

## 4. Vecteurs énergétiques

### 4.1 – L'électricité

#### *Partie 1 - Réseau électrique*

Daniel R. Rousse, Ph.D., Ing.

*Département de génie mécanique*

Tanguy Lunel, M.Sc.A.

Théo Delpech, M.Sc.A.

Bastien Thomasset, M.Sc.A.

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- Structure
- Équilibre du réseau
- Stabilité du réseau
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- Structure
- Équilibre du réseau
- Stabilité du réseau
- Conclusion

# Introduction et objectifs

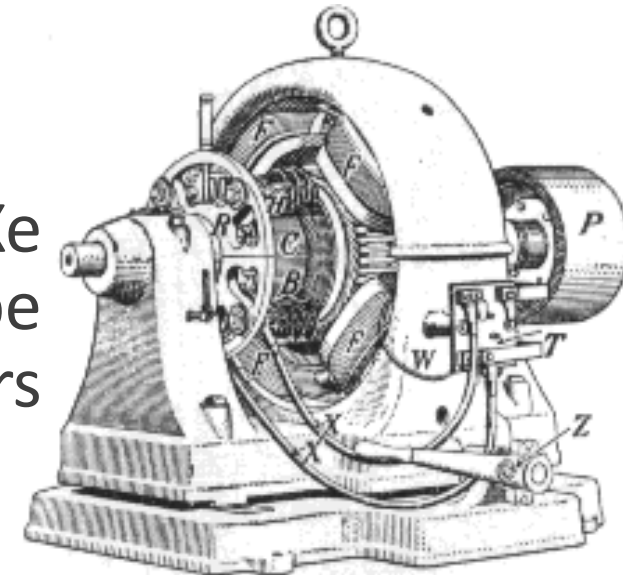
- Cette capsule a pour but de présenter ce qu'est un réseau électrique, sa structure et ses contraintes.
- Il existe quatre types de réseau électrique : ceux de production, de transport, de répartition et de distribution.
- On ne s'intéressera ici qu'aux réseaux alternatifs triphasés, qui représentent l'immense majorité des réseaux de nos jours.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Un peu d'histoire***
- Propriétés générales
- Structure
- Équilibre du réseau
- Stabilité du réseau
- Conclusion

# Un peu d'histoire

- L'électricité est découverte et comprise progressivement au cours des XVIIe et XVIIIe siècles.
- Cependant, ce n'est que dans la seconde partie du XIXe siècle, et après l'invention de la dynamo par Zénobe Gramme, qu'on envisage d'utiliser l'électricité en dehors des laboratoires.
- La première ligne de transmission électrique est construite entre Miesbach et Munich en 1882. Elle parcourait 57km avec une tension de 2 kV et un rendement de 50%.



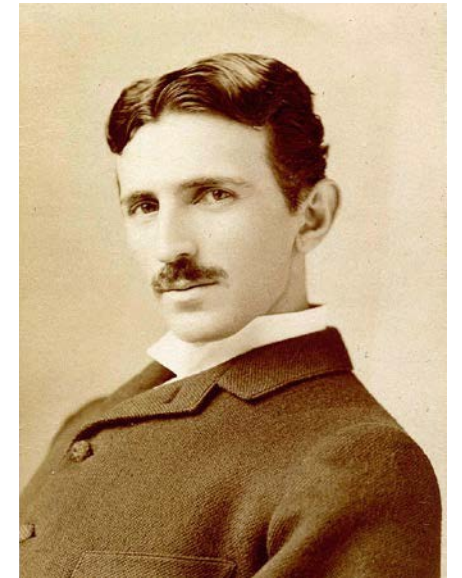
Multipolar Direct-Current Generator.

# Un peu d'histoire

- Les premiers micro-réseaux apparaissent en même temps aux États-Unis et en Europe, et sont uniquement des réseaux de courant continu.
- Ces micro-réseaux induisaient beaucoup de pertes en ligne et étaient limités dans l'espace autour de la centrale de production. Thomas Edison participa beaucoup à leur développement.
- Pendant ce temps, Lucien Gaulard, en Europe, se focalisa sur le courant alternatif, et mit au point le premier transformateur de haute puissance alternatif triphasé.

# Un peu d'histoire

- Aux E-U, Nikola Tesla reprit le travail de Gaulard sur le courant alternatif triphasé, et le popularisa notamment grâce à l'invention du moteur triphasé.
- Le courant alternatif triphasé prit le dessus sur le continu à la toute fin du XIXe siècle, et reste encore aujourd'hui très majoritaire.
- Les semi-conducteurs et l'électronique de puissance permettent aujourd'hui de redécouvrir les avantages du courant continu.



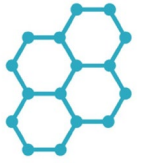
Nikola Tesla  
(1856-1943)



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- ***Propriétés générales***
- Structure
- Équilibre du réseau
- Stabilité du réseau
- Conclusion

# Question



ENR2020

- Quel type de courant électrique est très majoritairement utilisé sur les réseaux électriques de transport ?
  - A. Alternatif triphasé à haute tension
  - B. Alternatif monophasé à haute tension
  - C. Alternatif triphasé à basse tension
  - D. Continu à haute tension
  - E. Aucune de ces réponses

# Propriétés générales

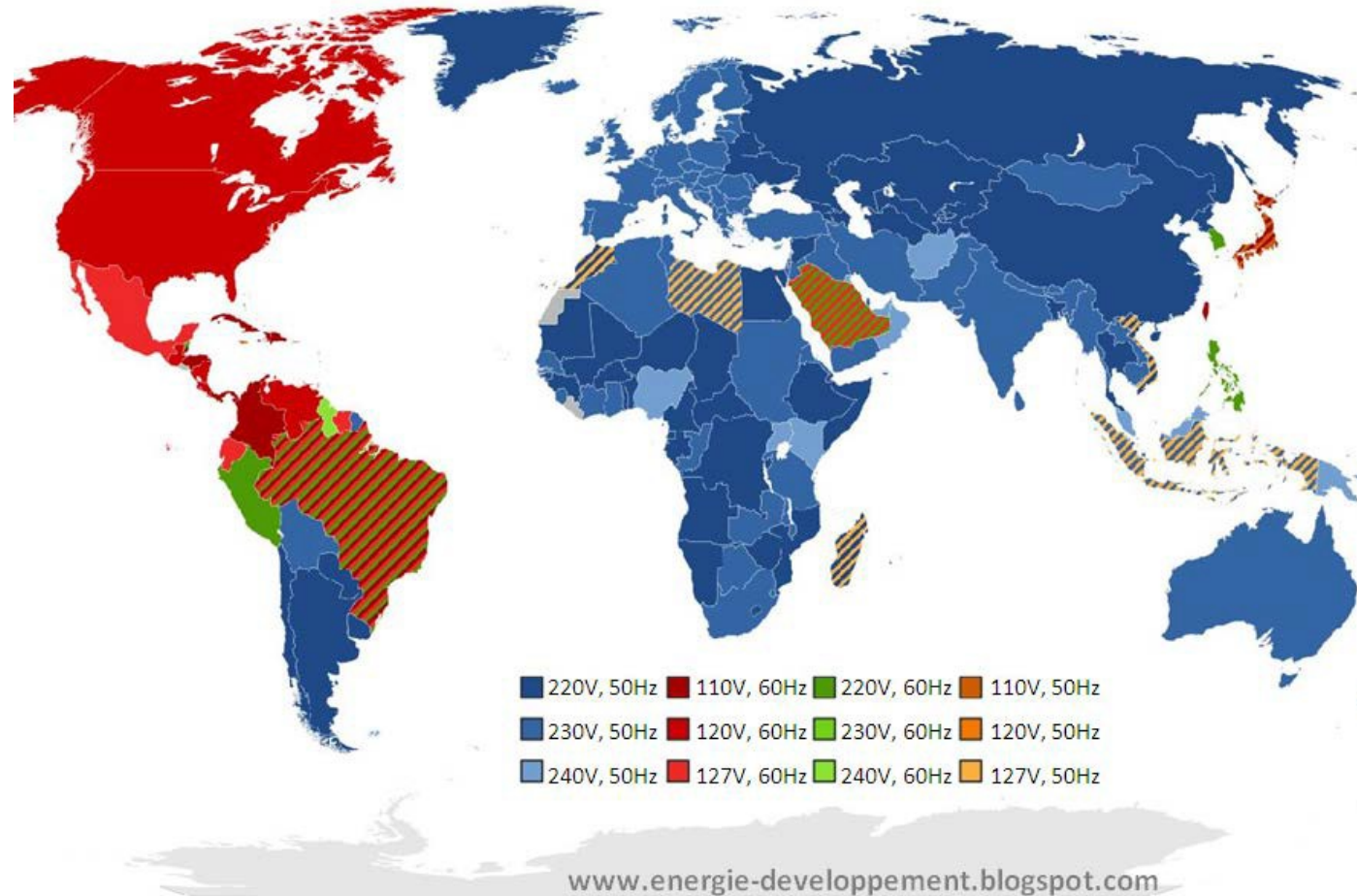
- Quelles sont les caractéristiques du signal électrique dans une prise de courant au Québec?
- Comment fait Hydro-Québec pour qu'on ait constamment de l'électricité à la maison ?
- Pourquoi le courant alternatif triphasé a-t-il supplanté le courant continu?

# Propriétés générales

- On se concentre ici uniquement sur les réseaux de courant alternatif, ce qui est la norme aujourd'hui.
  - Triphasé
    - Puissance instantanée cumulée constante (avantage pour moteurs et alternateurs de grandes puissances pour obtenir un couple mécanique constant)
  - Très haute tension pour limiter les pertes
  - Le signal électrique circule à environ  $2/3$  de la vitesse de la lumière
    - On approxime cela en considérant que la transmission est instantanée.

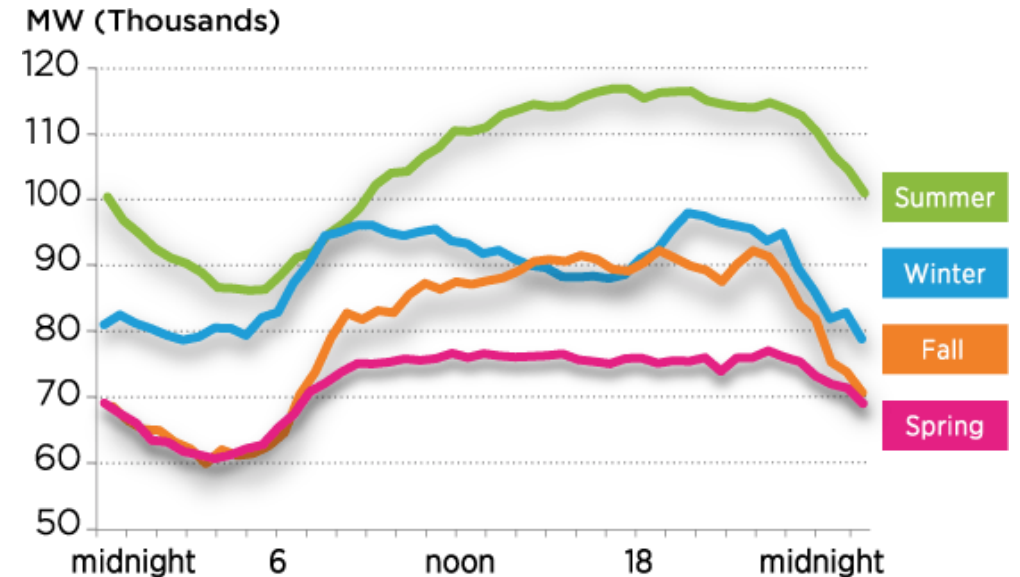
# Propriétés générales

- Le courant alternatif triphasé possède une fréquence fixe de 50Hz ou de 60Hz :



# Propriétés générales

- Contraintes :
  - À tout moment, on doit produire autant que l'on consomme. On ne peut pas stocker l'électricité sous sa forme propre.
  - La consommation varie dans le temps et dans l'espace.
  - Les lignes sont limitées en puissance. On ne peut pas y faire passer autant de courant qu'on le veut.



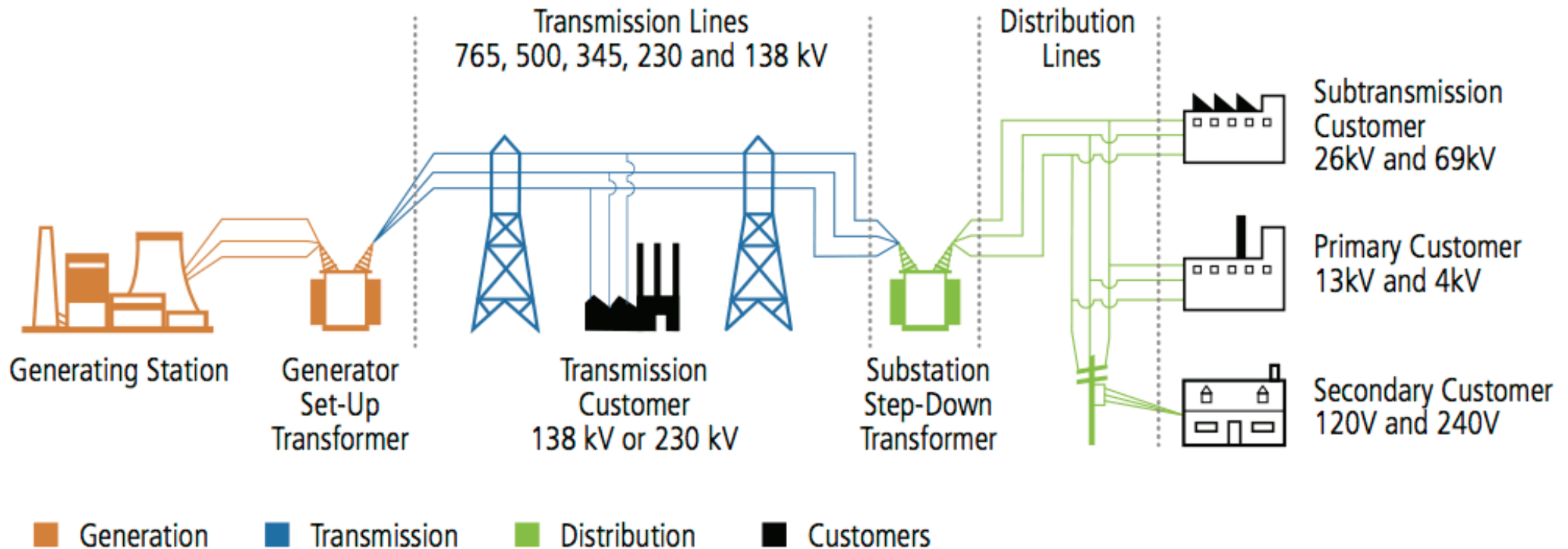
Courbe de charge avec variation journalière et saisonnière de la demande (ne correspond pas au cas du Québec où le maximum est en hiver)

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- ***Structure***
- Équilibre du réseau
- Stabilité du réseau
- Conclusion

# Structure du réseau

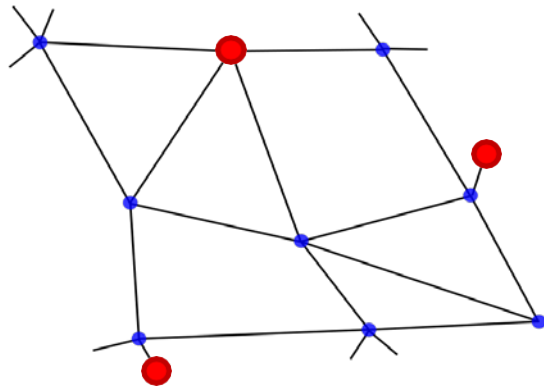
- Un réseau est sous-divisé en 4 : la production, la transmission (ou transport), la distribution et la consommation.





# Structure du réseau

- Réseau de transport (50 à 400 kV) :
  - Ces réseaux permettent de transporter l'énergie des centres de production jusqu'au lieux de consommation.
  - La partie transmission utilise pour cela majoritairement des réseaux maillés à haute tension.



Structure maillée

- Les centrales de production d'électricité (points rouges) sont reliées entre elles par des lignes électriques.
- Les postes électriques (points bleus) permettent la répartition du courant à travers le réseau mais aussi la transformation vers des tensions plus basses pour des sous-divisions du réseau ou pour alimenter les réseaux de distribution.
- Ce type de structure apporte une grande sécurité d'alimentation.

# Structure du réseau

- Réseau de transport (50 à 400 kV) :
  - Selon l'emplacement des producteurs et des consommateurs sur le réseau (variable dans le temps), le courant devra passer par différents chemins, en évitant constamment de surcharger chaque ligne. Sinon, cela pourrait amener un trop grand échauffement et causer la rupture de la ligne.
  - Pour cette raison, une partie des postes électriques présents sur le réseau ont pour seul but de répartir équitablement le courant dans les différentes lignes.

# Structure du réseau

- Au Québec, le réseau de transport est assuré par Hydro-Québec
- Une tension élevée à la sortie des centrales de production permet un voyage sur de longues distances et de faibles pertes électriques.
- La tension est ensuite abaissée pour être répartie.
- Les lignes aériennes sont moins chères et ont une durée de vie plus longue que les lignes souterraines, mais pollution visuelle.
- Les lignes souterraines sont utilisées en milieu urbain très dense.

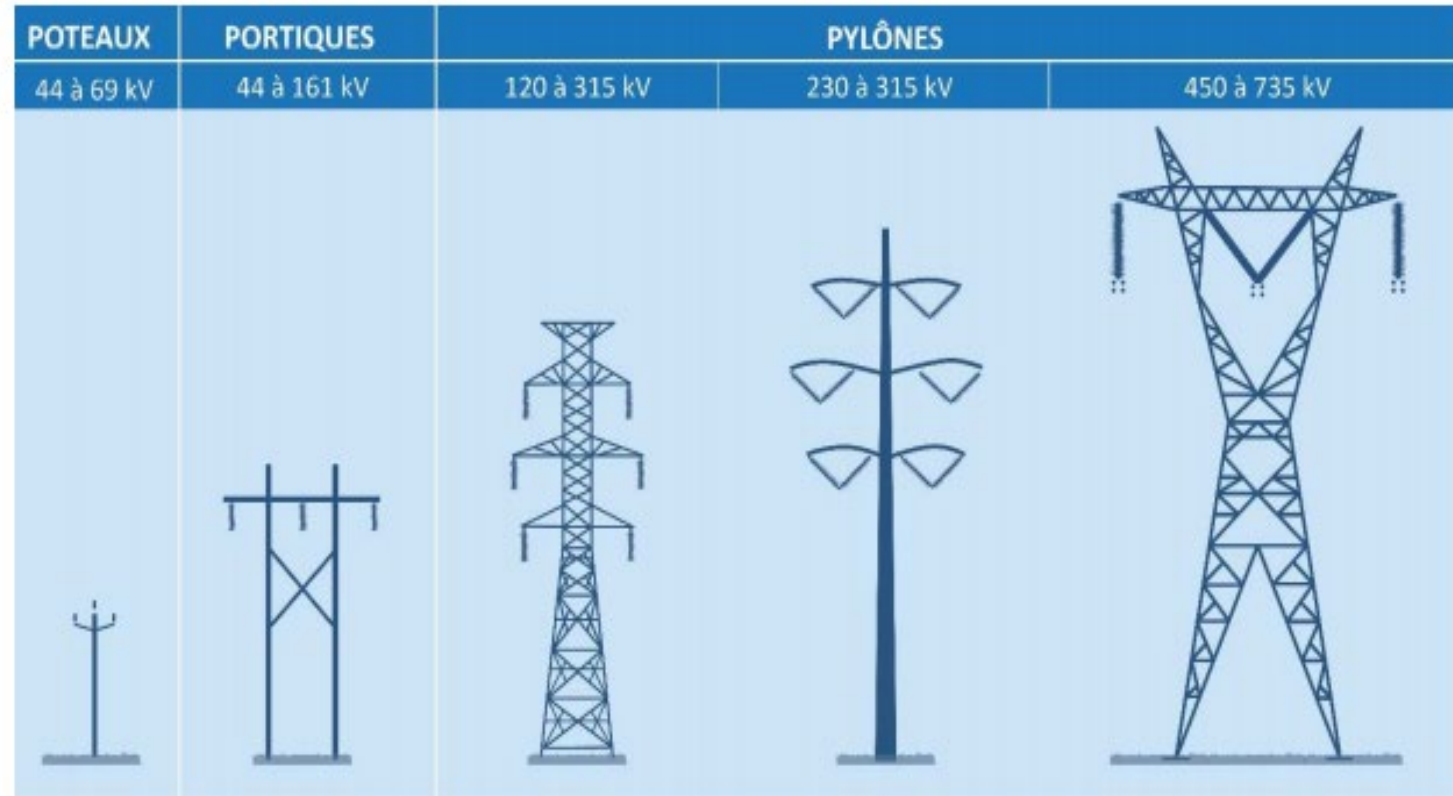


Figure 5 | Poteaux, pylônes et portiques : une variété de supports révélatrice de la tension de la ligne de transport.

Source : Hydro-Québec

# Structure du réseau

- Le réseau de transport du Québec est un cas particulier car les moyens de production sont **très** éloignés des consommateurs.
- En décembre 2013 la production est de 45 500 MW avec 85% situé au Nord tandis que la consommation atteint les 39 240 MW (janvier 2014) dont 85% situé au Sud
- Plusieurs connexions ont donc pour unique but de mailler un minimum le réseau.



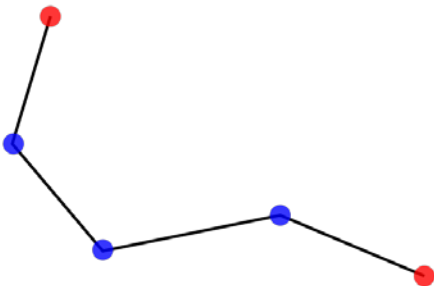
# Structure du réseau

- Le Québec possède une partie de ses lignes de transport en courant continu (CC).
- Le Réseau Multi-terminal à Courant Continu (RMCC, aussi connu sous le nom de Phase I/Phase II) est une ligne à haute tension en CC à 2 faisceaux de 4 conducteurs à  $\pm 450$  kV d'une longueur totale de 1 480 km qui relie les postes de Radisson dans le nord du Québec et de Sandy Pond, à Ayer, au Massachusetts.
- Bientôt, une autre avec le Maine.



# Structure du réseau

- Réseau de répartition (30 à 150 kV) :
  - Les réseaux de répartitions assurent la fourniture d'électricité à l'échelle régionale.
  - Pour ce faire, la structure de ce type de réseau est maillée et bouclée.

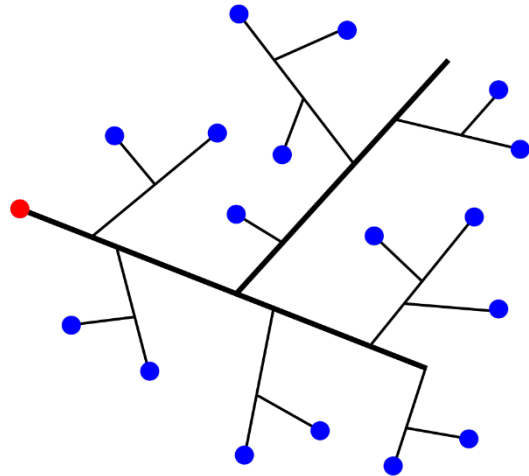


Structure bouclée

- Les apports d'énergies sont représentés par les points rouges.
- Les postes électriques (points bleus) permettent la répartition du courant à travers le réseau.
- Les structures bouclées sont principalement utilisées dans les régions faiblement consommatrices.
- La sécurité d'alimentation est inférieure à celle des structures maillées mais reste élevée.

# Structure du réseau

- Réseau de distribution (50 V à 50 kV) :
  - L'objectif est d'alimenter tous les consommateurs.
  - La structure utilisée dépend du pays et de la densité de population concernée même si les structures arborescentes sont majoritairement utilisées pour ce type de réseau.



Structure arborescente

- Le poste source (point rouge) est alimenté par un réseau de répartition.
- Des branches de dérivation sont reliées à une artère. Au bout de ces branches se trouvent les postes HTA/BT de distribution publique.
- Ces postes alimentent les réseaux basse tension (BT) eux-mêmes raccordés aux petits consommateurs (points bleus).
- Un défaut sur une des lignes hautes tensions (HTA) implique donc une coupure de tous les consommateurs raccordés à cette ligne.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- Structure
- ***Équilibre du réseau***
- Stabilité du réseau
- Conclusion



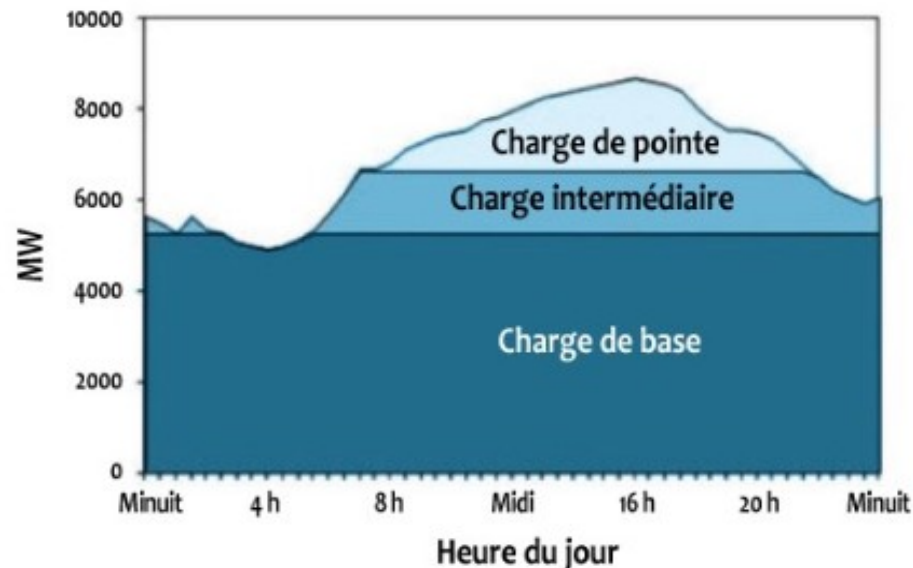
# Équilibre du réseau

- À tout instant, la consommation électrique doit être égale à la production. C'est ce que l'on appelle l'équilibre du réseau.
- Le parc de production doit être dimensionné afin d'assurer cet équilibre.
- Lorsque ce dernier n'est pas respecté, il est nécessaire d'avoir recours à des moyens post-marchés comme l'appel aux gestes citoyens, l'interruption de la consommation de sites industriels...

# Équilibre du réseau

- Types de charges de consommation :
  - Généralement séparé en trois parties. Différents moyens de production seront choisis pour chaque charge selon le réseau et selon les critères évoqués précédemment.

Figure 10. Charge de base, charge intermédiaire et charge de pointe



Source : [Intégration des sources d'énergie renouvelable à puissance de sortie variable – L'importance des services essentiels de fiabilité, 2017](#), Conférence des ministres de l'Énergie et des Mines Nouveau-Brunswick

# Équilibre du réseau

- Types de charges de consommation :
  - Utilisation typique (Ontario par exemple) :

Charge desservie	Description	Caractéristiques	Types de production classique
Charge de base	Ces types de générateurs fournissent de grandes quantités de puissance fiable à faible coût variable, mais, en général, n'augmentent pas et ne diminuent pas leur puissance de sortie de manière efficace. De plus, ils mettent souvent beaucoup de temps à démarrer.	Coûts de fonctionnement faibles, mais coûts d'investissement initial plus élevés. Peut fonctionner pendant des périodes plus longues.	Hydroélectrique au fil de l'eau, nucléaire et au charbon.
Intermédiaire	Ces types de générateurs qui peuvent augmenter ou diminuer leur puissance de sortie sont conçus pour démarrer et s'arrêter de manière répétée, mais ils sont plus efficaces lorsqu'ils fonctionnent pendant un certain nombre d'heures.	Coûts de fonctionnement modérés, peuvent fonctionner pendant des périodes plus longues ou plus courtes, peuvent répondre rapidement ou pas.	Cycle combiné au gaz naturel, *au charbon, au fioul, hydroélectrique de stockage avec des niveaux généraux de sortie plus élevés, éoliennes, solaire.

*Source : [Intégration des sources d'énergie renouvelable à puissance de sortie variable – L'importance des services essentiels de fiabilité, 2017](#), Conférence des ministres de l'Énergie et des Mines Nouveau-Brunswick*

*N.B.* Le Québec a le luxe de pouvoir utiliser de l'hydroélectricité de stockage même pour sa charge de base.

*N.B.* La France a la particularité d'utiliser leurs centrales nucléaires pour la charge de base et pour celle intermédiaire.

# Équilibre du réseau

- Types de charges de consommation :
  - Utilisation typique (Ontario par exemple) :

Charge desservie	Description	Caractéristiques	Types de production classique
<b>Pointe</b>	Ces types de générateurs peuvent démarrer rapidement et augmenter ou diminuer rapidement leur puissance de sortie.	Coûts de fonctionnement élevés, démarrage rapide, synchronisation rapide avec le réseau, devrait être plus rapide pour recevoir les charges du réseau, répond aux variations de charge.	Turbine à gaz à cycle simple au gaz naturel, fioul, vapeur, hydroélectrique de stockage.

*Source : [Intégration des sources d'énergie renouvelable à puissance de sortie variable – L'importance des services essentiels de fiabilité, 2017](#), Conférence des ministres de l'Énergie et des Mines Nouveau-Brunswick*

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- Structure
- Équilibre du réseau
- ***Stabilité du réseau***
- Conclusion

# Question

- Quelles sont les deux grandeurs dont la maîtrise est essentielle dans le but de garantir la stabilité du réseau ?
  - A. La tension et l'intensité
  - B. L'intensité et la fréquence
  - C. La tension et la fréquence
  - D. La forme de l'onde et l'intensité



ENR2020

# Stabilité du réseau

- Dans un réseau, toutes les parties sont dimensionnées pour fonctionner à certaines valeurs consignes de **fréquence**, de **tension**, **d'intensité**, de **forme** d'onde sinusoïdale.
- Si le signal ne respecte pas ces consignes, cela peut conduire à des **usures précoces** ou même à l'apparition de **défauts irréversibles** de certains composants (alternateurs, moteurs, isolants, câbles, transformateurs, etc.).

# Stabilité du réseau

- Les deux composantes les plus importantes à vérifier sont généralement la **fréquence** et la **tension**.
- La **fréquence** varie en fonction de l'équilibre entre production et consommation de puissance active, c'est-à-dire la puissance réelle produite et consommée en Watt. Au Québec la consigne est à  $60 \pm 0,6$  Hz.
- La **tension** varie principalement en fonction de la puissance réactive consommée sur le réseau (en VA). La plage de variation dépend de la tension absolue. Par exemple, pour du 120V, la plage de variation en conditions normales est 110 – 125 V.



# Stabilité du réseau

- Fréquence : indicateur de l'équilibre sur la puissance active
  - Si  $P_{\text{consommation}} > P_{\text{production}}$  : la fréquence **baisse**, car les alternateurs voient une résistance élevée de la part du réseau et sont ralentis dans leur rotation.
    - On va alors augmenter le débit dans la turbine hydroélectrique pour compenser et ramener la fréquence à sa valeur consigne.
  - Si  $P_{\text{consommation}} < P_{\text{production}}$  : la fréquence **augmente**, car les alternateurs n'ont plus assez de résistance de la part du réseau et sont moins ralentis dans leur rotation.
    - On va alors diminuer le débit dans la turbine hydroélectrique pour compenser et ramener la fréquence à sa valeur consigne.
  - Le délai de réponse pour rétablir la valeur consigne est important pour diminuer les risques de courant hors consigne et donc de détériorations des éléments du réseau.

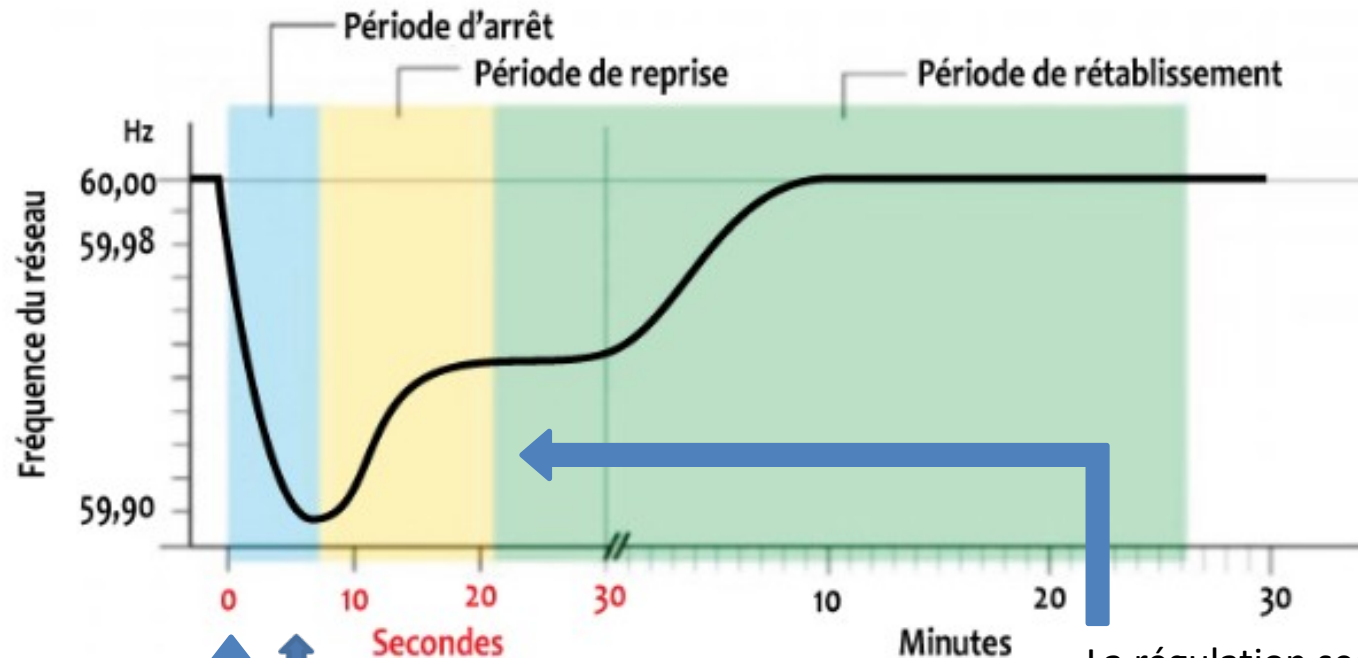
# Stabilité du réseau

- Fréquence : plusieurs régulations possibles
  - La régulation (ou réponse) **inertielle** : Celle-ci est passive et correspond à l'inertie physique des grands rotors des alternateurs. Elle est instantanée dès l'apparition d'une variation, mais ne dure pas longtemps.
  - La régulation **primaire** : Celle-ci se fait par l'asservissement de certains moyens de production. Elle réagit en 5 à 30 secondes et a pour but de prendre le relais de la réponse inertielle aussi vite que possible pour éviter l'écroulement du réseau.
  - La régulation **secondaire** : Celle-ci est commandée manuellement. En 30 secondes à 5 min et cherche à rétablir la valeur nominale et à relibérer les réserves de régulation primaire.

# Stabilité du réseau

- Exemple : défaut d'une turbine hydroélectrique ou démarrage d'une grosse industrie :

Figure 2. Chute de fréquence à la suite d'une perturbation



Source : [Intégration des sources d'énergie renouvelable à puissance de sortie variable – L'importance des services essentiels de fiabilité, 2017](#), Conférence des ministres de l'Énergie et des Mines Nouveau-Brunswick

L'inertie des autres rotors empêche la fréquence de chuter trop vite.

La régulation primaire vient augmenter la puissance des autres alternateurs du réseau.

La régulation secondaire démarre des moyens de production pour revenir à la consigne.

# Question

- Qu'indique une diminution de la tension sur le réseau électrique?
  - A. Un déséquilibre entre la consommation et la production de puissance réactive
  - B. Un déséquilibre entre la consommation et la production de puissance active
  - C. Une surcharge d'une ligne haute tension
  - D. Le défaut d'un transformateur entre le réseau de transport et de distribution
  - E. Aucune de ces réponses



ENR2020

# Stabilité du réseau

- Fréquence : plusieurs régulations possibles
  - En plus des 3 régulations citées plus haut :
    - Il existe souvent une régulation **tertiaire** : elle s'active manuellement sur ordre de l'opérateur. Les moyens de production activables en moins de 15 minutes sont appelés dans le but de rétablir les programmes de productions impactés par l'activation des autres régulations.
    - Possibilité de délester certains consommateurs : On coupe le courant aux grands consommateurs industriels rémunérés pour éviter le black-out généralisé.
  - Les différentes technologies de production vont participer plus ou moins à chaque régulation en fonction de leur capacité de variation de puissance (vitesse, amplitude).

# Stabilité du réseau

- Tension : indicateur de l'équilibre sur la puissance réactive
  - Les grands consommateurs sont par exemple les **moteurs asynchrones** et les **fours à induction**.
  - Les générateurs synchrones peuvent fournir une partie de la puissance réactive nécessaire, mais ont généralement besoin d'être soutenus par l'ajout d'inductances et de condensateurs.
    - C'est notamment la raison pour laquelle Hydro-Québec facture la puissance apparente (et non réelle) lorsqu'un consommateur consomme trop de puissance réactive.
  - Là encore, tous les moyens de production ne se valent pas.

# Stabilité du réseau

- Il faut donc aussi évaluer un moyen de production électrique en fonction du service qu'il rend au réseau en termes de stabilité.

On peut citer :

- La pilotabilité du moyen de production
  - La participation à la réponse inertielle
  - Le temps de montée en puissance
  - La participation à la puissance réactive
- 
- L'hydroélectricité est à ce titre un excellent atout en plus d'être décarboné et renouvelable.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Un peu d'histoire
- Propriétés générales
- Structure
- Stabilité du réseau
- ***Conclusion***



# Conclusion

- Un réseau électrique est un système complexe permettant de connecter en **instantané** les moyens de production électrique et les consommateurs.
- Les variations de **fréquence** et de **tension** sur le réseau permettent de connaître l'équilibre ou le déséquilibre entre production et consommation. Il est indispensable de respecter cet équilibre.
- Chaque moyen de production électrique contribue **différemment** à la stabilité du réseau, ce qui rend leur comparaison délicate.

# Ouverture

- Aujourd'hui, la grande majorité des moyens de production des réseaux sont pilotables afin de garantir la stabilité du réseau.
- L'arrivée massive des énergies renouvelables est accompagnée de nouvelles problématiques, car elles ne participent pas forcément à la stabilité des réseaux.
- Cf. thèmes suivants : intégration des EnRI (4.1.2), problématiques liées à cette intégration (4.1.3) et méthodes d'intégration des EnRI (4.1.4).



**Merci de votre attention !**

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit sur le forum et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

## Période de questions

