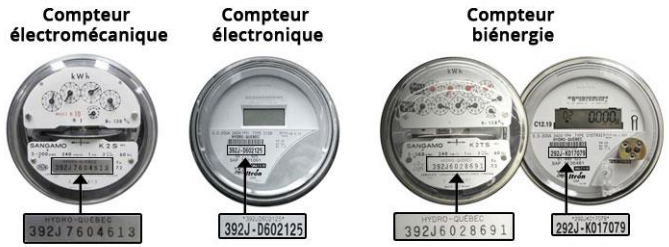
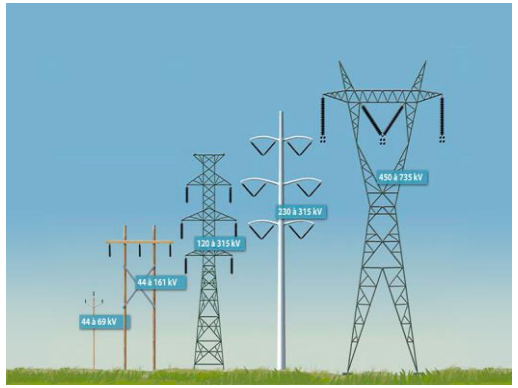
ELE 1409: ÉLECTRICITÉ DU BÂTIMENT

COURS 8 & 9: RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET FACTURATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Liens vidéo
https://www.loom.com/share/0de635618a864dd495eb19a8a493bb43?sid=aa04ea74-cf78-412e-927a-7596aaa57ec9





POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Objectifs des cours 8 & 9

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

À l'issu de ce cours, l'étudiant(e) sera en mesure de :

- **Citer quelques moyens technologiques** utilisés pour produire l'électricité
- **Analyser** les systèmes de distribution de l'énergie électrique.
- **Connaitre** les **principaux éléments** d'une installation électrique.
- **Évaluer le coût de l'énergie en fonction de la catégorie du client**.

Sommaire

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

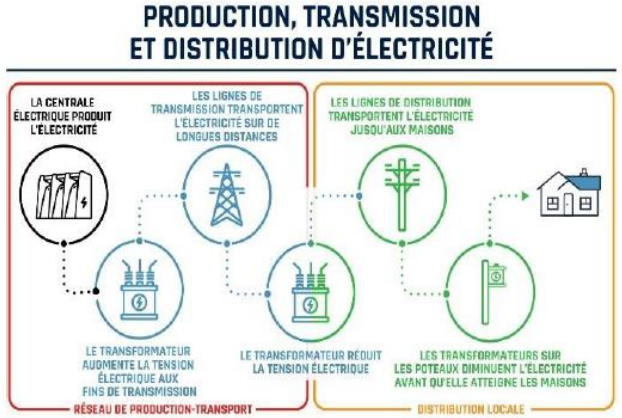
- ❑ RÉSEAUX ÉLECTRIQUES
  - Généralités
  - Système de production de l'énergie électrique
  - Distribution de l'énergie électrique
- ❑ FACTURATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Réseaux électriques: *Généralités: Définition*

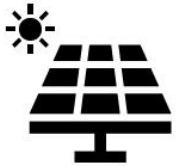
Le **réseau électrique** se situe entre la production et l'utilisation de l'énergie électrique.

Besoin en énergie

Réseau électrique

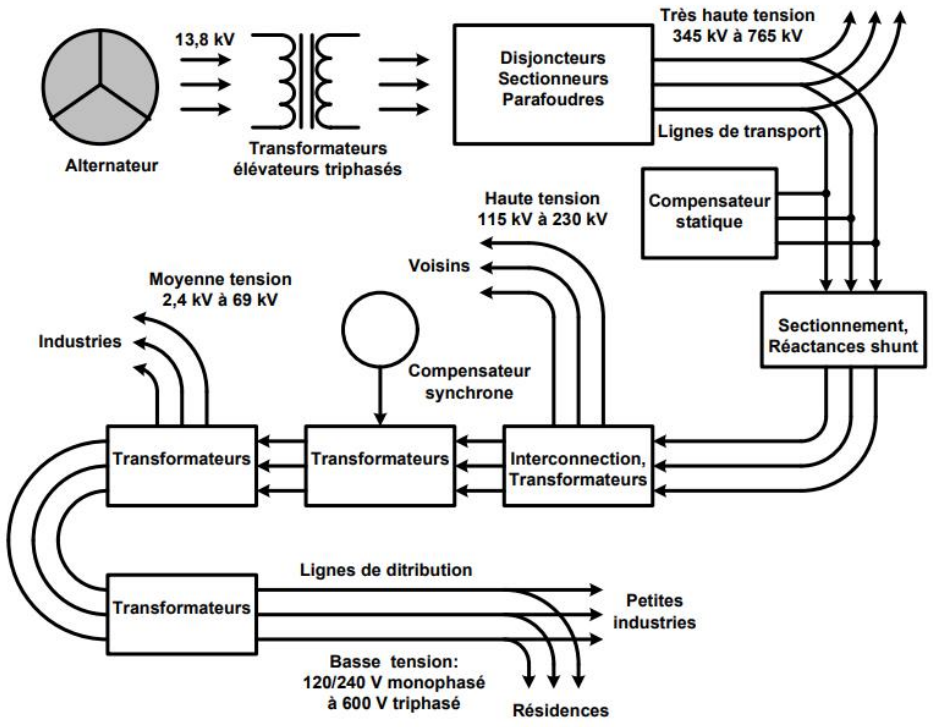


Production de l'énergie électrique

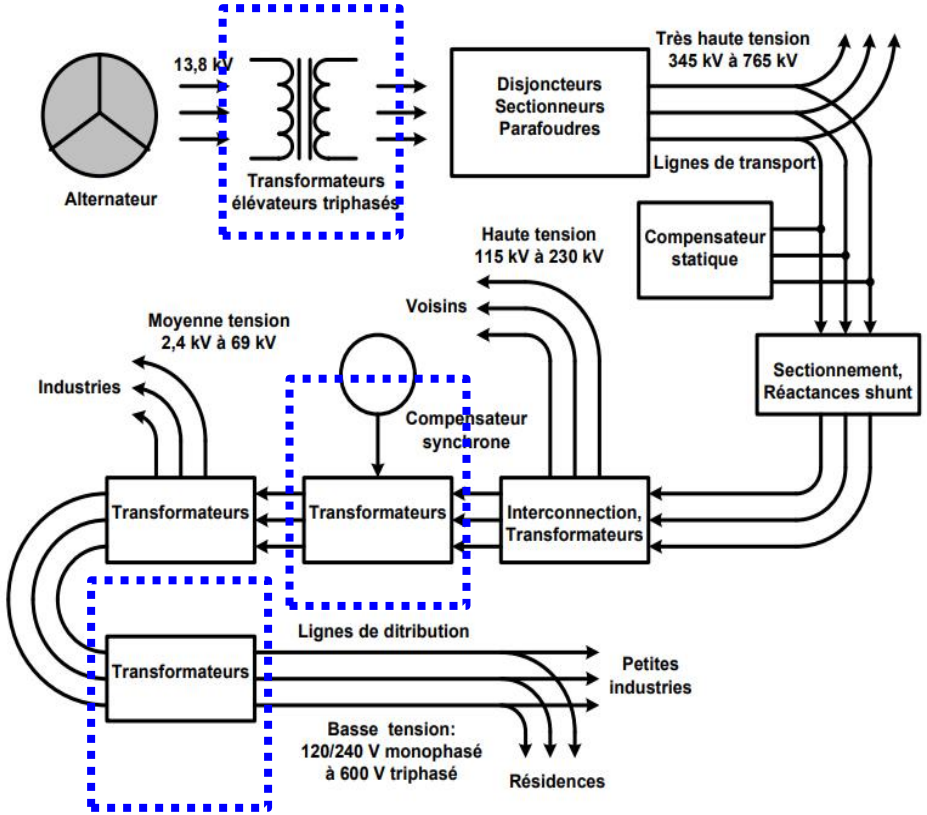


Réseaux électriques: *Généralités: Définitions*

Un **réseau électrique** dans la réalité est beaucoup plus complexe et constitué de centaines de milliers de composants permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs de façon **sécuritaire**. La figure ci-contre montre la structure d'un réseau électrique. En plus des câbles électriques, on y retrouve des **transformateurs**, les **convertisseurs électriques**, des centrales d'appareillage de manœuvre et de protection (disjoncteurs, fusibles, interrupteurs, parafoudres, les sectionneurs, les contacteurs, etc.).



Réseaux électriques: *Généralités: Définitions*

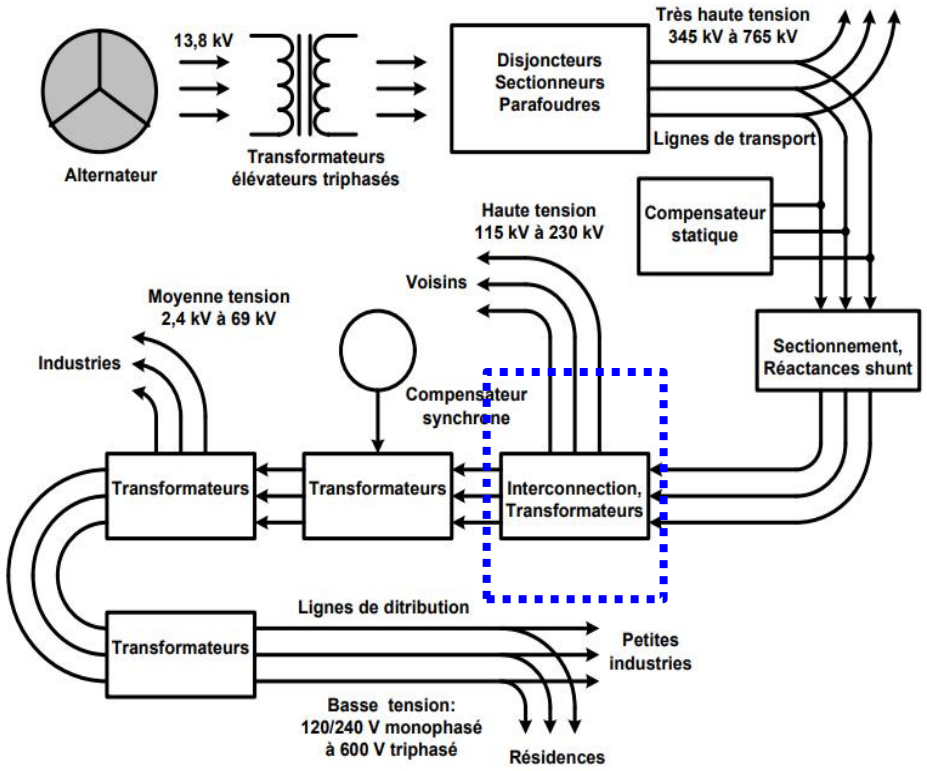


- Rôle des transformateurs: L'énergie est produite dans une centrale, on utilise des **transformateurs pour élever la tension**; cela permet de réduire les pertes Joule dans les lignes de transport. On rappelle que ces pertes sont proportionnelles au carré du courant dans les fils de ligne.

$$pertes \propto I^2 \Rightarrow pertes \propto \left(\frac{P}{V}\right)^2 = \frac{P^2}{V^2} \Rightarrow \boldsymbol{p} \propto \frac{\boldsymbol{P^2}}{\boldsymbol{V^2}}$$

- Des transformateurs abaisseurs seront ensuite utilisés pour abaisser la tension lors de l'utilisation.

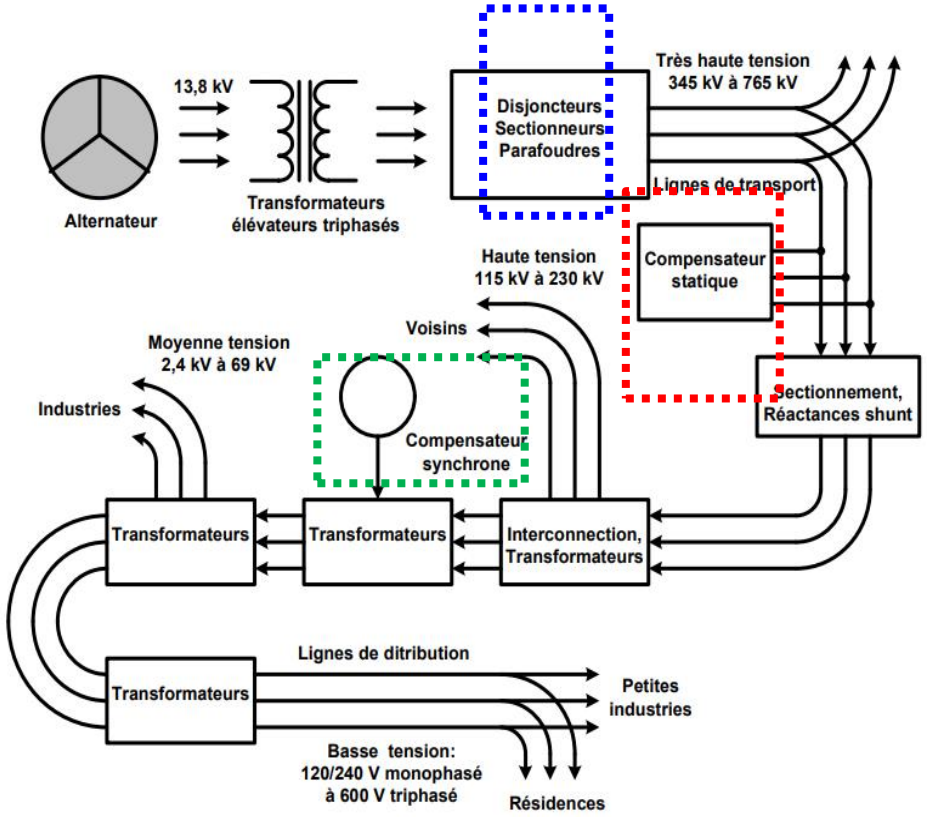
Réseaux électriques: *Généralités: Définitions*



- Le **poste d'interconnexion** est le point de jonction de l'énergie en provenance de plusieurs centrales; il permet :

- d'échanger de l'énergie
- d'assurer la continuité de service en cas de panne d'une centrale.
- de mieux répartir l'énergie.

Réseaux électriques: *Généralités: Définitions*



- Les **disjoncteurs** assurent la protection contre les surintensités (**court-circuit** et **surcharges**).
- Les **sectionneurs** permettent d'isoler une partie du circuit.
- Le **parafoudre** permet de limiter les surtensions transitoires d'origine atmosphérique et à diriger les ondes de courant vers la terre.
- Les **compensateurs statiques** permettent de moduler la puissance réactive de la ligne de transport.
- Les **compensateurs synchrones** permettent de compenser l'énergie réactive.

Réseaux électriques: *Généralités: Les types de ligne*

- L'énergie est **produite** dans plusieurs centrales en **moyenne tension (MT)** et doit être élevée en **très haute tension (THT)** pour être **interconnectée** et **transportée** en **haute tension (HT)**.
- De la production à l'utilisation, l'énergie transite alors entre les **lignes THT, HT MT et BT**.
- Les tensions en **gras (rouge)** dans le tableau ci-contre sont celles utilisées de préférence.

Classes	Tension nominale 3 fils	Tension nominale 4 fils
B.T.	**120V/240V (monophasé)**	**120 V/208V**
	480 V	**277V/480V**
	600 V	
M.T.	2400 V	
	4160 V	
	4800 V	
	6900 V	
	13800 V	**7200 V/12470 V**
	23000 V	**7620 V/13 200 V**
	34500 V	7970 V/13800 V
	46000 V	**14400 V/24940 V**
	69000 V	**19920V/34500 V**
HT	**115 000 V**	
	138 000 V	
	161 000 V	
	230 000 V	
T.H.T	**345 000 V**	
	500 000 V	
	735 000 V	
	765 000 V	

Réseaux électriques: *Production de l'énergie électrique*

- La **production de l'énergie électrique** consiste à **la transformation d'une source d'énergie primaire (eau, soleil, vent, uranium, etc) en énergie électrique**. Les usines de transformation sont appelées des **centrales de production**.
- Toutes les formes d'énergie peuvent être transformées en énergie électrique.
- Les systèmes de production de l'énergie dépendront essentiellement de la disponibilité de la ressource et au Québec c'est l'**eau** qui est utilisé du fait de l'importance du réseau hydrographique.

Centrales	Sources primaires	Centrales	Sources primaires
Hydroélectrique	Eau	Éolienne	Vent
Thermique	Hydrocarbure et biomasse	Photovoltaïque	Soleil
Nucléaire	Éléments radioactifs (uranium)	Géothermique	Chaleur du sol

Centrale hydroélectrique Beauharnois

Source: http://www.hydroquebec.com/data/metas/fb/photo-hydro-quebec-2012-250-D6Q9785.jpg

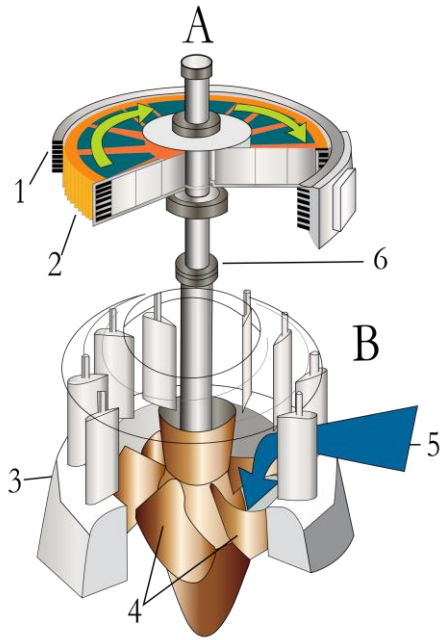
Réseaux électriques: *Production de l'énergie électrique*

Pour des quantités d'énergie consistante, on distinguera

- Le moyen de production **mécanique** qui utilise un groupe **turbine-alternateur**.

- Le moyen de production **photovoltaïque** qui consiste à l'extraction des électrons par la lumière.

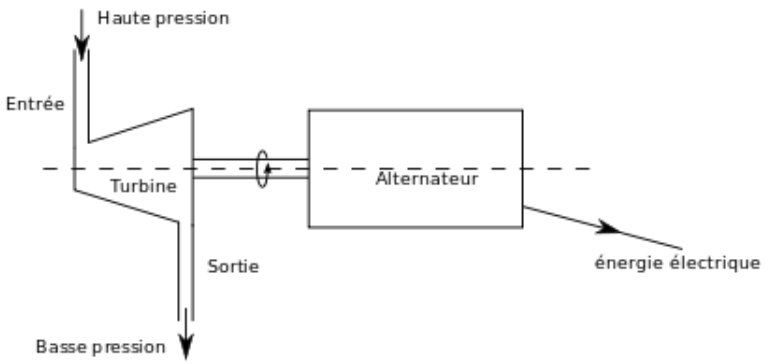
Moyens de production	Exemple de centrale
Mécanique	Hydroélectrique, Éolienne, thermique, nucléaire
Photovoltaïque	Solaire



Réseaux électriques: *Production de l'énergie électrique*

- La différence entre les techniques de production **mécanique** d'énergie réside dans la **source d'énergie primaire** utilisée à savoir l'**eau** dans le cas des **centrales hydroélectriques**, l'**uranium** dans le cas des **centrales nucléaires**, le **charbon** dans le cas des **centrales thermiques**.
- Une **turbine** est un dispositif rotatif destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre.
- La turbine est toujours couplée à un **alternateur dont la fonction est de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.**

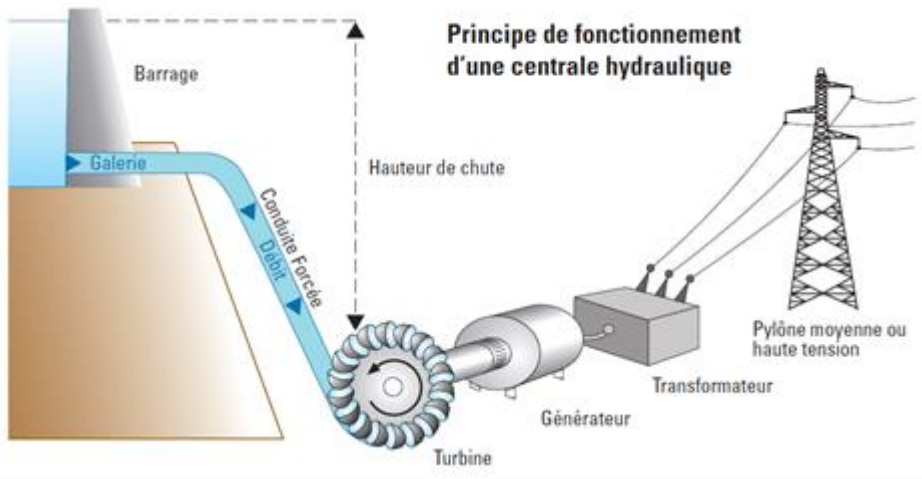
Schéma de principe d'une turbine



Source: https://www.hydro.mb.ca/assets/img/figurebox/wuskwatim-turbine-installation_hu134c1e0808f20a2efce743bfe8a7a180_166982_225x0_resize_q80_h2_lanczos.webp

Réseaux électriques: *Production de l'énergie électrique*

- **Principe hydroélectrique**: L'**énergie potentielle** de l'eau en est convertie en énergie électrique ceci en passant par l'énergie mécanique au moyen d'une turbine hydraulique.
- **Puissance disponible**: Elle est fonction de la hauteur $\boldsymbol{h}$ du débit $\boldsymbol{q}$ comme suit:



$$\boldsymbol{P = 9,8\, q.h} \quad \begin{cases} P \text{ en } kW \\ q \text{ en } m^3/s \\ h \text{ en } m \end{cases}$$

- **Exemple d'application**: Données : $h = 324\ m$; $q = 1370\ m^3/s$

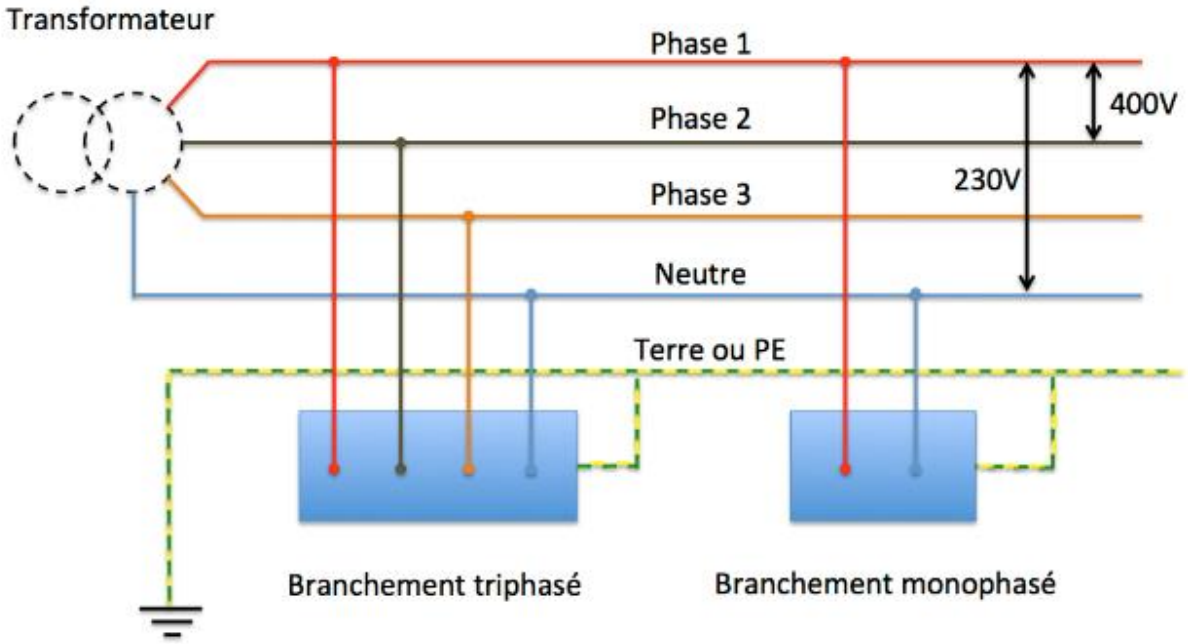
Calcul de la puissance hydraulique disponible

$P = 9{,}8\ q.h = 9{,}8 \times 1370 \times 324 =$

$\boxed{\boldsymbol{4350024\ kW = 4350\ MW = 4,35\ GW}}$

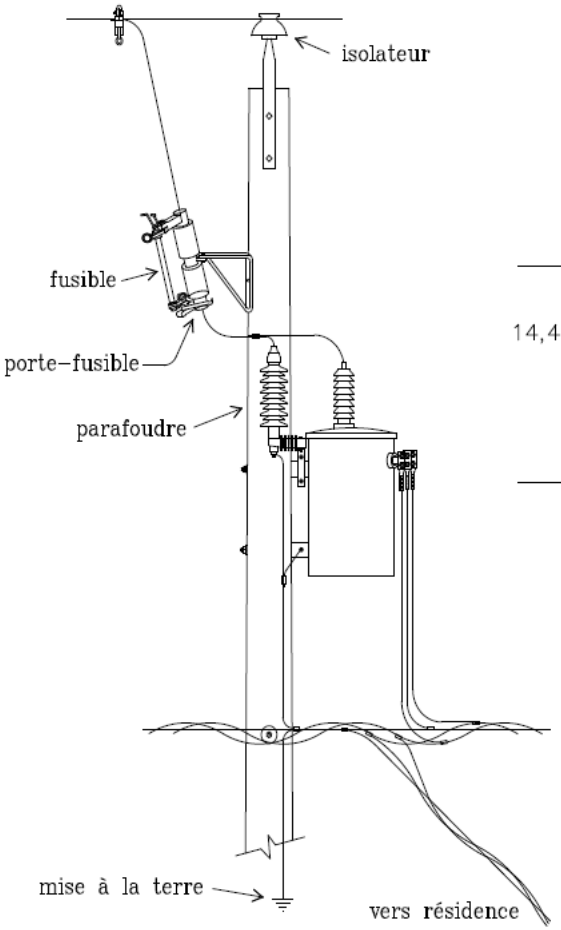
Réseaux électriques: *Distribution de l'énergie électrique*

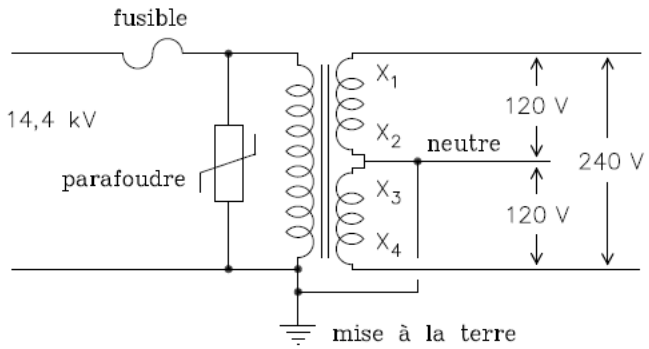
- La distribution consiste à desservir les consommateurs; celle-ci peut être monophasée ou triphasée.
- Le transformateur d'alimentation est généralement triphasé avec un couplage ΔY.



Réseaux électriques: *Distribution de l'énergie électrique*

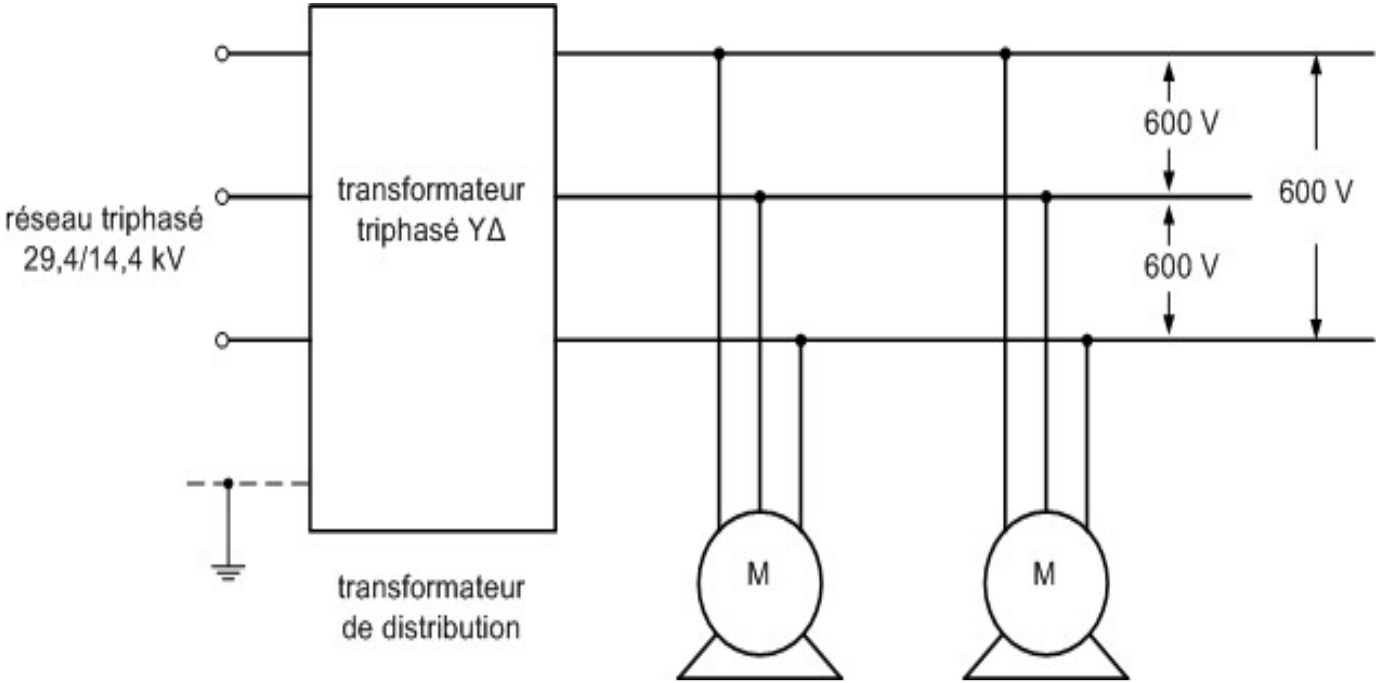
- Système de distribution monophasé 120 /240 V à trois fils





❑ Système de distribution triphasé à 600 V

- ❑ Distribution courante pour l'alimentation indépendantes des machines électriques.
- ❑ Permet de réduire l'effet des variations de tensions répétées, dues aux démarrages fréquents des moteurs dans les installations industrielles, sur les circuits sensibles, comme l'éclairage.



❑ Exigences de base des systèmes de distribution

❑ **Sécurité.**

✓ protection contre les chocs électriques;

✓ protection contre le bris mécanique des conducteurs;

✓ Protection contre les surcharges;

✓ Protection contre les dangers présentés par certains emplacements

❑ **Chute de tension dans les conducteurs.**

✓ Elle ne doit pas dépasser **1%** ou **2%** de la tension ligne à neutre

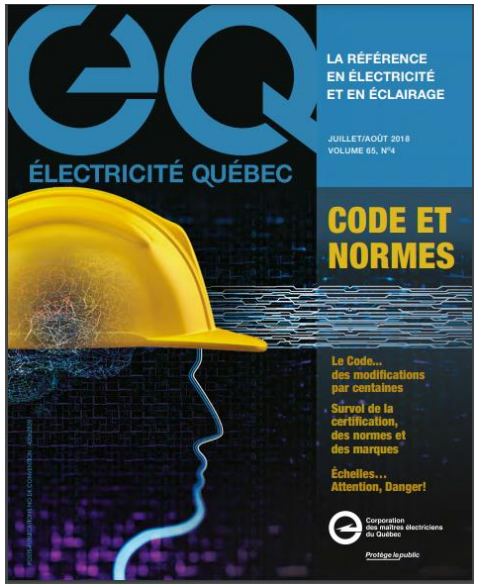
❑ **Durée de vie des conducteurs**

✓ Elle doit être de l'ordre de 50 ans et plus

❑ **Économie**

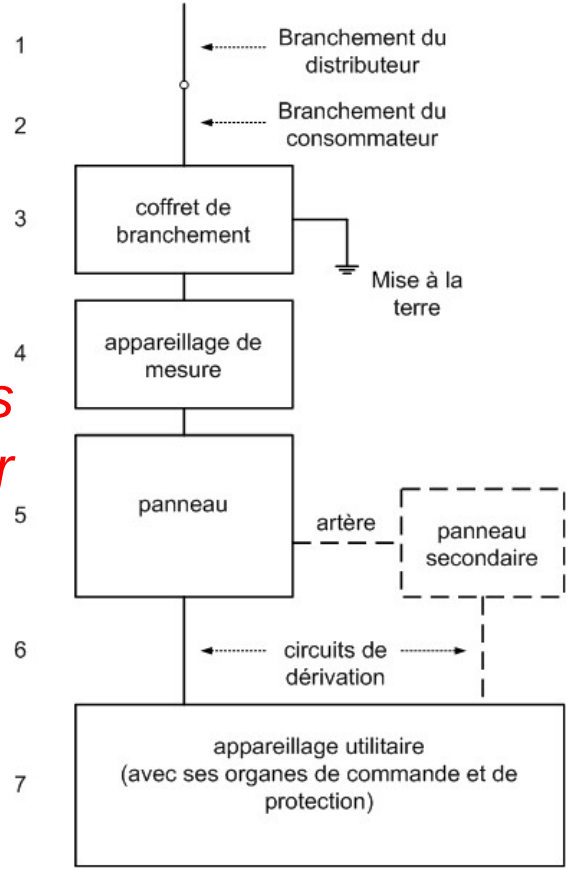
✓ Réduction des coûts de l'appareillage de distribution et conformité avec les exigences précédentes.

❑ **Notes**: Le Code de l'électricité régit les normes d'installation et de sécurité.

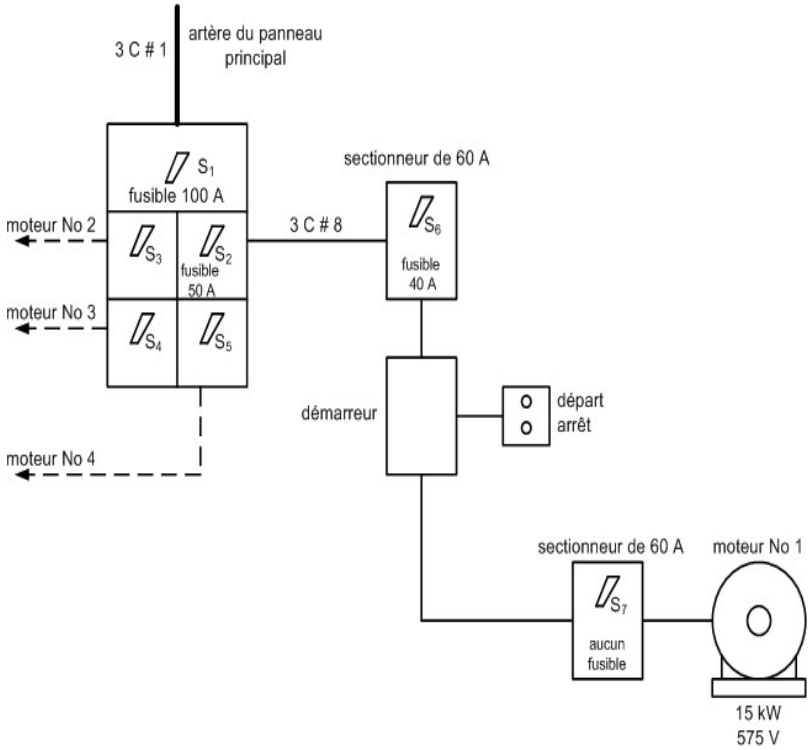


❑ Principaux éléments d'une installation électrique

- ❑ Branchement du distributeur.
- ❑ Branchement du consommateur.
- ❑ Coffret de branchement.
- ❑ Appareillage de mesure.
- ❑ Panneau.
- ❑ Panneaux secondaires (*si plus tard on souhaite agrandir l'installation*).
- ❑ Circuit de dérivation.
- ❑ Appareillage utilitaire.

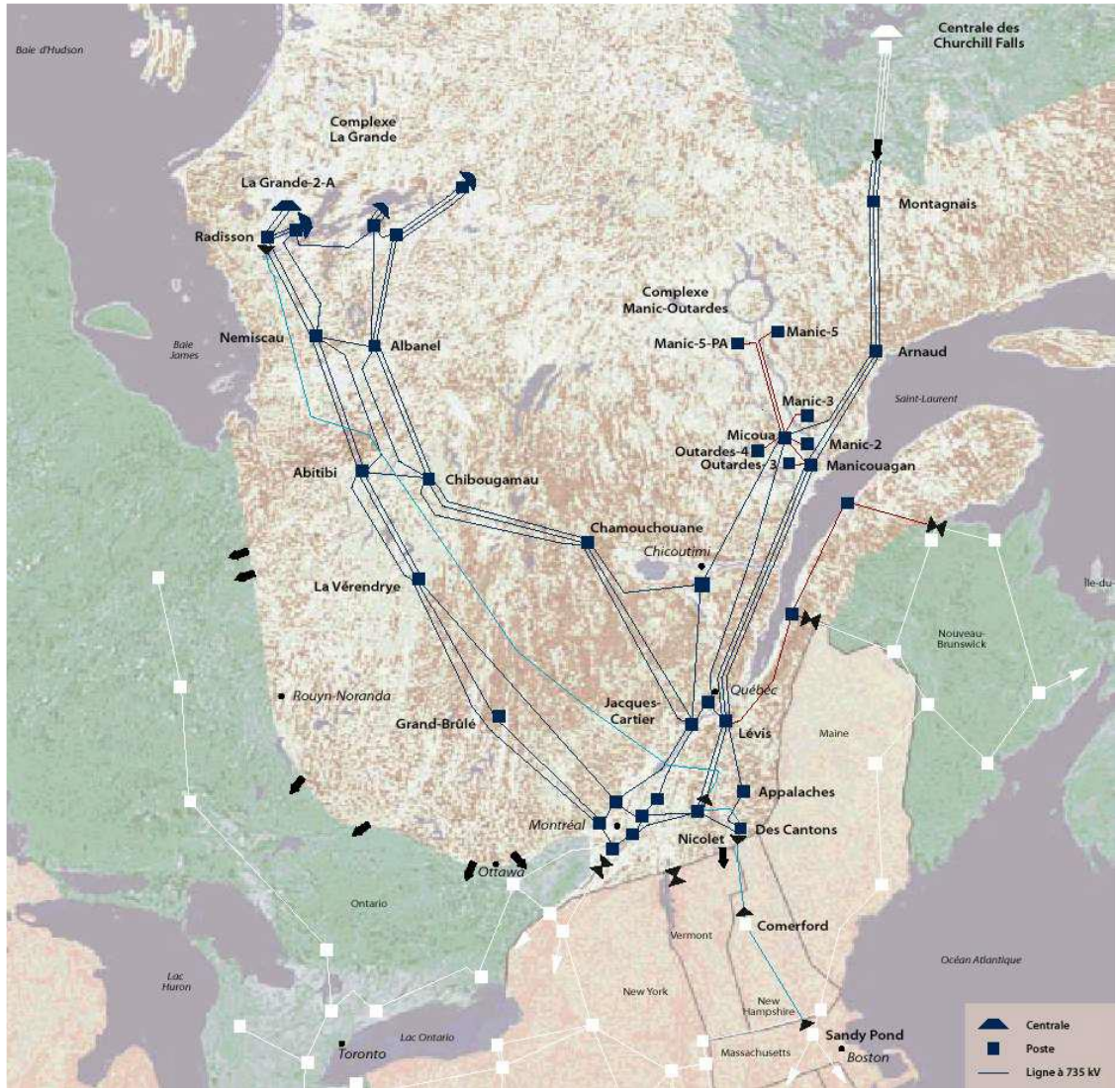


Alimentation d'un moteur



Réseaux électriques: *Le réseau d'Hydro-Québec*

- ❑ Puissance installée totale : **37,2 GW**
- ❑ Nombre de centrales hydrolectriques: **61**
- ❑ Nombre de centrales thermique: **24**
- ❑ Lignes aériennes et souterraines
- ✓ Transport: **34272 km**
- ✓ Distribution: **224659 km**
- ❑ Postes: **533**



Facturation de l'énergie électrique: *définitions*

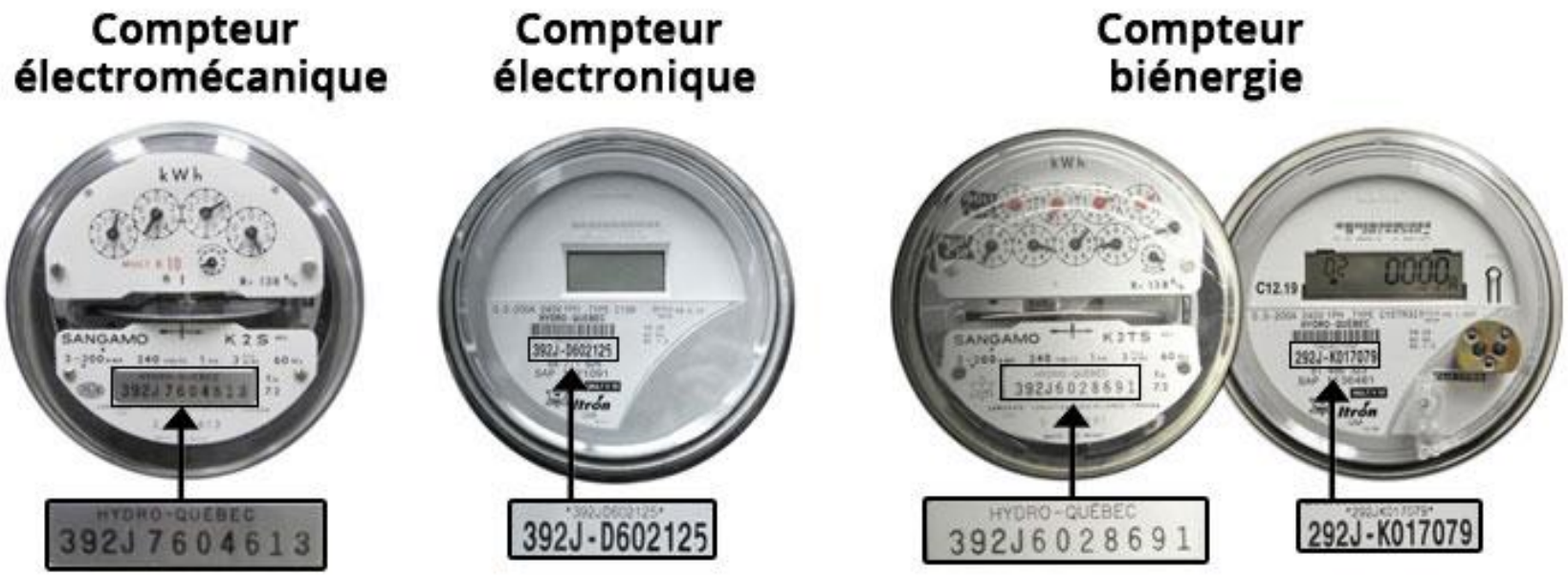
L'énergie électrique comme la puissance électrique sont deux façons de mesurer l'électricité. La puissance est la vitesse à laquelle l'énergie est consommée. Pour calculer la consommation en énergie électrique, l'unité utilisée est le **kilowattheure.** On utilisera la lettre W pour le calcul de l'énergie électrique.

- Un **wattheure** est l'énergie absorbée par un appareil d'un watt, utilisé pendant une heure.
- Un **kilowattheure = 1000 wattheures**

Si le temps est mesuré en seconde et la puissance en watt, l'énergie absorbée pendant 1000 heures par un appareil de 1 watt est **3,6 MJ**, donc un **kilowattheure est l'équivalent de 3,6 MJ**.

Facturation de l'énergie électrique: *Mesurage*

Le **compteur** est un appareil qui permet de mesurer la consommation (kWh) et la puissance (kW). Il peut être mécanique, électromécanique ou électronique.



Note : les systèmes à la biénergie utilisent de l'électricité comme source d'énergie principale et bascule vers les gaz naturels lors des périodes de grands froids.

Facturation de l'énergie électrique: *Principe de facturation*

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique entraînent des coûts importants qui peuvent être classés en **deux catégories**.

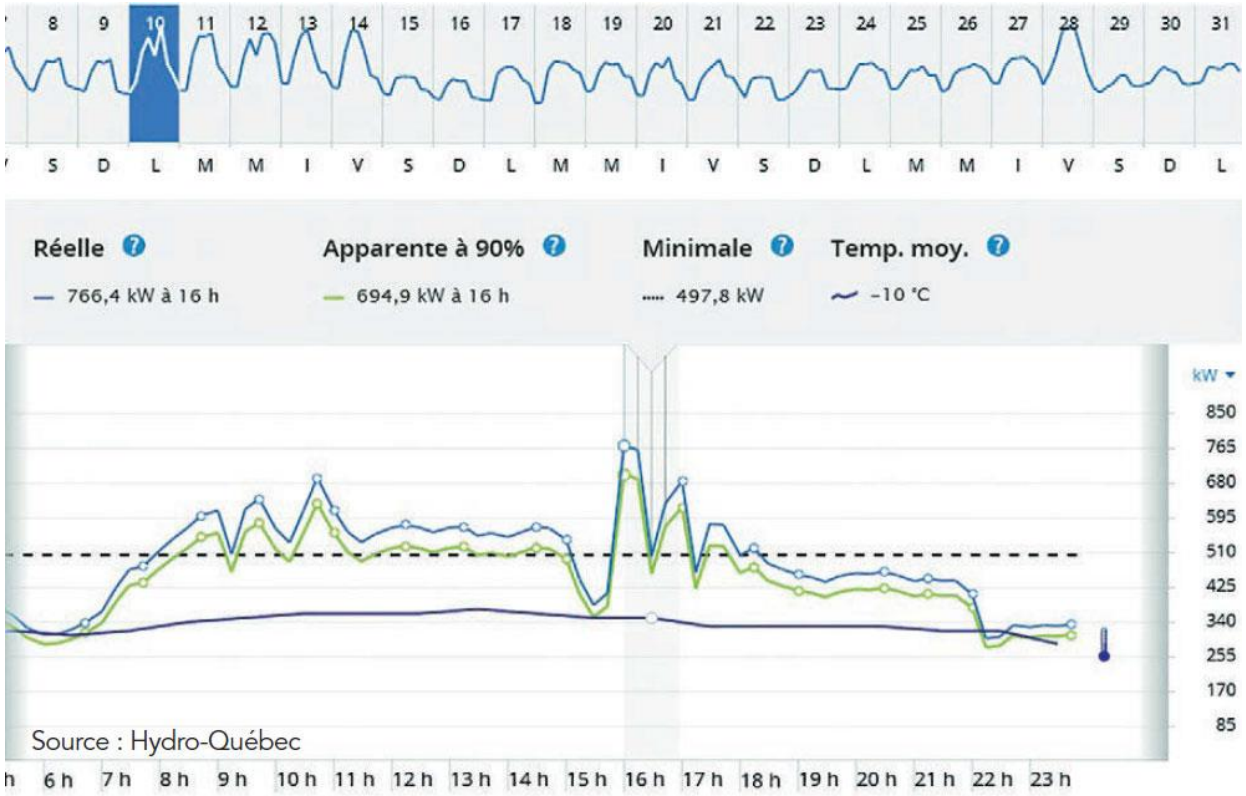
- Les **frais fixes** qui comportent les coûts d'amortissement des barrages, alternateurs, disjoncteurs, transformateurs, lignes de transport, etc.

- Les **frais courants** comportent les salaires du personnel, les frais d'administration et d'entretien, le coût du combustible servant à produire l'électricité et toute autre dépense.

Facturation de l'énergie électrique: *Critères de facturation*

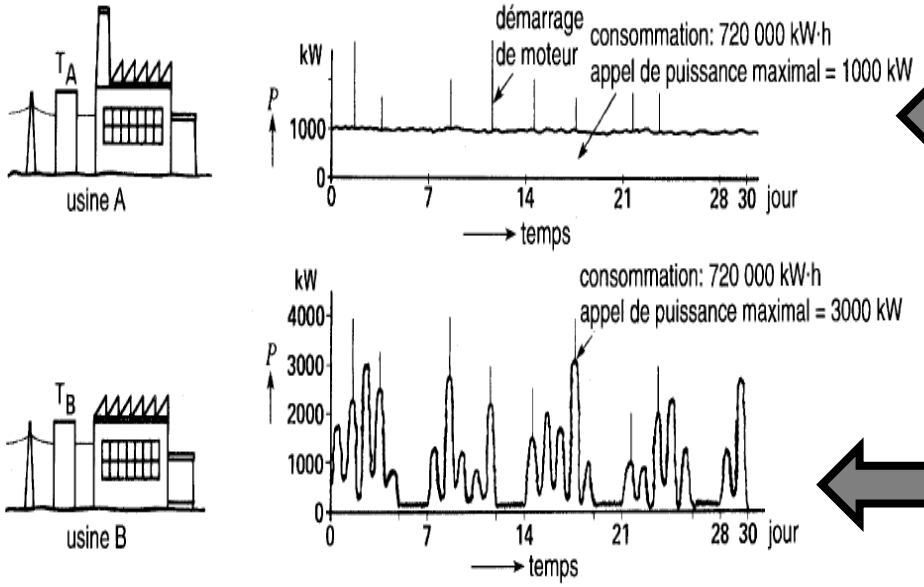
3 critères sont considérés pour évaluer le coût de l'énergie.

- L'**énergie consommée** en $kW.h$.
- L'**appel de puissance** en kW
- L'**appel de puissance apparente** en kVA



Facturation de l'énergie électrique: *Critères de facturation*

- Tarification basée sur l'**appel de puissance** en kW



Extrait du livre de WILDI

L'usine A fonctionne en pleine charge jour et nuit et elle absorbe une puissance active presque constante ($1000\ kW$).

L'usine B fonctionne de façon intermittente mais lorsqu'elle fonctionne elle fait un fort appel de puissance ($3000\ kW$).

<u>Conclusion</u>: La capacité du transformateur qui alimente l'usine B doit être supérieure à celle de l'usine A cela impactera le coût de l'énergie bien que la quantité d'énergie consommée soit la même.

Facturation de l'énergie électrique: *Critères de facturation*

- Tarification basée sur la puissance apparente en kVA

- Dans la plupart des installations, du fait des moteurs, le FP est inférieur à 100 %. Le **client doit payer son énergie plus chère lorsque le FP est trop bas**.

- Une usine avec un **mauvais FP** tire un **courant plus élevé**, ainsi la section des conducteurs devrait également être plus grande de même que la capacité du réseau qui alimente l'usine.

$$S = \frac{P}{FP} \quad \text{avec} \quad I_L = \frac{S}{\sqrt{3}.V_L}$$

Facturation de l'énergie électrique: *Critères de facturation*

❑ Tarification basée sur catégorie du client

❑ **Tarifs d'hydro-Québec** Tarifs d'électricité en vigueur le 1er avril 2023. (hydroquebec.com)

- ❑ La **puissance domestique** : correspond aux besoins des maisons et logements privés. Il s'agit du **tarif D pour Hydro-Québec**.
- ❑ La **petite puissance** : lorsque la puissance à facturer minimale est **inférieure à $65\ kW$** pour **Hydro-Québec** et il s'agit du **tarif G**.
- ❑ La **moyenne puissance** : Il s'agit du **tarif M** avec Hydro-Québec et cette catégorie correspond au cas où la puissance maximale appelée a été d'au moins $50\ kW$ durant les 12 périodes mensuelles précédentes.
- ❑ La **grande puissance** : Il s'agit du **tarif L** avec Hydro-Québec, c'est lorsque la puissance souscrite (ou encore puissance à ***facturer minimale***) est de $5000\ kW$ ou plus.

Facturation de l'énergie électrique: *Tarif D (domestique)*

- **Rappel du domaine d'application**: S'applique à un abonnement pour usage domestique lorsque la puissance maximale appelée a été inférieure à **65 kilowattheures** pendant les douze mois précédents la période de consommation visée.
- **Structure du tarif D**

✓ **Redevance** (frais d'accès au réseau par jour compris dans la période de consommation): $\boxed{43,505¢}$

✓ **Coût des 40 premiers kilowattheures par jour** de la période de consommation: $\boxed{6,509¢}$

✓ **Coût du kilowattheure** pour le **reste de l'énergie** consommée : $\boxed{10,041\ ¢}$

Exemple d'application: Un abonné d'une maison privée consomme **1250 kW.h** pendant le mois de **juin**. Calcul du montant total de la facture.

Solution: $W = 1250\ kW.h$ pendant **30 jours**.

- **Redevance** :

$$43,505 \times 30 = 1305,15 = 13,0515\ \$$$

- **Les 40 premiers $kW.h$ par jour valent :**

$$40 \times 30 = 1200\ kW.h \quad \Rightarrow 1200 \times 6,509\ ¢ = 7810,8\ ¢ = 78,108\ \$$$

- **Le reste de l'énergie consommée vaut :**

$$(1250 - 1200) \times 10,041\ ¢ = 502,05\ ¢ = 5,0205\ \$$$

Total:

$$13,0515 + 78,108 + 5,0205 = \boxed{96,18\ \$}$$

Facturation de l'énergie électrique: *Passage au Tarif DP*

- **Domaine d'application**: puissance maximale appelée minimalement de 50 kW pendant les douze mois précédents.
- **Structure du tarif DP**

✓ **Coût du kilowattheure pour les premiers 1200 kilowattheures**: $\boxed{6,294\ ¢}$

✓ **Coût du kilowattheure pour le reste de l'énergie** : $\boxed{9,570\ ¢}$

✓ **Coût du kilowatt** au-delà de 50 kilowatts si période d'**été** : $\boxed{4{,}914\ ¢}$

✓ **Coût du kilowatt** au-delà de 50 kilowatts si période d'**hiver** : $\boxed{6{,}649\ ¢}$

Structure du tarif DP

Prix de l'énergie pour les 1 200 premiers kilowattheures (kWh) par mois (1re tranche) :	6,294 ¢/kWh
Prix de l'énergie pour le reste de l'énergie consommée (2e tranche) :	9,570 ¢/kWh
Prix de la puissance au-delà de 50 kilowatts (kW), en période d'hiver :	6,649 $/kW
Prix de la puissance au-delà de 50 kilowatts (kW), en période d'été :	4,914 $/kW

En l'absence de consommation d'électricité ou avec une consommation très faible, un montant minimal est facturé. Il est de 13,039 $ par mois (30 jours) si l'électricité livrée est monophasée ou de 19,559 $ par mois si elle est triphasée.

Tarifs en vigueur le 1er avril 2023. Ce tableau ne peut en aucun cas remplacer le document intitulé *Tarifs d'électricité*.

Source: https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/tarif-dp-tarification.html

Facturation de l'énergie électrique: *Tarif G (petite puissance)*

- **Domaine d'application**: Abonnement de petite puissance lorsque la puissance minimale à facturer est inférieure à 65 kilowatts.
- **Structure du tarif G**

✓ **13,648 $** de redevance (frais d'accès au réseau)

plus

✓ **19,526 $** le kilowatt de puissance à facturer excédent **50 kW**

plus

✓ **10,959 ¢** le kilowattheure pour les **15090** premiers $kW.h$.

plus

✓ **8,435 ¢** le kilowattheure pour le reste de l'énergie consommée.

- **La puissance à facturer est la plus élevée des puissances suivantes**:

- L'appel maximal de puissance active P_{am}
- l'appel de puissance apparente multipliée par le facteur de puissance exigé ($90\ \%$) : $0,9 \times S_{am}$

$$P_{\text{facturé}} = \max(P_{am} \quad 0,9 \times S_{am})$$

Exemple d'application: En utilisant le tarif petite puissance, calculez le coût d'électricité pour le mois de janvier consommée par une usine sachant que la puissance à facturer est de **92 kW** et l'énergie consommée est de **55 600 kW.h**.

Redevance	$\boxed{13,648\ \$}$
Kilowatts de puissance à facturer excédent 50 kW	$(92-50) \times 19,526$ $= \boxed{820,092\ \$}$
Les 15090 premiers $kW.h$.	$15090 \times 10,959\ ¢$ $= \boxed{1653,7131\ \$}$
Le reste d'énergie	$(55\ 600 - 15090) \times 8,435\ ¢$ $= \boxed{3417,0185\ \$}$
Total	**5904,4716 $**

Facturation de l'énergie électrique: *Tarif M (moyenne puissance)*

- **Domaine d'application**: Lorsque la puissance maximale appelée a été d'au moins **50 kW** durant les 12 périodes mensuelles précédentes.
- **Structure du tarif M**

✓ **16,139 $** le kilowatt de puissance à facturer

plus

✓ **5,567 ¢** le kilowattheure pour les **210 000** premiers $kW.h$.

plus

✓ **4,128 ¢** le kilowattheure pour le reste de l'énergie consommée.

- **La puissance à facturer est la plus élevée des puissance suivantes**:

- L'appel maximal de puissance active $\boldsymbol{P_{am}}$
- l'appel de puissance apparente multipliée par le facteur de puissance exigé (**90 %**) : $\mathbf{0,9} \times \boldsymbol{S_{am}}$

$$\boldsymbol{P_{\text{facturé}}} = \max(\boldsymbol{P_{am}} \quad \mathbf{0,9} \times \boldsymbol{S_{am}})$$

Exemple d'application: Une usine classée dans la catégorie de moyenne puissance fonctionne 7 jours par semaine, 24 h par jour. L'usine consomme 260 000 kW.h. Calculez la facture si la puissance à facturer est de 40 kW.

Puissance à facturer	$\mathbf{16,139} \times 40 = \boxed{\mathbf{645,56}\ \$}$
210 000 premiers $kW.h$	$210000 \times 5{,}567\ ¢$ $= \boxed{\mathbf{11690,7}\ \$}$
Reste de $kW.h$.	$(260000 - 210000)$ $\times 4,128\ ¢ = \boxed{\mathbf{2064}\ \$}$
Total	**14400,26 $**

Facturation de l'énergie électrique: *Tarif L (grande puissance)*

- **Domaine d'application**: Lorsque la puissance à **facturer minimale** (puissance souscrite) est supérieure ou égale à **5000 kW** et qui est principalement lié à une activité essentiellement industrielle.
- **Structure du tarif L**

✓ **13,779 $** le kilowatt de puissance à facturer

plus

✓ **3,503 ¢** le kilowattheure.

- **La puissance à facturer est la plus élevée des puissances suivantes**:

- L'appel maximal de puissance active P_{am}
- La puissance souscrite: P_s
- l'appel de puissance apparente multipliée par le facteur de puissance exigé ($95\ \%$) : $0,95 \times S_{am}$

$$P_{\text{facturé}} = \max(P_{am} \quad P_s \quad 0,95 \times S_{am})$$

Si la puissance souscrite n'est pas connue:

$$P_{\text{facturé}} = \max(P_{am} \quad 0,95 \times S_{am})$$

Facturation de l'énergie électrique: *Tarif L (grande puissance)*

Exemple d'application: Une usine consomme pendant un mois un total de **11 628 000 kW.h**. Un premier compteur à demande enregistre un appel maximal de puissance active de **16000 kW**. Un deuxième compteur à demande indique un appel maximal de puissance apparente de **20000 kVA**. La puissance souscrite est de **18000 kW**. Calculez le montant de la facture.

Étape 1 : Détermination de la puissance à facturer

Premièrement on remarquera que la puissance souscrite est supérieure à $5000\ kW$, alors il s'agit d'une clientèle de **grande puissance** et **FP exigé est de 95 %** ce qui donne :

$$\begin{cases} P_S = 18\,000\ kW \\ P_{am} = 16000\ kW \\ S_{am} \times FP = 20\,000 \times 95\ \% = 19\,000\ kW \end{cases} \Rightarrow \boldsymbol{P_{\text{facturé}} = 19\,000\ kW}$$

Étape 2: **Calcul du montant de la facture**:

Données : $P = 19\,000\ kW\ ; W = 11\,628\,000\ kW.h.$

En appliquant le tarif grande puissance, on obtient le tableau ci-contre.

Puissance à facturer	$13{,}779 \times 19\,000 = \boxed{261\,801\$}$
Energie	$11\,628\,000 \times 3{,}503\ ¢ = \boxed{407328{,}84\ \$}$
Total	669129,84 $

À venir **Cours 10: Installation électriques industrielles**