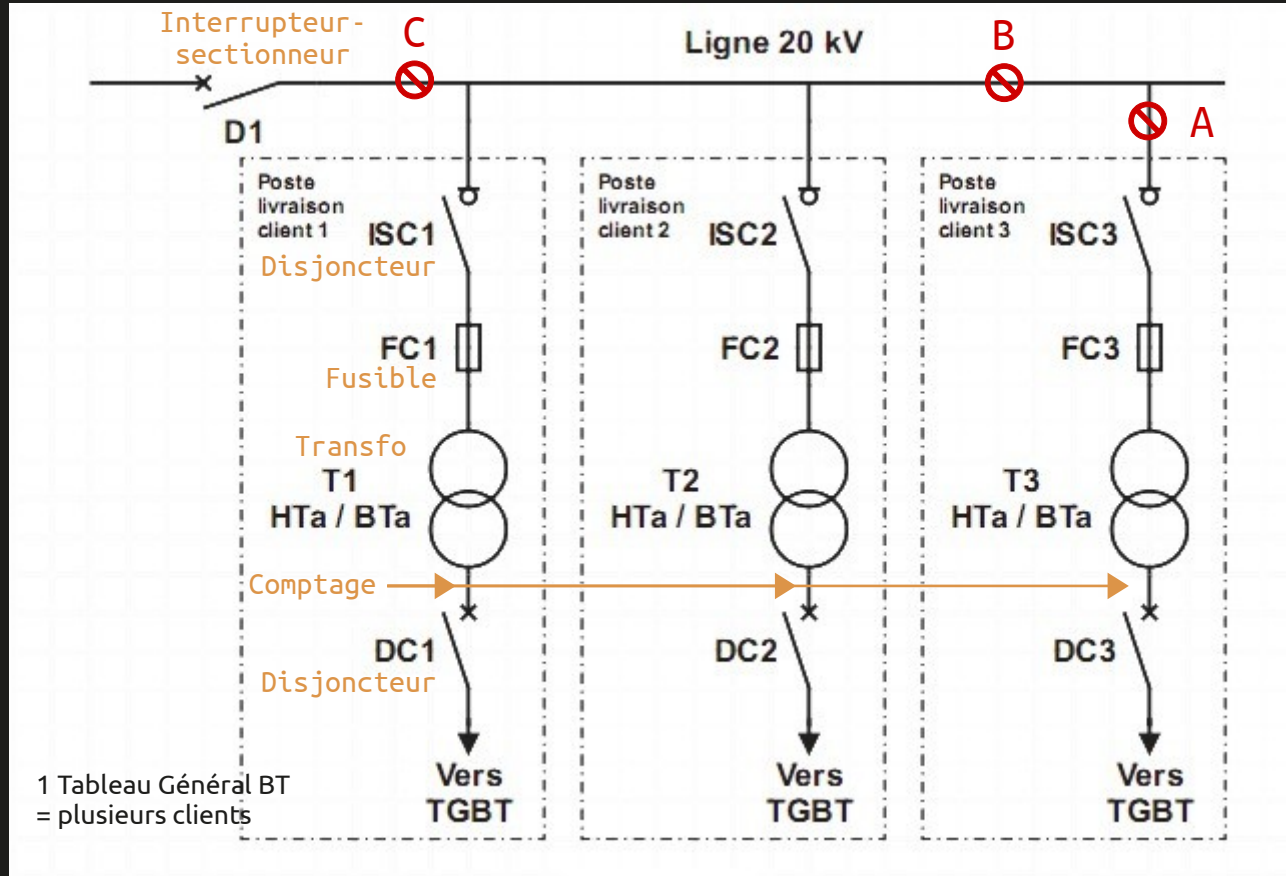
Utilisation

Distribution aérienne rurale

Distribution aérienne industrielle

Postes "haut de poteau"





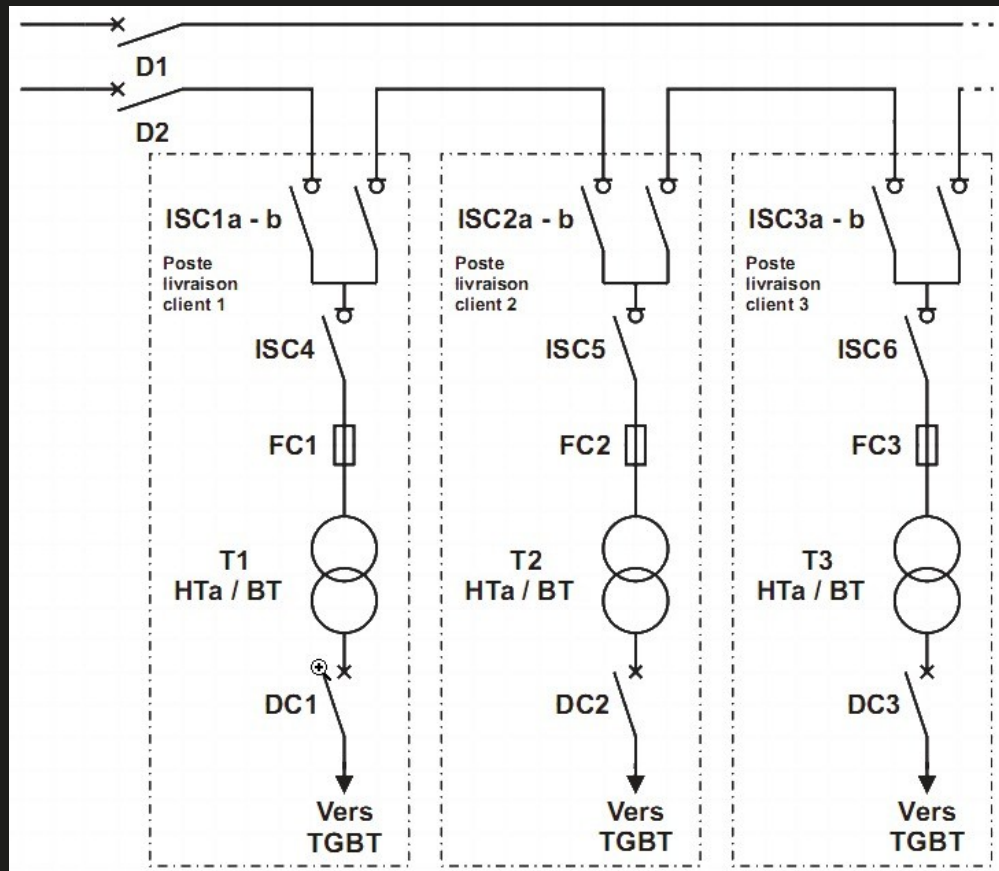
Gestion des défauts

En cas de défaut ou maintenance, tous les clients situés en aval sont privés d'alimentation le temps de l'intervention.

+ solution la moins onéreuse

- continuité de service la moins bonne

Structure en boucle, ou en coupure d'artère



Fonctionnement

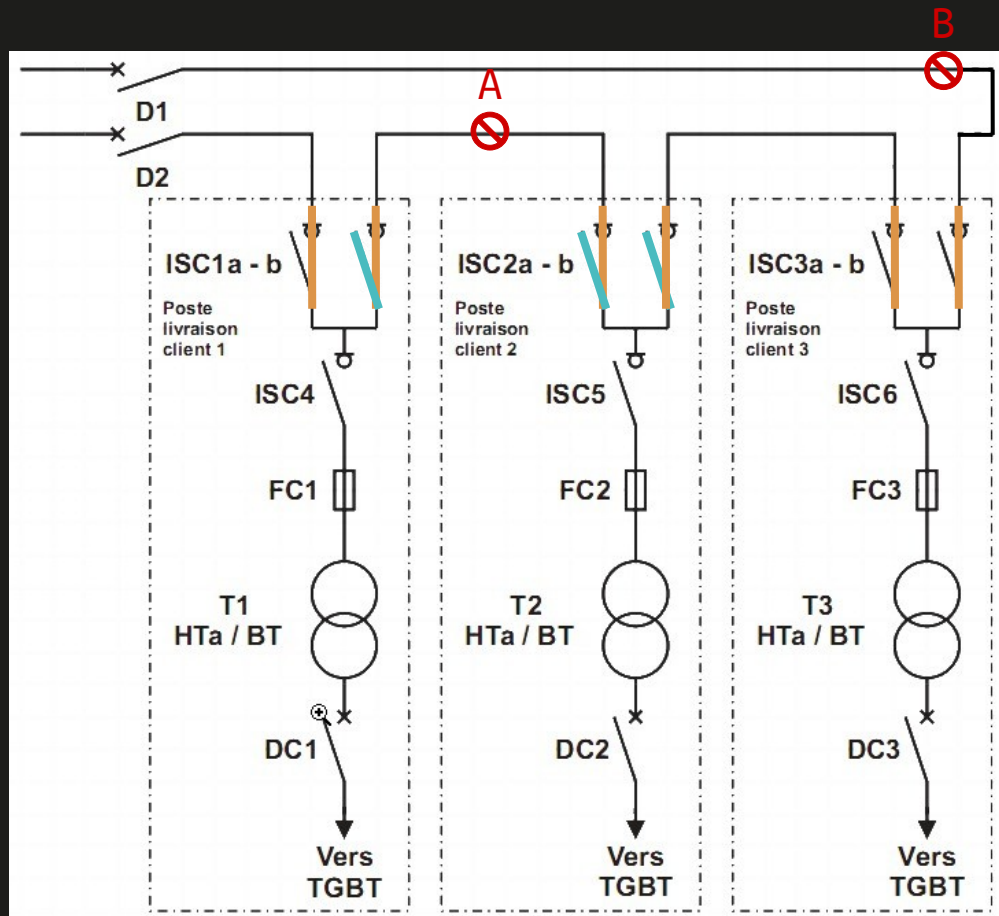
Le réseau est constitué d'une boucle, dont les extrémités sont reliées aux deux départs d'un même poste source.

Un interrupteur-sectionneur est ouvert (au milieu pour équilibrer la charge), tandis que les autres sont fermés.

Distribution souterraine en zone urbaine.



Structure en boucle, ou en coupure d'artère



Gestion des défauts

En cas de premier défaut sur le réseau, la configuration des interrupteurs-sectionneurs est modifiée de sorte à poursuivre l'alimentation pour tout le monde et isoler le défaut.

Au deuxième défaut, les clients situés entre les deux défauts sont privés d'électricité.

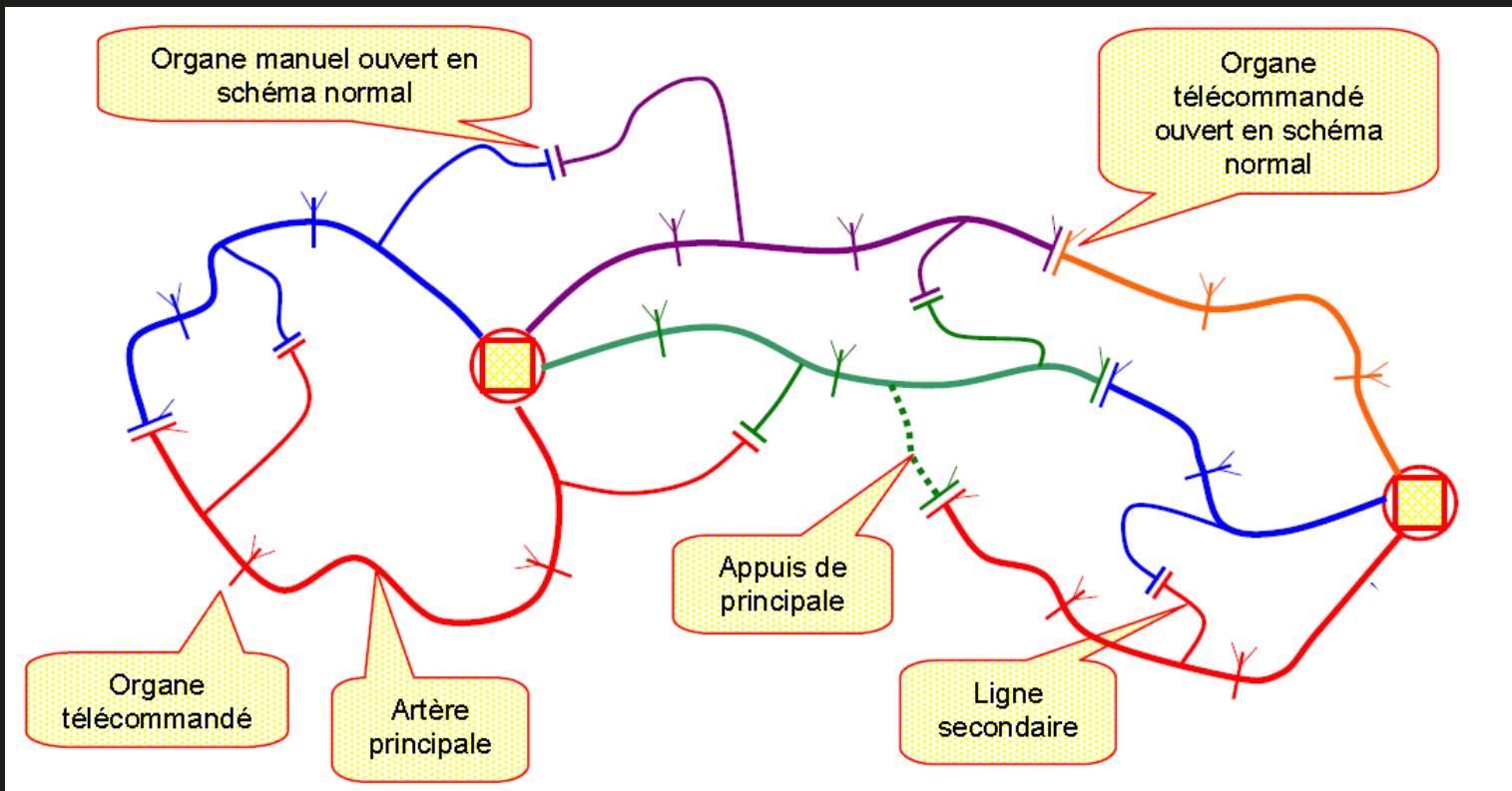
- Plus coûteux que la structure en antenne

+ Assure la continuité de service avec 1 défaut

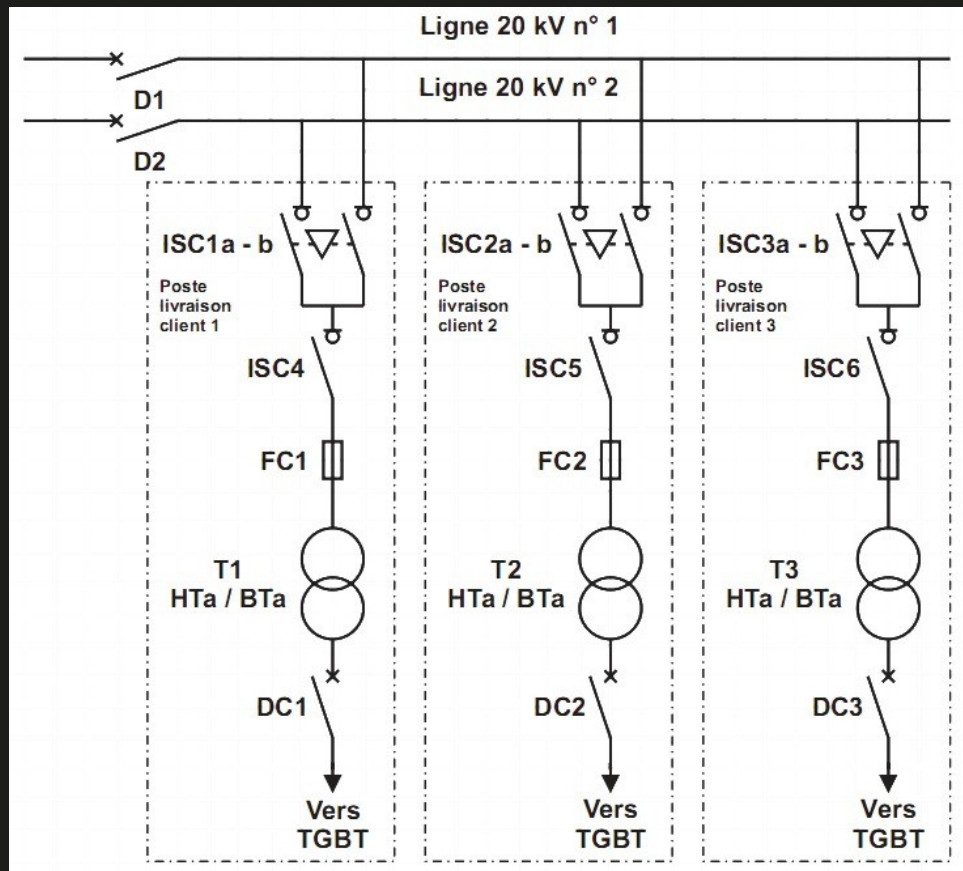
Pour 2 défauts, la continuité de service dépend de la rapidité d'intervention du distributeur (Enedis).

Structure en boucle, ou en coupure d'artère

Représentation schématique des départs HTA



Structure en double dérivation



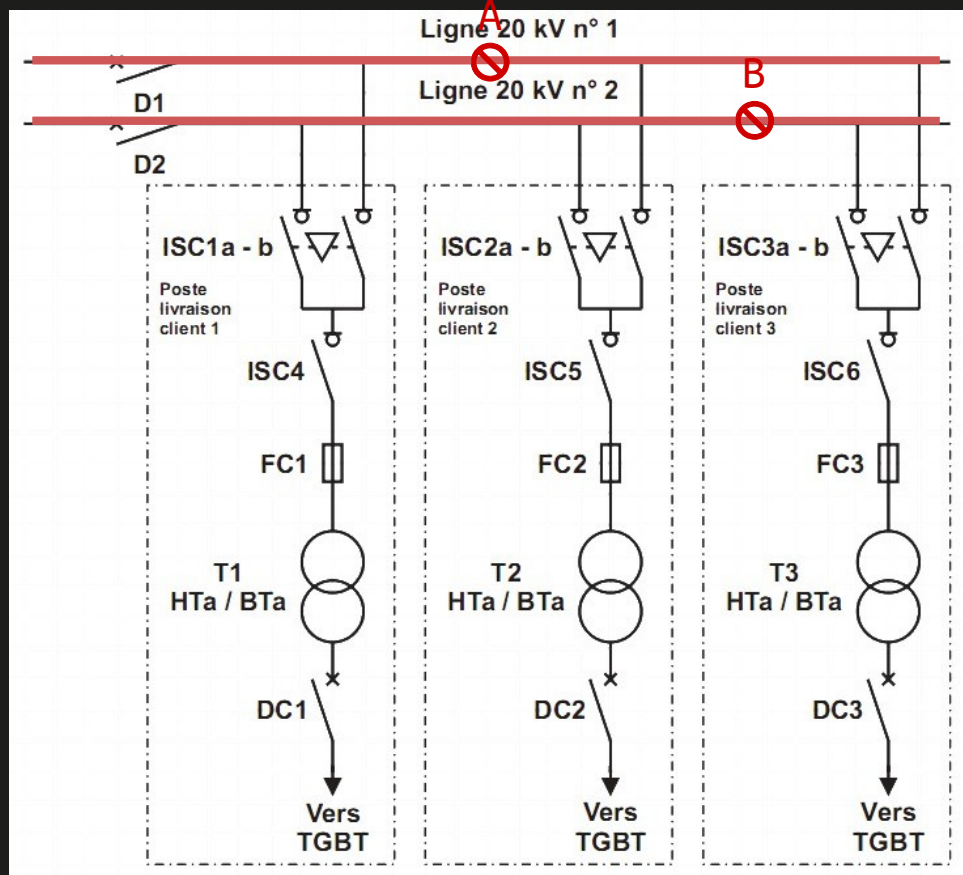
Fonctionnement

Chaque client est relié à 2 sources différentes (de un ou deux postes-sources) et est alimenté par l'un des deux câbles.

La paire d'interrupteurs-sectionneurs d'un poste source assure la commutation entre ces deux câbles (la paire est forcément une NO-NF).

Distribution souterraine en zone urbaine très dense (grande agglomérations).

Structure en double dérivation



Gestion des défauts

Supposons tout le monde alimenté par la ligne n°1.

Au premier défaut (ligne n°1), les clients 2 et suivants basculent sur la ligne n°2.

Au second défaut (ligne n°2), les clients 3 et suivants ne sont plus alimentés le temps de l'intervention.

- Solution très coûteuse

+ Continuité de service maximale (basculement automatique d'une alimentation à l'autre)

Il est possible que la deuxième, voire troisième source soit un groupe électrogène

Intervention sur le réseau

Rare image de naissance d'un électricien
(la coquille encore sur la tête)



DISTRIBUTION, STRUCTURE DES RÉSEAUX BT

enedis
L'ELECTRICITE EN RESEAU



**ENSI
CAEN**
ÉCOLE PUBLIQUE D'INGÉNIEURS
CENTRE DE RECHERCHE



Le **poste de distribution** fait le lien entre les réseaux de distribution **HTA et BT**.

Le réseau de distribution BT contient notamment :

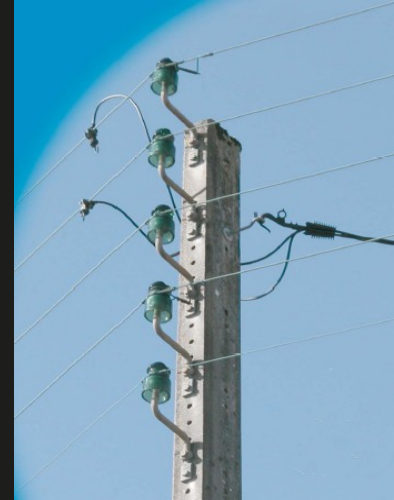
- Un ou plusieurs départs, chacun ayant son propre organe de protection (disjoncteur, fusible)
- Des câbles aériens et souterrains
 - Les câbles aériens possèdent des accessoires de jonction et de dérivation
 - Les câbles souterrains peuvent avoir des émergences pour leur tronçonnement ou raccordements
- Des circuits et prises de terre du neutre
- Des branchements individuels (3-36 kVA, 37-250 kVA) et collectifs (immeubles)

Réseau aérien BT

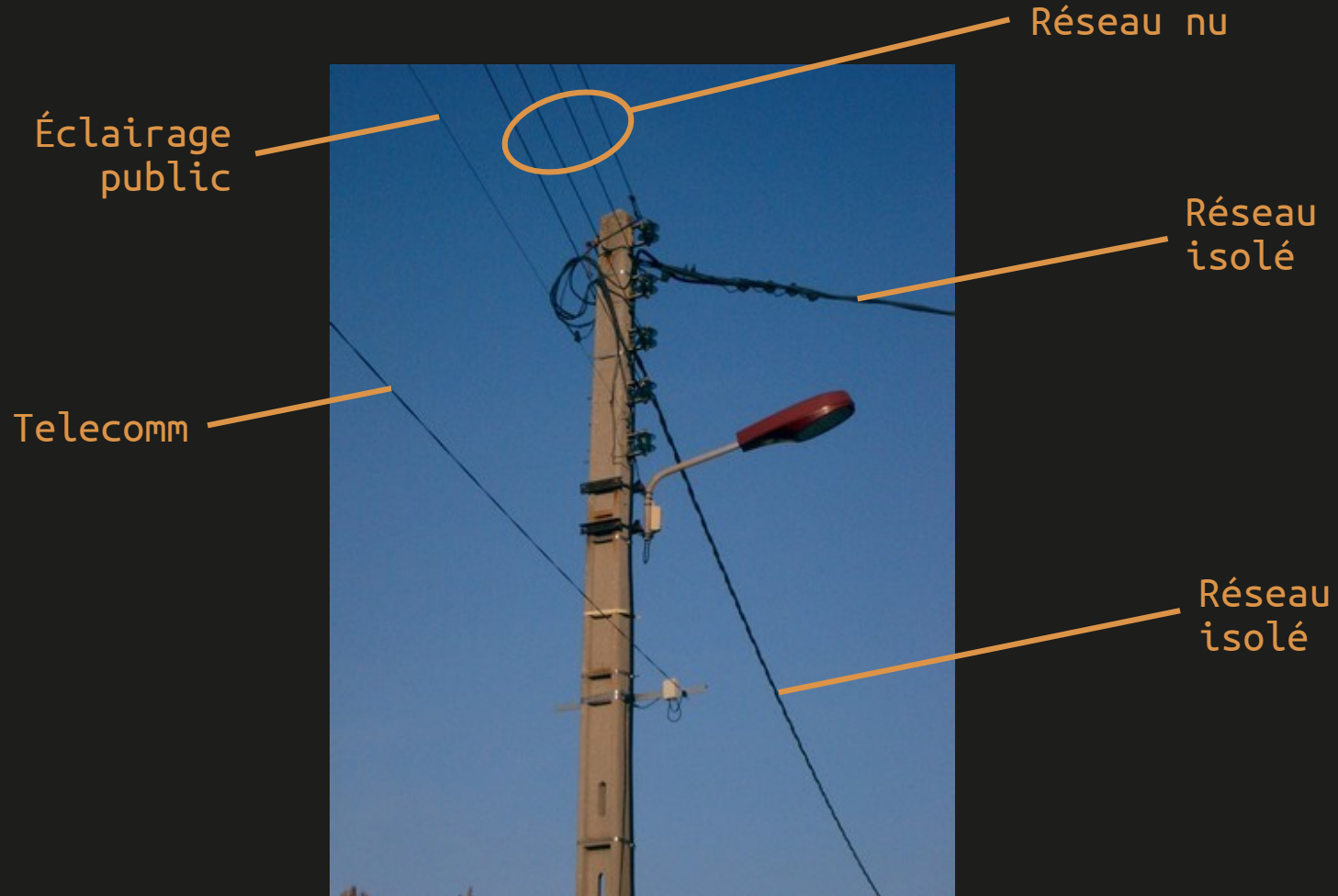
Les réseaux BT aériens sont principalement utilisés pour des zones à densité de charge réduite (espace rural). Même s'ils sont ponctuellement remplacés par un réseau souterrain.

Les réseaux BT aériens peuvent être constitués de câbles nus ou de conducteurs isolés.

Les réseaux en câbles nus sont évidemment maintenus, mais les nouvelles installations se font en conducteurs isolés uniquement.



Réseau aérien BT



Réseau souterrain BT

Le coût des tranchées et de réfection des voiries sont très élevés en regard du coût des câbles.

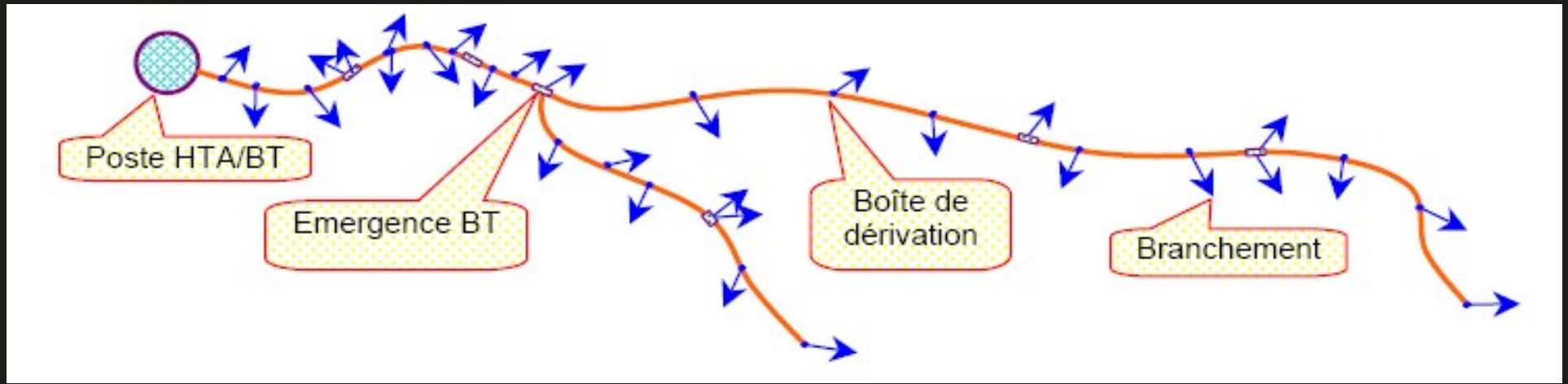
Les réseaux souterrains sont utilisés en zone de moyenne à forte densité de charge.



Réseau souterrain BT

Sur les réseaux souterrains, il est nécessaire de disposer de points de coupure pour faciliter les interventions et réalimentations.

Ce sont les émergences.



Émergences



Espace promotion :

Monsieur Bidouille - Vidéaste spécialisé vulgarisation technique, DIY, réseau et énergie.

- Pourquoi la terre ? (je vous mets au courant) - HS - Monsieur Bidouille
- Un lieu parmi les plus importants de France ! Le centre de contrôle du réseau électrique – MB
- Comment le réseau électrique italien s'est effondré en 2003 - MB R&D
- Blackout : Comment s'effondre un réseau électrique et comment le reconstruire ? - MB
- 3 millions de volts ? Visite d'un des plus gros laboratoires haute tension d'Europe - d'EDF lab

SECTION DES CÂBLES



Un conducteur parcouru par un courant électrique s'échauffe selon la loi de Joule :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

Cette énergie électrique se transforme en chaleur et se dissipe dans le milieu ambiant par convection et conduction, jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint.

Sachant que l'intensité du courant est fixée par le consommateur, on voit clairement l'intérêt de jouer sur la section (et *in fine* la résistance) du conducteur pour réduire la puissance dissipée par effet Joule :

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

ρ : Résistivité du matériau

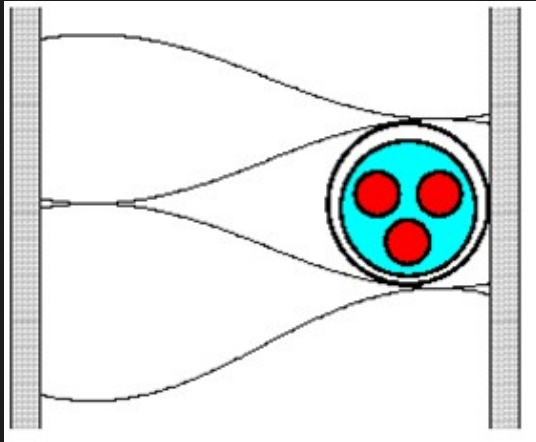
L : longueur du conducteur

S : Section du conducteur

Pour déterminer la section des conducteurs, plusieurs paramètres sont pris en compte :

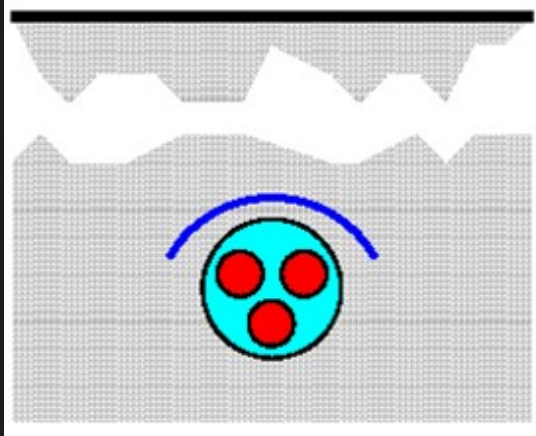
1. Le mode de pose
2. La température ambiante
3. La nature de l'isolant
4. La nature de l'âme
5. L'influence mutuelle des conducteurs côte à côte
6. L'influence du type de conducteur : isolé, câble mono- ou multi-conducteur

Conditions influentes : mode de pose



Câbles multi-conducteurs **encastrés dans des parois thermiquement isolantes** :

- Isolant : PR2 (2 conducteurs actifs)
- $T_{\text{amb}} = 30\text{ °C}$
- **Section = 2,5 mm²**
- $I = 20\text{ A}$

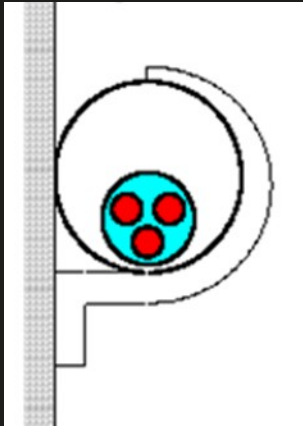


Câbles multi-conducteurs **enterrés avec protection mécanique supplémentaire** :

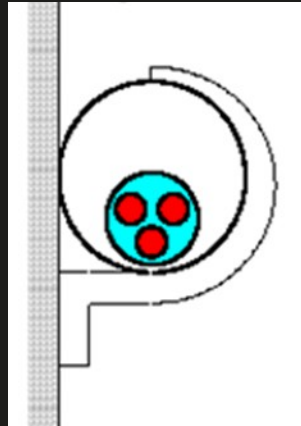
- Isolant : PR2 (2 conducteurs actifs)
- $T_{\text{amb}} = 30\text{ °C}$
- **Section = 2,5 mm²**
- $I = 20\text{ A}$

Conditions influentes : température ambiante

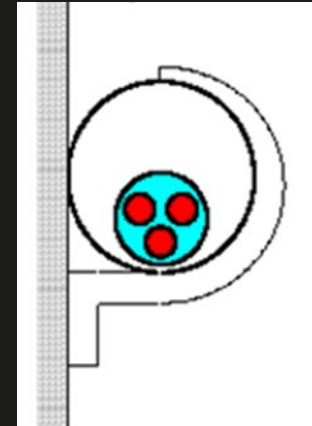
Câbles multi-conducteurs dans des conduits en montage apparent :



- Isolant : PR2
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- Section = 16 mm^2
- $I = 98\text{ A}$



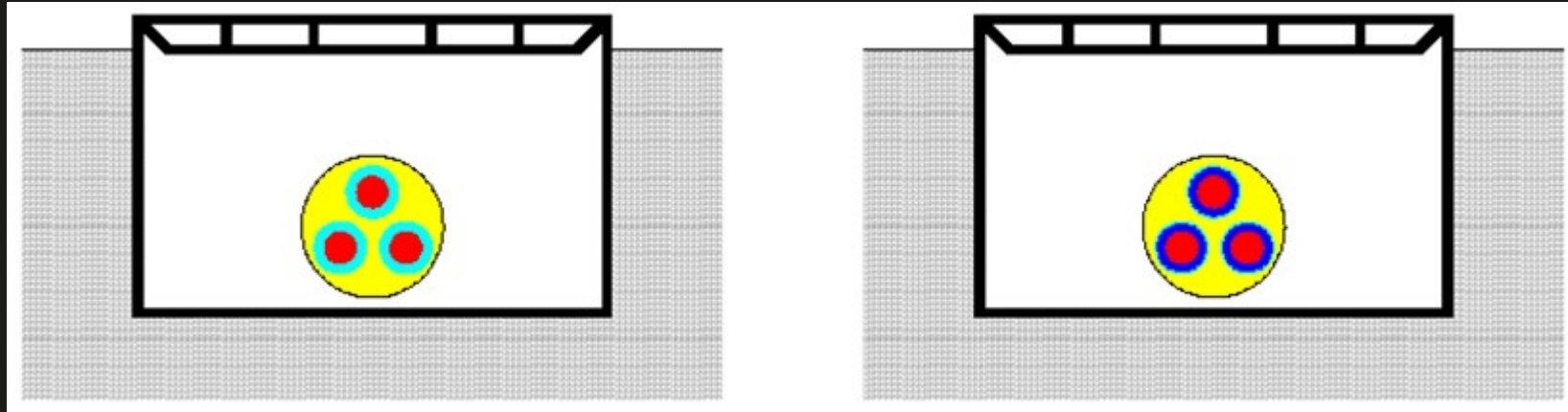
- Isolant : PR2
- $T_{amb} = 40\text{ °C}$
- Section = 25 mm^2
- $I = 98\text{ A}$



- Isolant : PR2
- $T_{amb} = 50\text{ °C}$
- Section = 35 mm^2
- $I = 98\text{ A}$

Conditions influentes : nature de l'isolant

Câbles multi-conducteurs dans caniveaux ouverts ou ventilés :



- Isolant : PR3
- $T_{\text{amb}} = 30\text{ °C}$
- Section = 50 mm^2
- $I = 150\text{ A}$

- Isolant : PVC3
- $T_{\text{amb}} = 50\text{ °C}$
- Section = 70 mm^2
- $I = 150\text{ A}$

Conditions influentes : nature de l'isolant

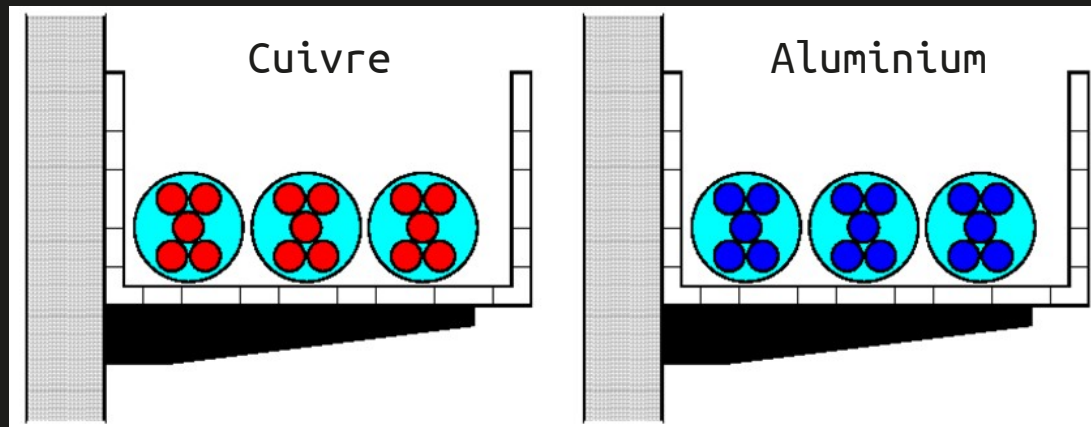
Un isolant est capable de supporter une certaine température maximale de conducteur, en fonctionnement continu.

Au delà, il y a destruction de l'isolant

Type d'isolant	Température max. (°C)
Polychlorure de vinyle (PVC)	70
Polyéthylène réticulé (PR)	90
Ethylène-Propylène (EPR)	90

Conditions influentes : nature de l'âme

Câbles multi-conducteurs sur des tablettes perforées en chemin horizontal ou vertical :

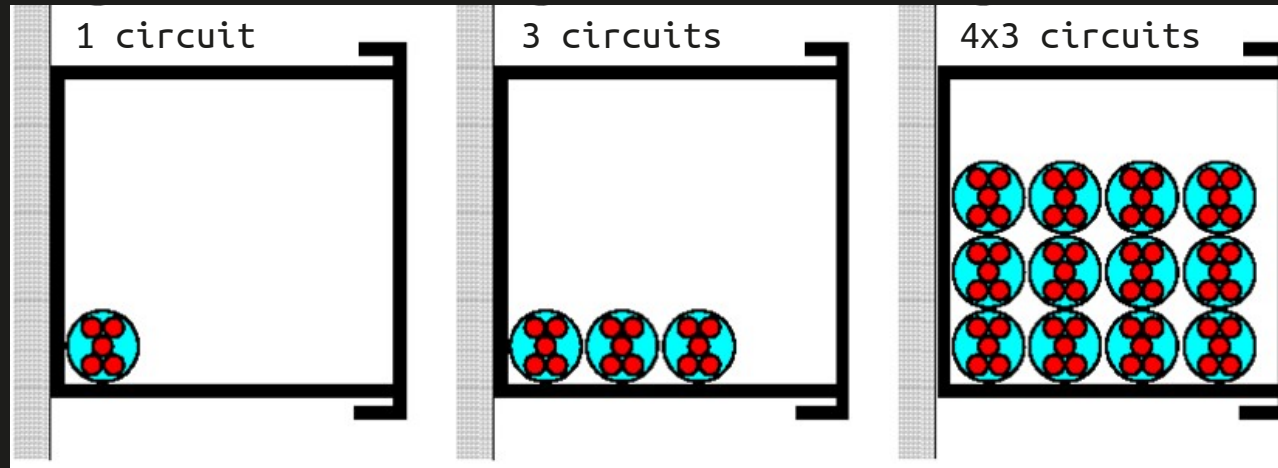


- Isolant : PVC3
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- Section = 10 mm²
- I = 48 A

- Isolant : PVC3
- $T_{amb} = 50\text{ °C}$
- Section = 16 mm²
- I = 48 A

Conditions influentes : influence mutuelle des conducteurs

Câbles multi-conducteurs dans des goulottes fixées aux parois en parcours horizontal :



- Isolant : PVC3

- $T_{amb} = 30\text{ °C}$

- Section = 16 mm^2

- $I = 68\text{ A}$

- Isolant : PVC3

- $T_{amb} = 30\text{ °C}$

- Section = 35 mm^2

- $I = 68\text{ A}$

- Isolant : PVC3

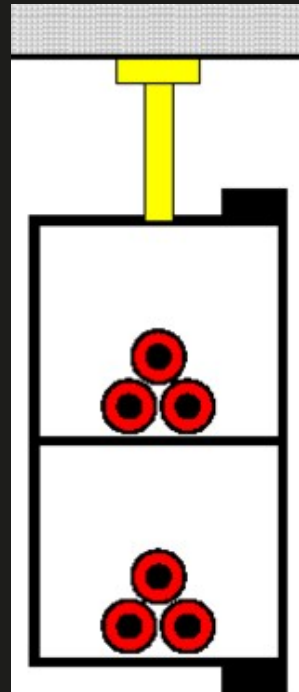
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$

- Section = 120 mm^2

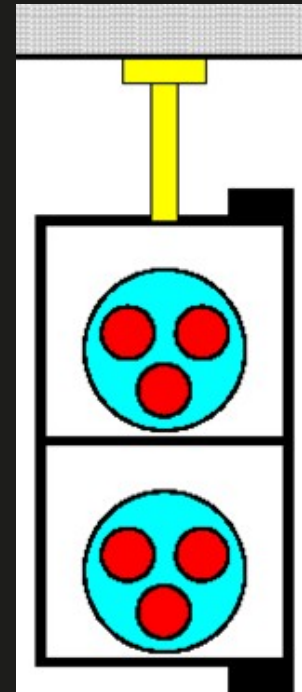
- $I = 68\text{ A}$

Conducteurs ou câbles dans des goulottes suspendues :

- Isolant : PR3
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- Section = 35 mm^2
- $I = 150\text{ A}$



- Isolant : PR3
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- Section = 50 mm^2
- $I = 150\text{ A}$



SECTION DES CÂBLES

Choisir la section de câble adaptée

La section d'un conducteur dépend évidemment du **courant nominal I_N** .

À partir de tableaux, on calcule un coefficient **$K = K1 \cdot K2 \cdot K3$** .

Conducteur et influence mutuelle

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

Mode de pose

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, F	encastrés ou noyés dans les parois	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40
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	Pas de facteur de réduction supplémentaire pour plus de 9 câbles.		
	simple couche au plafond	1,00	0,85	0,76	0,72	0,69	0,67	0,66	0,65	0,64			
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			
	simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, etc.	1,00	0,88	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	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	1,06	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,94	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

SECTION DES CÂBLES

Choisir la section de câble adaptée

On calcule alors le **courant fictif** $I_F = I_N / K$.

Puis, en fonction de I_F et de l'isolant, on trouve la section minimale (en cuivre ou aluminium) avec le tableau suivant.

NB : dans ce tableau

$$I_N = I_z \quad \text{et} \quad I_F = I'z$$

Détermination de la section minimale

Connaissant $I'z$ et K ($I'z$ est le courant équivalent au courant véhiculé par la canalisation : $I'z = I_z/K$), le tableau ci-après indique la section à retenir.

lettre de sélection	isolant et nombre de conducteurs chargés (3 ou 2)									
	caoutchouc ou PVC				butyle ou PR ou éthylène PR					
B	PVC3	PVC2		PR3		PR2				
C		PVC3		PVC2	PR3	PR2	PR2			
E			PVC3		PVC2	PR3	PR2	PR2		
F				PVC3		PVC2	PR3	PR2	PR2	
section cuivre (mm ²)	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					656	754	825		940	
500					749	868	946		1 083	
630					855	1 005	1 088		1 254	

SECTION DES CÂBLES

Choisir la section de câble adaptée

Les dénominations des câbles électriques suivent différentes normes.



H 05 VK

- H : Harmonisé (CENELEC)
- 05 : 500 V
- V : Nature de l'âme (cuivre souple)
- K : Nature de l'isolant (PVC)

SECTION DES CÂBLES

Choisir la section de câble adaptée

Tension assignée	6/10 (12) kV			8,7/15 (17,5) kV			12/20 (24) kV			18/30 (36) kV		
Durée du court-circuit	0,5 s	1 s	2 s	0,5 s	1 s	2 s	0,5 s	1 s	2 s	0,5 s	1 s	2 s
Section du conducteur mm ²												
16	800	650	490	1000	740	560	1200	870	660			
25	900	700	510	1000	750	570	1200	870	660			
35	1000	750	540	1100	800	600	1200	880	660			
50	1100	800	580	1150	840	640	1250	1000	770	1750	1300	990
70	1300	920	700	1350	990	760	1450	1100	820	1750	1300	1000
95	1350	1000	750	1450	1050	820	1550	1150	880	2050	1550	1200
120	1450	1050	800	1500	1150	860	1650	1200	930	2150	1650	1230
150	1550	1100	840	1600	1200	910	1700	1300	1000	2250	1700	1300
185	1650	1150	900	1700	1250	970	2000	1500	1200	2350	1800	1400
240	1800	1450	1100	2000	1550	1200	2150	1650	1250	2650	2050	1600
300	2000	1550	1200	2150	1650	1300	2300	1750	1350	2800	2150	1700
400	2300	1750	1400	2600	2000	1550	2650	2050	1600	3000	2300	1800
500	2550	1900	1500	2900	2200	1750	3050	2350	1850	3400	2600	2050
630	2750	2050	1550	3000	2300	1800	3150	2400	1900	3500	2650	2050
800	3000	2250	1700	3300	2500	2000	3450	2600	2100	3700	2800	2200
1000	3300	2400	1800	3500	2700	2100	3650	2800	2200	3950	3000	2400
1200	3550	2550	1900	3700	2850	2200	3850	2950	2300	4200	3200	2550
1400	3650	2750	2000	3900	3000	2350	4050	3100	2450	4350	3350	2650
1600	3750	2850	2100	4000	3100	2400	4150	3200	2500	4500	3400	2700

La section du câble ne dépend pas seulement du courant nominal I_N , mais aussi du **courant de court-circuit** I_{CC} (courant max admissible).

Pour éviter d'atteindre des valeurs de températures dangereuse, un élément de coupure placé en amont doit réagir en une limite de temps imposée :

$$\sqrt{t} = \frac{k \cdot S}{I_{CC}}$$

S = section en mm²
 K = 115 pour le cuivre
 K = 74 pour l'aluminium

Ex :

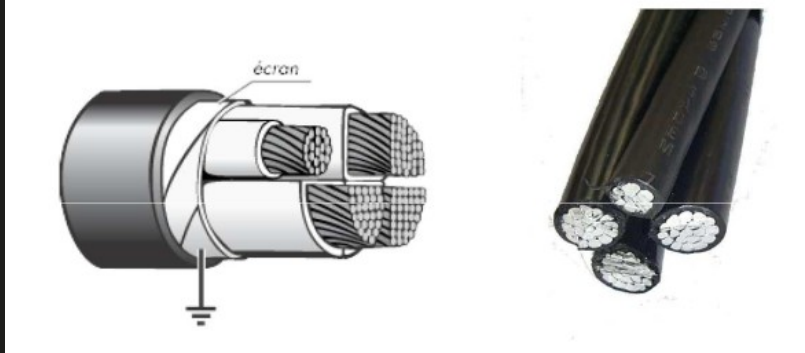
Déduire du tableau la section pour un réseau

U = 10 kV ; $I_{CC} = 1000$ A ; t = 0,5 s.

SECTION DES CÂBLES

Choisir la section de câble adaptée

Les câbles utilisés par Enedis sont imposés par les normes françaises.



En réseau BT aérien

Jusqu'à :

3 Ph x 150 mm²

1 N x 70 mm²

Pour 344 A admissible



En réseau BT souterrain

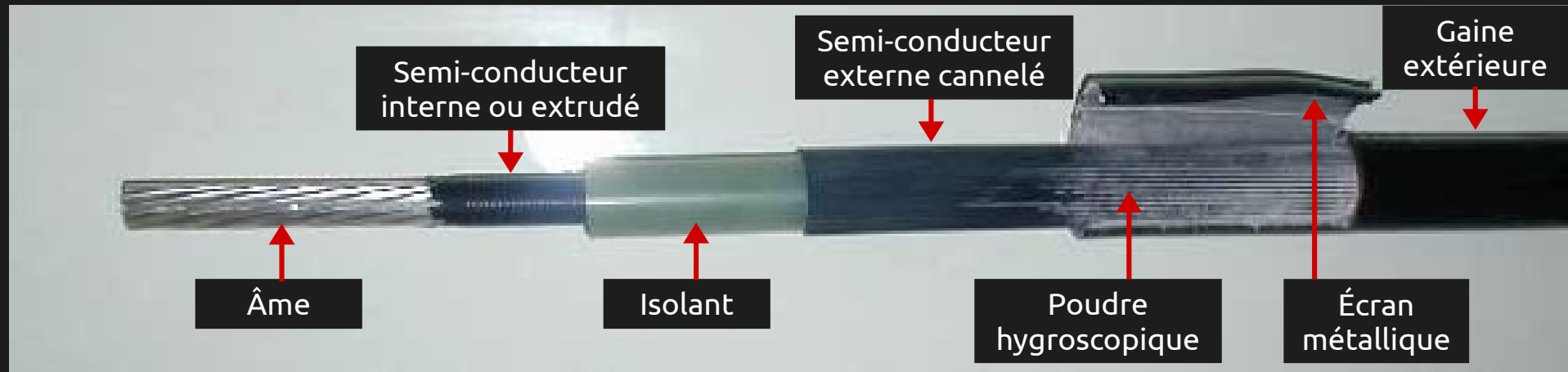
Jusqu'à :

3 Ph x 240 mm²

1 N x 115 mm²

Pour 415 A admissible

Notons la complexité de fabrication des câbles, notamment pour du HTA souterrain.



ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

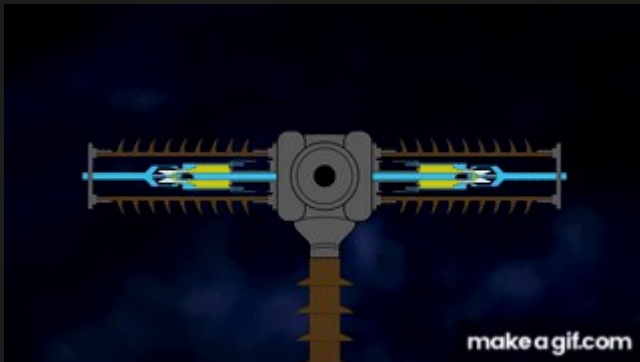


ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

Disjoncteur haute tension

Présent sur le réseau de transport et de distribution, le disjoncteur haute tension doit être capable de couper un courant de court-circuit de l'ordre de 1 kA – 100 kA.

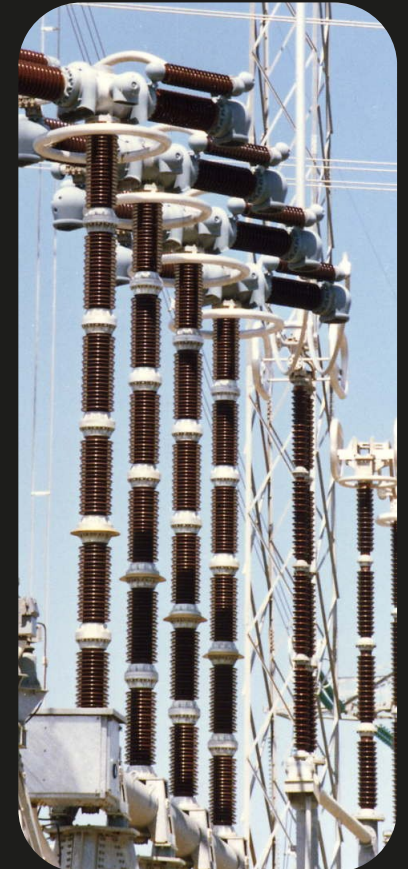
Les disjoncteurs à air comprimé (SF_6) utilisés près des générateurs (i.e. centrales) peuvent couper 275 kA sous 36 kV.



<https://www.youtube.com/watch?v=QnEIZgFFYmQ>



Disjoncteur 800 kV au Venezuela



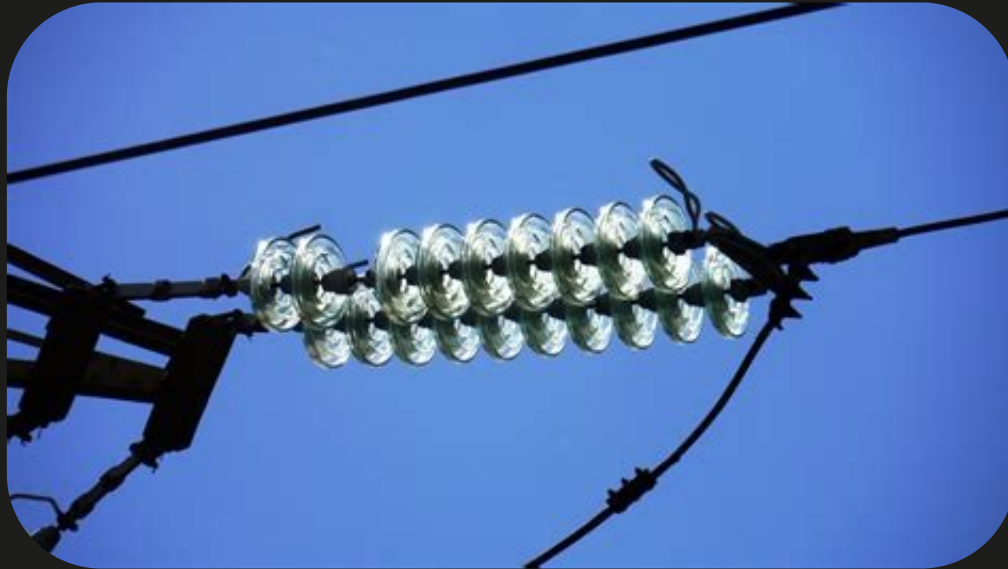
Disj. à air comprimé 2-66

ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

Isolateur

L'isolateur assure la non-conductivité entre l'armement et le câble. Les plus anciens sont en verre ou céramiques, les plus récents en matériaux composites.

En première approximation, on peut considérer qu'une galette permet d'isoler une tension de 20 kV.



Éclateur

En cas de tension trop élevée entre les deux électrodes de l'éclateur, l'air s'ionise et un arc électrique se forme. Les électrodes étant respectivement reliées à une phase et à la terre, la surtension est ainsi déviée à la terre.

Bien qu'extrêmement robustes, ils ne permettent pas de stopper le court-circuit créé par ionisation. Ils sont progressivement remplacés par des parafoudres.



La plaque au milieu empêche les oiseaux de se poser



Arc formé sous une ddp de 400 kV

ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

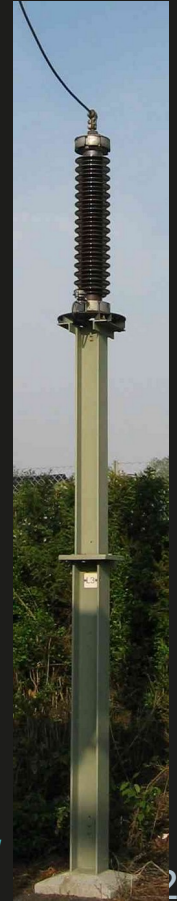
Parafoudre

Tout comme l'éclateur, le parafoudre est un parasurtenseur. Il peut être constitué d'une varistance (résistance dont la valeur décroît au delà d'un certain seuil de tension) ou d'une diode Transil.

Relié entre la phase et la terre, le parafoudre devient fortement conducteur au delà de 30 000 V environ. À titre de comparaison, la foudre provoque une tension de 750 000 V.



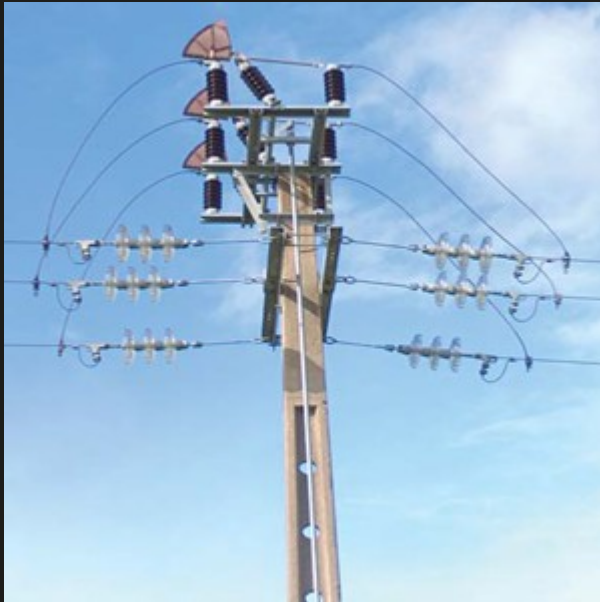
Parafoudre à varistance,
Ligne 110 kV



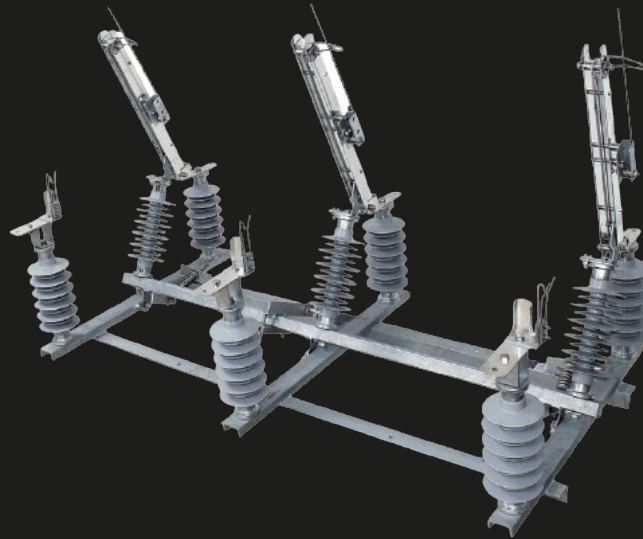
ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

Interrupteur manuel

L'Interrupteur Aérien à Commande Manuelle (IACM) permet au chargé de consignation d'ouvrir et de consigner des tronçons du réseau HTA.



NB : la manivelle de commande longe le poteau



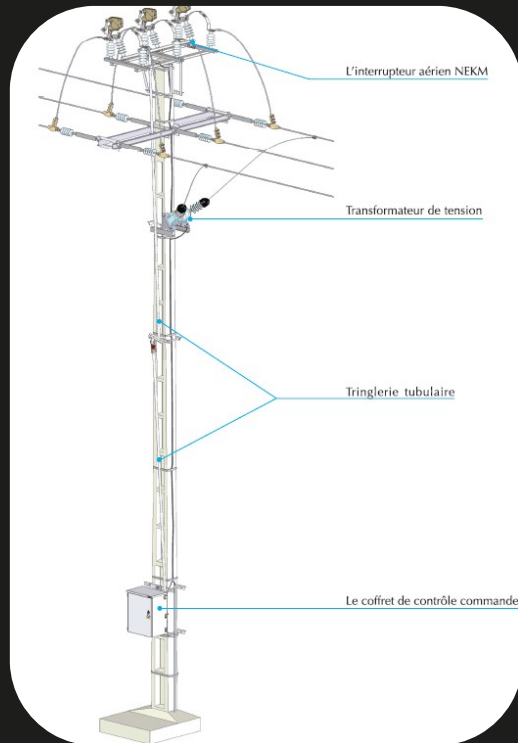
https://www.youtube.com/watch?v=mX2hy0H_Ho0
<https://www.youtube.com/watch?v=7FpCKLpTPc>



ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

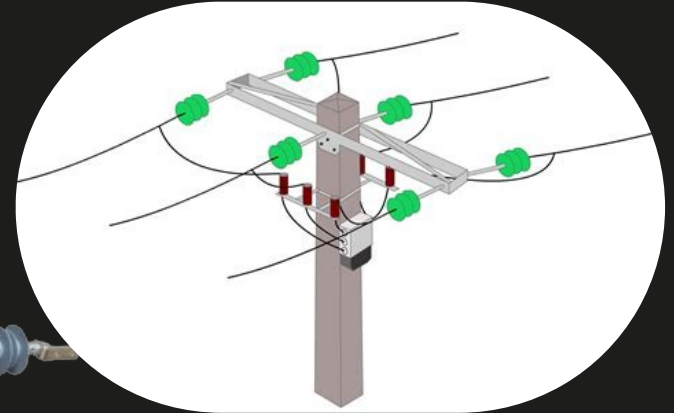
Interrupteur télécommandé

L'Interrupteur Aérien Télécommandé (IAT) peut être commandé à distance et en manuel. Il est identifiable par son antenne de réception hertzienne et son petit transformateur alimentant les organes de commande.



Interrupteur télécommandé

L'Interrupteur MSS (Merlin Soulé Simplex) remplit les mêmes fonctions qu'un IAT. Cependant l'interrupteur est réalisé dans une cellule située en tête de poteau. Il remplace l'IAT classique.



Sectionneur

Les sectionneurs orientent l'énergie électrique vers le transformateur désiré. Un moteur télécommandé permet de fermer ou d'ouvrir l'interrupteur.

Le sectionneur est capable de couper uniquement à vide (il n'a aucun pouvoir de coupure) et a pour fonction d'isoler deux parties du réseau.



<https://www.youtube.com/watch?v=ESkHqjRwFvg>
<https://www.youtube.com/watch?v=Zgz2btgY04Y>

Les postes HTA/BT sont en charge de la distribution et de la surveillance du réseau BT.

De part leur niveau de tension, ils sont à proximité des usagers finaux et donc très nombreux.



ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

Poste HTA/BT

→ Réseau HTA

→

HTA

→

→

BT

→

Départ BT →



Cellules HTA



Transformateur HTA/BT



TGBT

Cellules HTA

Les cellules HTA sont des composants basiques (interrupteur, compteur, disjoncteur, ...) adaptés à la HT.
Si leur rôle de ces composants est identique en basse tension, leur coût et technologies sont bien différents.



Cellules HTA

Le nombre de cellules dans un poste dépend du type de réseau, de la réalisation (ou non) d'un comptage et du nombre de protections nécessaires.

Chaque cellule réalise une partie du schéma. Il en existe donc une grande variété.



On trouve également des cellules combinant interrupteur, sectionneur et fusible.



Fusible de cellule
(protège le transfo)
 $U_n = 24 \text{ kV}$
 $I_n = 16 \text{ A}$



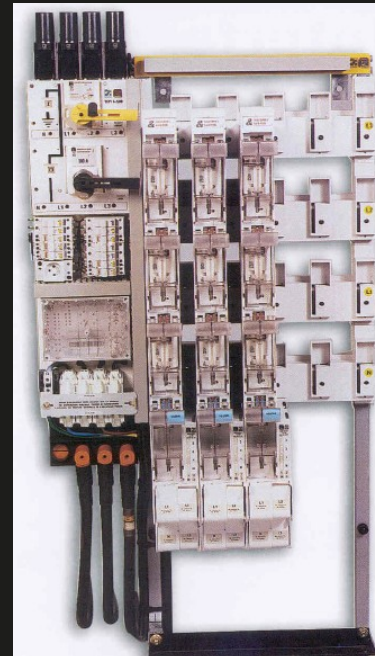
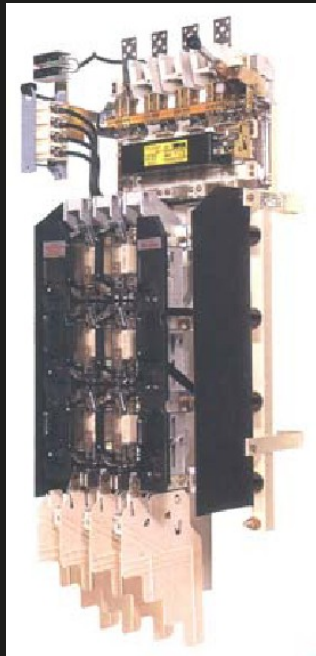
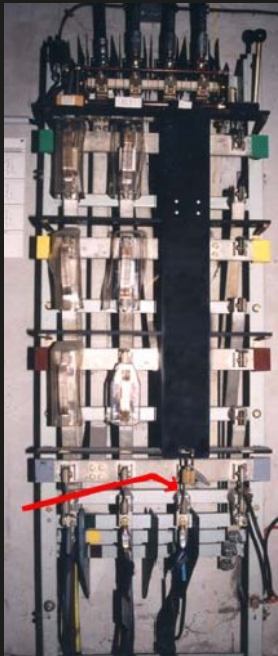
Les transformateurs assurent la conversion de tension de 20 kV vers 380 V.



TGBT – Tableau Général Basse Tension

Le Tableau Général Basse Tension (TGBT, ou armoire de distribution BT) assure la fonction de gestion et distribution de l'énergie. Il est constitué d'un ensemble de coffrets et d'armoires, entièrement composables

On y trouve les organes de protection, les appareils de mesure et de supervision, les modules de commande, de communication, ...



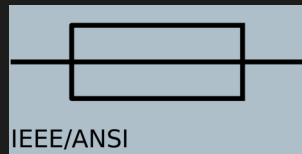
ORGANES DE PROTECTION BT



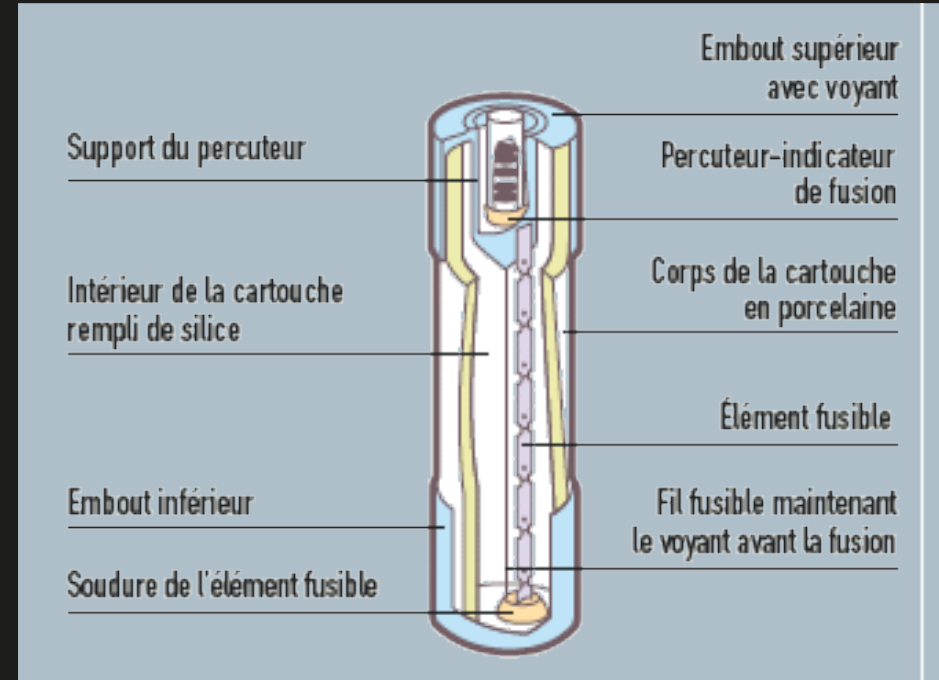
Fusible

Le fusible est une protection contre les courts-circuits (protection des biens) et est dans certains cas une protection pour les personnes.

Il est remplacé par le disjoncteur, ce dernier étant plus efficace.

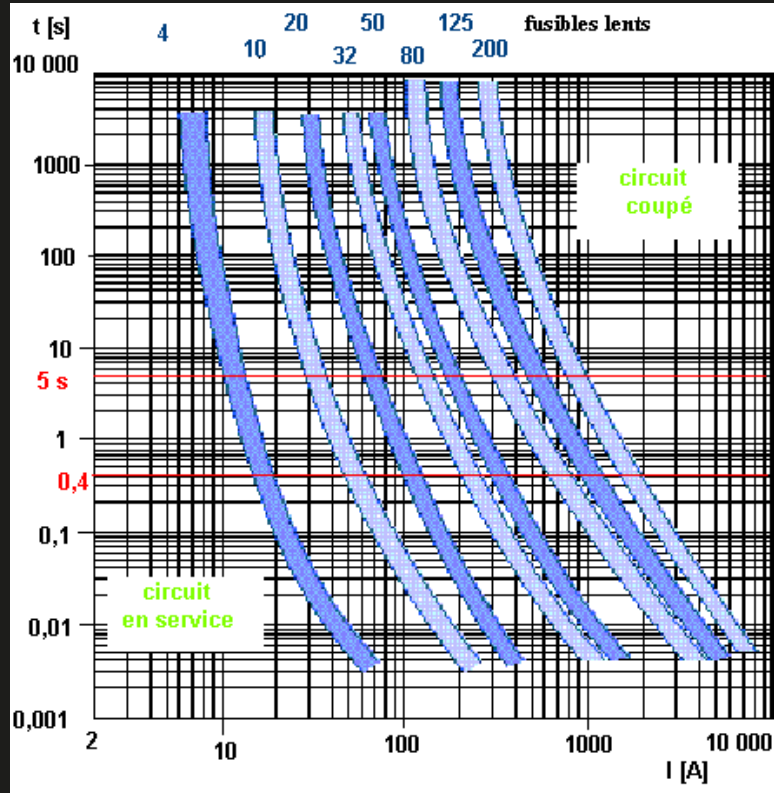


16 A
17,6 kV

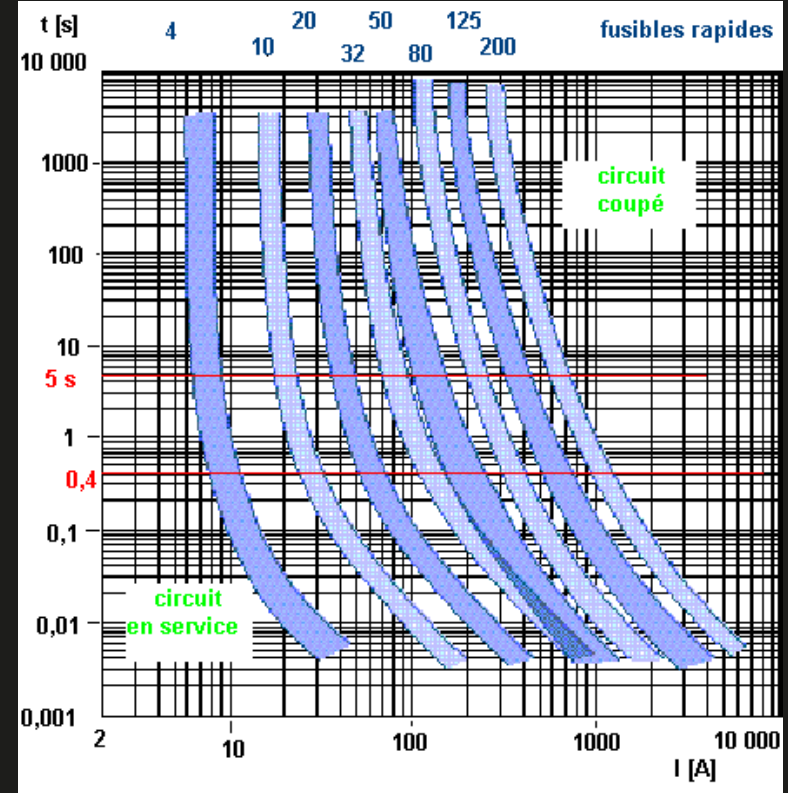


Fusible

En jouant sur les paramètres de fabrication du fusible, il est possible de fixer leur temps de réaction.



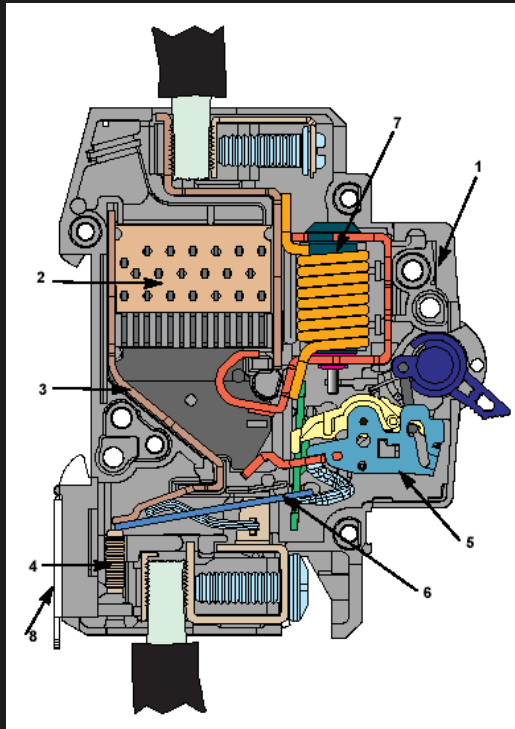
Fusibles lents pour charges inductives.



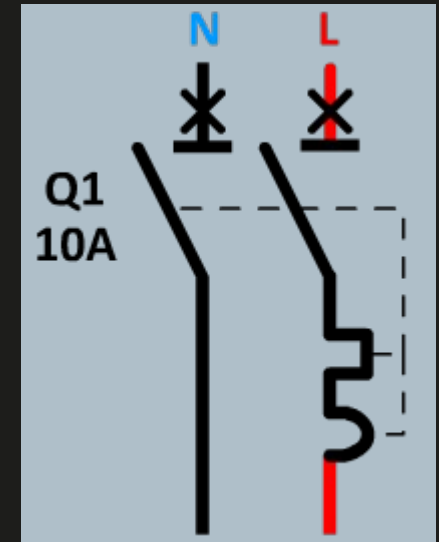
Fusibles rapides pour équipements fragiles.

Disjoncteur magnéto-thermique

Comme le fusible, le disjoncteur protège contre le court-circuit (protection des biens, et des personnes dans certains cas). Il est en revanche plus rapide que le fusible.

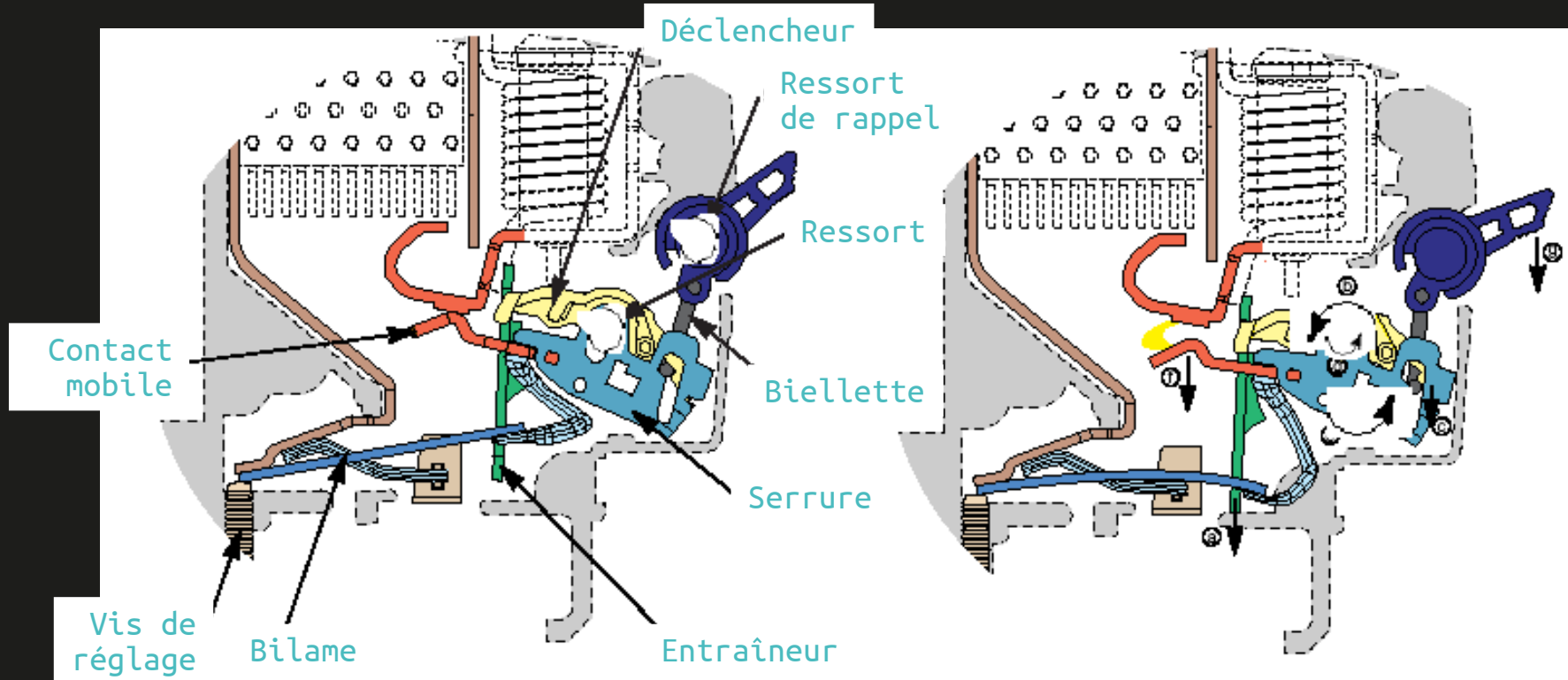


1. Coquille
2. Chambre de coupure de l'arc
3. Tôle d'arc
4. Vis de réglage (temps de réaction)
5. Sous-ensemble serrure
6. Sous-ensemble thermique
7. Sous-ensemble magnétique
8. Ressort et loquet

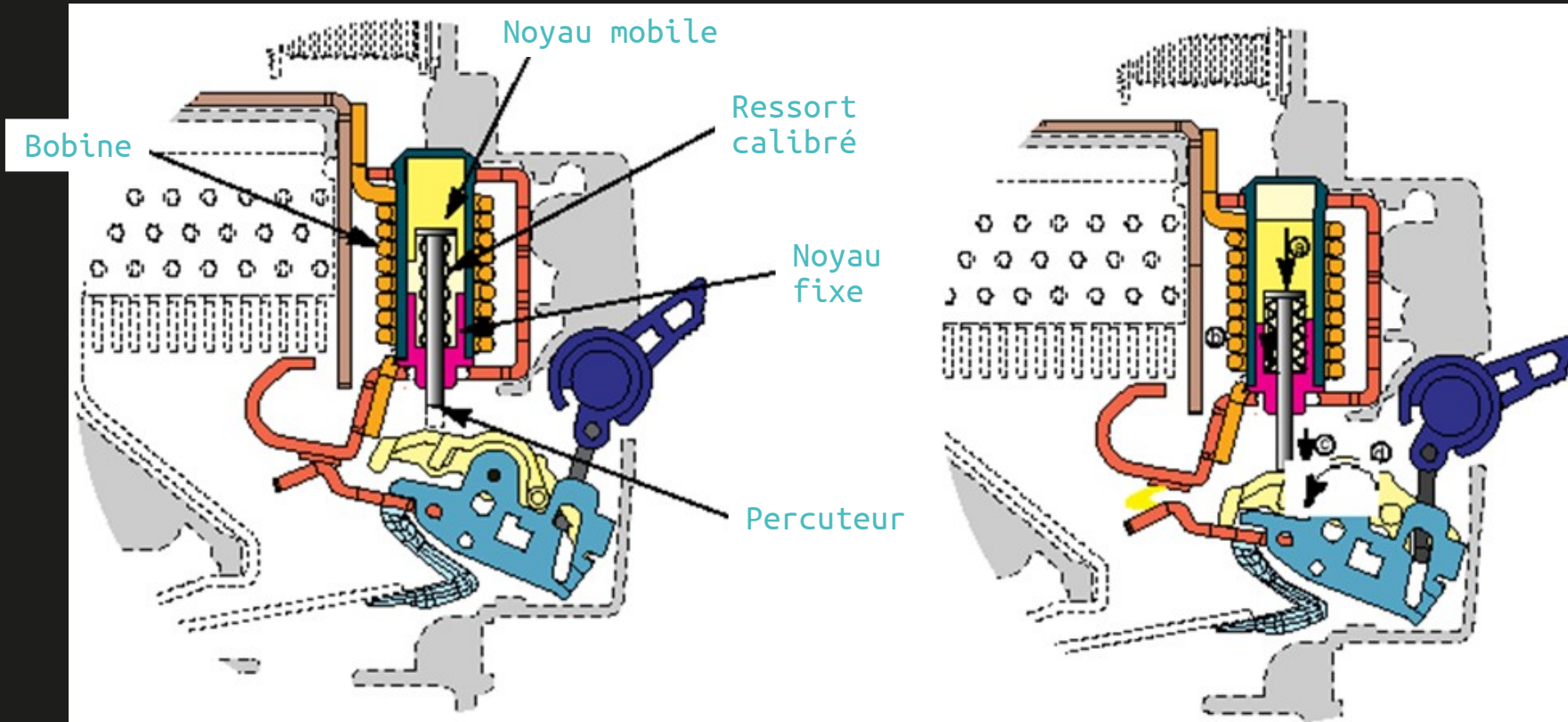


Disjoncteur magnéto-thermique

Déclenchement thermique : pour protéger des surcharges prolongées.

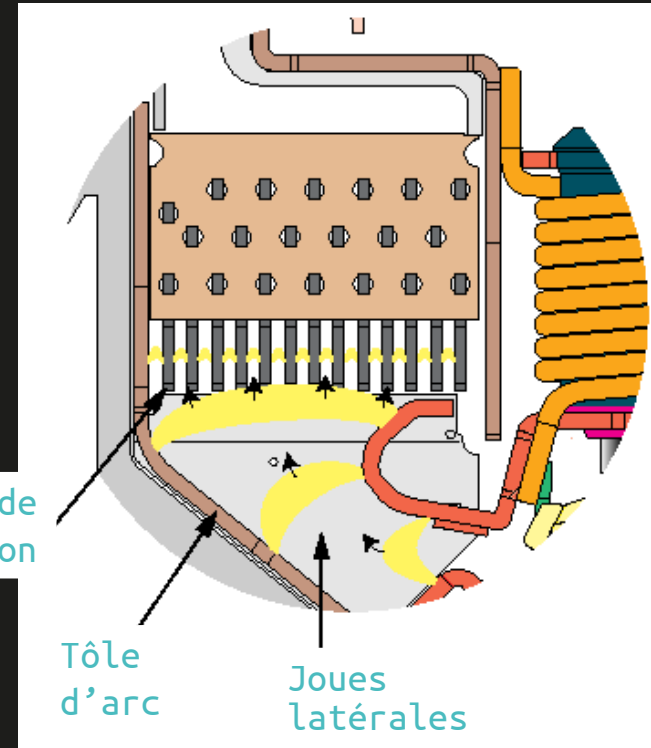
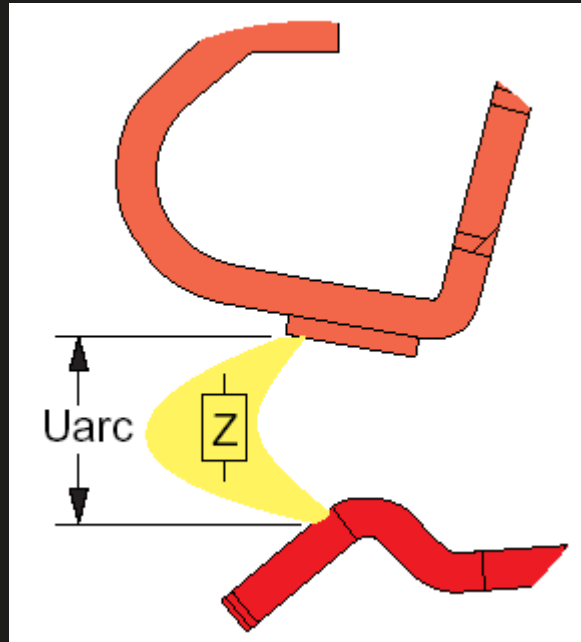


Déclenchement magnétique : pour protéger des courts-circuits francs.

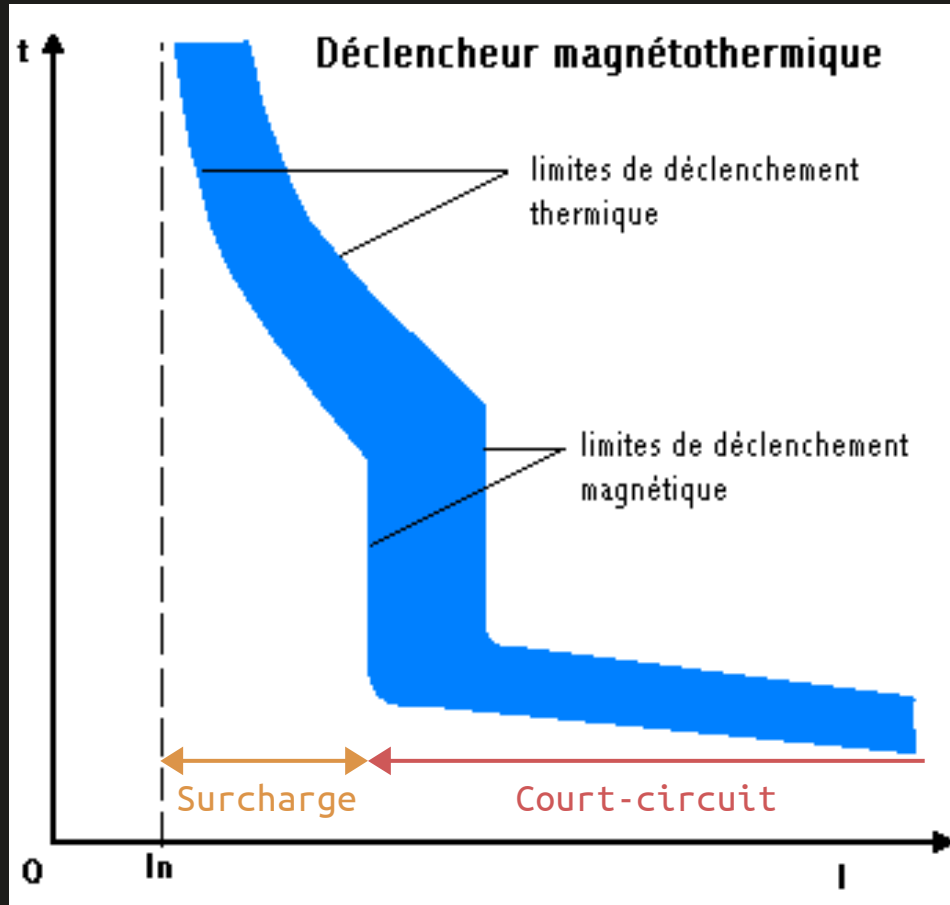


Disjoncteur magnéto-thermique

Coupure de l'arc : en soufflant l'arc, on rallonge son chemin et donc sa résistance électrique. Ceci a pour effet de diminuer le courant jusqu'à extinction.



Disjoncteur magnéto-thermique



Le dispositif thermique protège contre les surcharges, le magnétique contre les courts-circuits.

La partie verticale de la caractéristique $I(t)$ correspond au calibre du disjoncteur.

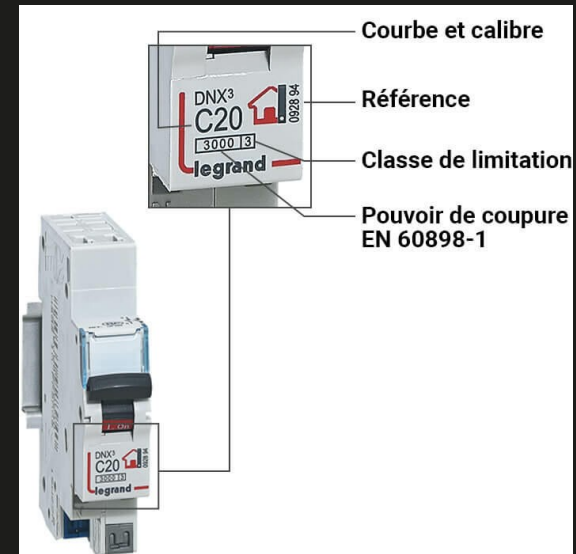
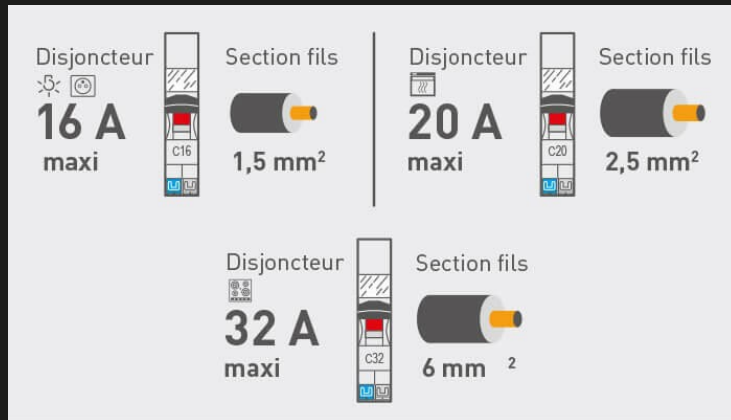
Disjoncteur magnéto-thermique

Attention à distinguer le calibre et le pouvoir de coupure du disjoncteur !

Dans les deux cas, ces valeurs sont soumises à la norme NF C 15-100 pour les installations domestiques.

Le **calibre** correspond à la valeur de courant au delà de laquelle le dispositif magnétique se déclenche (partie verticale de la courbe $I(t)$).

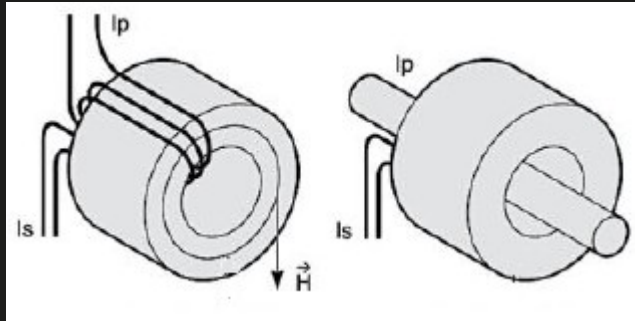
Le **pouvoir de coupure** correspond à l'intensité maximale à laquelle le disjoncteur va assurer sa fonction de coupure du courant.



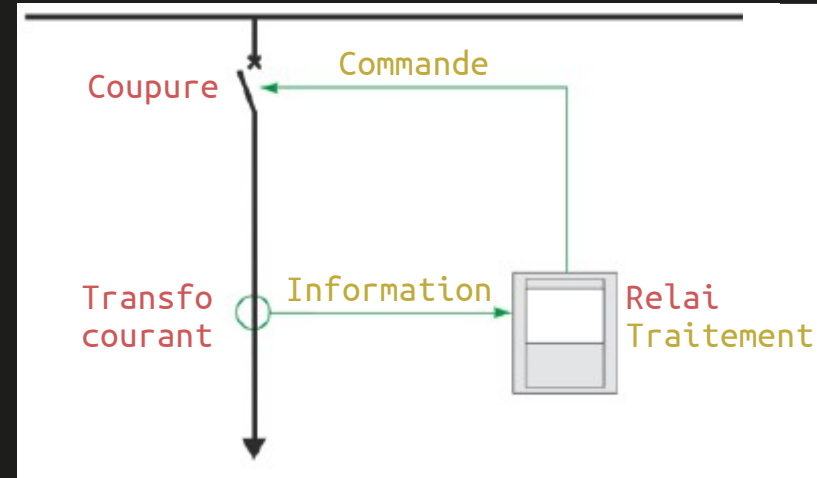
Disjoncteur industriel

Les disjoncteurs industriels sont quant à eux commandés numériquement.

- 1) Le **transformateur de courant** relève l'intensité qui circule dans le fil
- 2) La courbe de déclenchement du **relai** est programmable
- 3) L'**organe de coupure** ouvre le circuit s'il en reçoit l'ordre

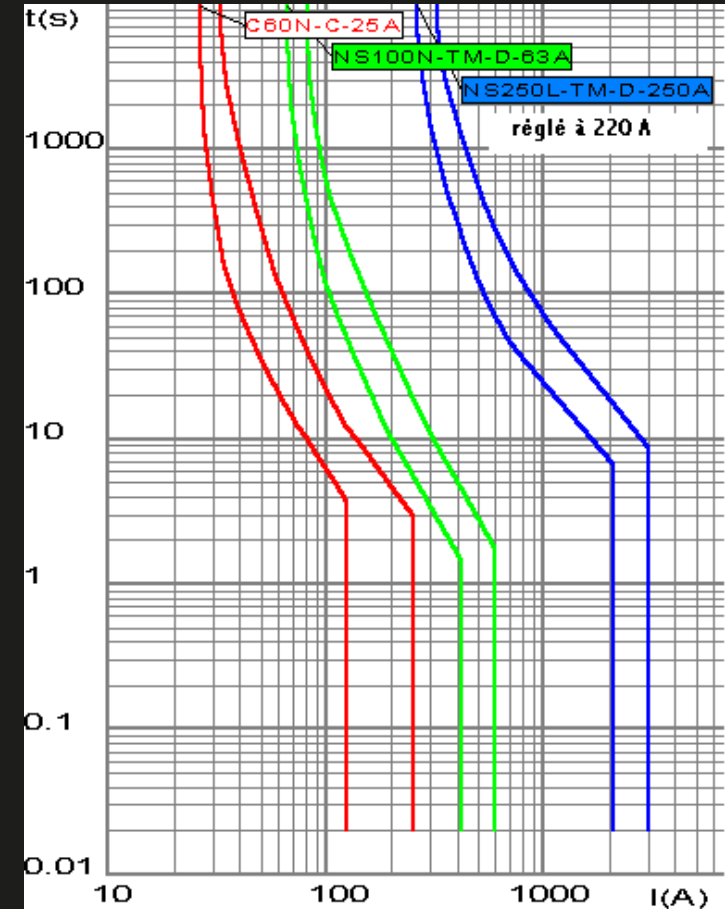
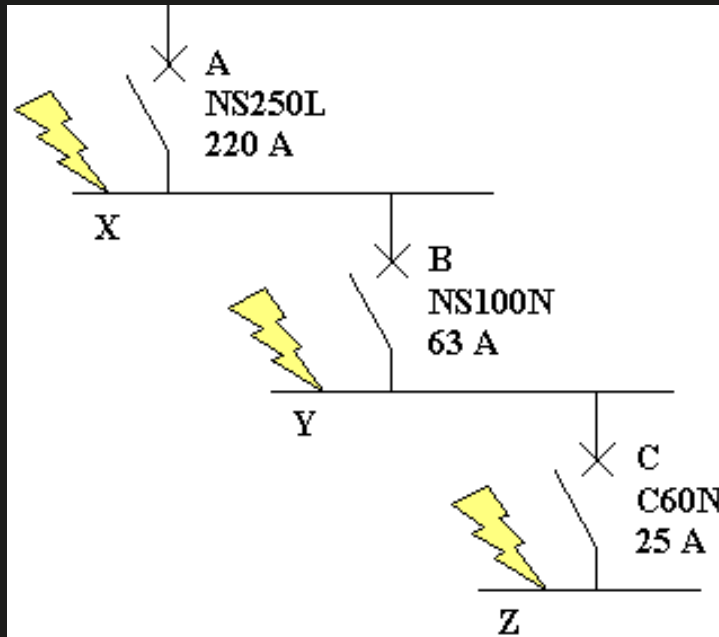


Un transformateur de courant est optimisé pour que le courant secondaire soit proportionnel et en phase avec le courant primaire.



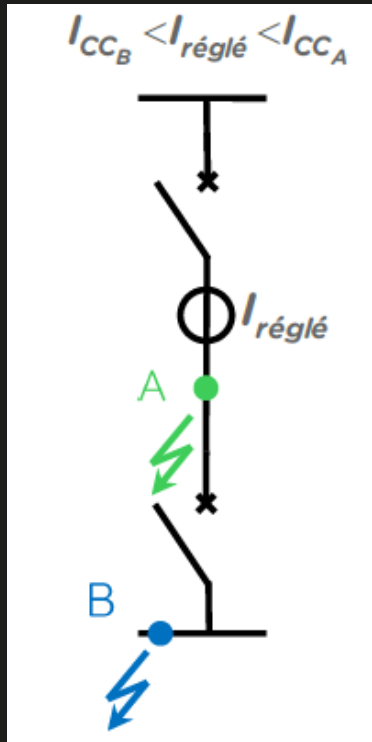
Sélectivité

La sélectivité doit être respectée pour couper le réseau au plus près du défaut et ainsi éviter les coupures générales.

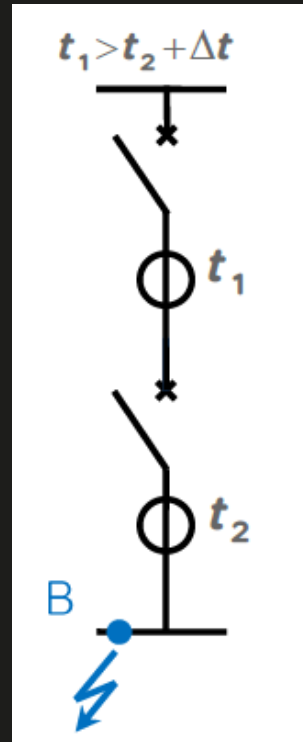


Sélectivité

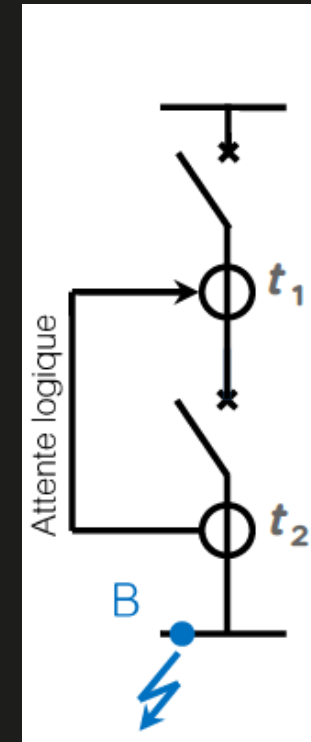
Principes de sélectivité



Sélectivité ampèremétrique



Sélectivité chronométrique



Sélectivité logique



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN
dimitri.boudier@ensicaen.fr

Avec la participation de

- Ahmed Aouchar (ex-PRAG ENSICAEN)
- Matthieu Denoual (MCF ENSICAEN)
- Bureau Central d'Exploitation Enedis de Caen