



Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie Electrique

Tronc commun

Manuel de cours

Module 4

Techniques de production, de transport et de distribution
de l'énergie électrique



Edition 2021



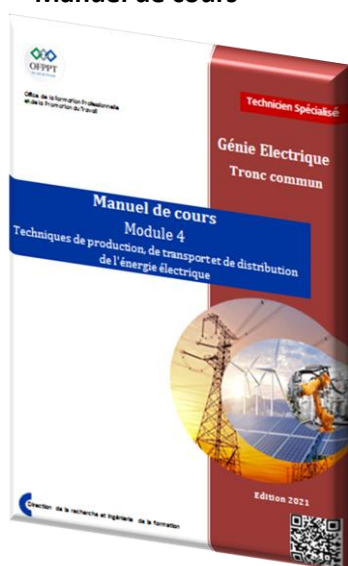
Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation



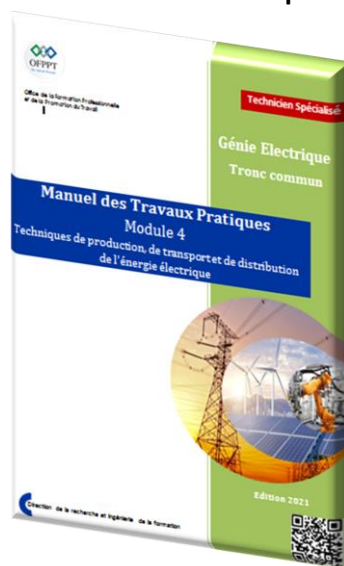
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning OFPPT moyennant le scanne des codes QR suivants :

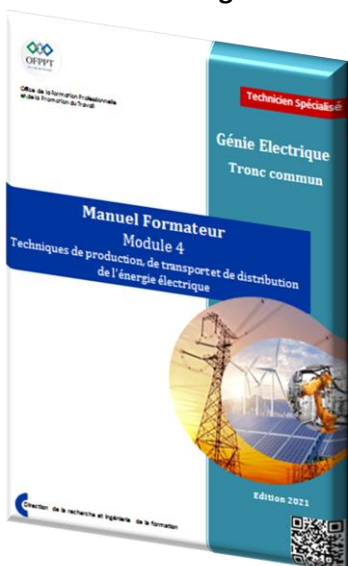
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
SOMMAIRE.....	3
1. COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS.....	6
CHAPITRE I INTRODUCTION	8
1. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE MAROCAIN	9
1.1 Définition du mix énergétique	9
1.2 Le mix énergétique marocain.....	10
2. LES SOURCES D'ÉNERGIE	13
2.1 Les énergies renouvelables	13
2.2 Les énergies non renouvelables	13
CHAPITRE II : LA PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.....	15
1. GÉNÉRALITÉS SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE	16
1.1 Définitions	16
1.1.1 Le réseau électrique.....	16
1.1.2 La gamme de puissance	17
1.1.3 Le taux de disponibilité	17
1.1.4 La durée de fonctionnement.....	18
1.1.5 Le facteur de charge.....	18
1.1.6 De l'énergie primaire à l'énergie utile	19
1.1.6.1Energie primaire	19
1.1.6.2Energie secondaire.....	20
1.1.6.3Energie finale	20
1.1.6.4Energie utile.....	20
2. CENTRALES NUCLÉAIRES	21
3. CENTRALES THERMIQUES À FLAMME	23
4. TURBINE À COMBUSTION (TAC)	26
5. CENTRALES À CYCLE COMBINÉ	28
6. CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES.....	30
6.1 Turbine Kaplan.....	33
6.2 Turbine Francis.....	33
6.3 Turbine Pelton	34

7. FERMES ÉOLIENNES.....	36
7.1 Onshore	36
7.2 Offshore.....	38
8. CENTRALES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES	40
9. CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES	43
CHAPITRE III : LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION D'ELECTRICITE	46
1. LES TRANSFORMATEURS	48
2. LA STRATIFICATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE.....	50
3. LA STRUCTURE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE	51
1.1 Réseau maillé.....	51
3.1 Réseau bouclé.....	51
3.2 Réseau radial	52
3.3 Réseau arborescent	52
4. ARCHITECTURE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION	53
4.1 Distribution en « antenne » ou « simple dérivation »	53
4.2 Distribution en double dérivation	54
4.3 Distribution en « boucle » ou « coupure d'artère ».....	54
CHAPITRE IV : COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE	56
1. GÉNÉRALITÉS	57
2. FACTEUR DE PUISSANCE.....	59
3. AVANTAGES D'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE.....	60
3.1 Diminution de la section des câbles	60
3.2 Diminution des pertes en ligne	60
3.3 Réduction de la chute de tension	60
3.4 Augmentation de la puissance disponible	60
4. MOYENS, PRINCIPES ET MODES DE COMPENSATION	61
4.1 Moyens de compensation	61
4.2 Principe et intérêt de la compensation automatique	61
4.3 Modes de compensation.....	62
4.3.1 Compensation globale	62
4.3.2 Compensation partielle.....	63
4.3.3 Compensation individuelle.....	63
4.4 Autres types de compensation.....	64
4.4.1 La compensation série	64
4.4.2 Les inductances.....	65
4.4.3 Compensateurs synchrones	65

CHAPITRE V : CONVERSION DE L'ENERGIE	66
5. LES REDRESSEURS	67
5.1 Domaines d'application	68
6. LES HACHEURS	69
6.1 Domaines d'application	69
7. LES ONDULEURS.....	71
7.1 Onduleur autonome.....	72
7.2 Onduleurs non autonomes.....	72
7.3 Onduleurs hybrides.....	73
7.4 Domaines d'application	73
8. LES GRADATEURS.....	74
8.1 Domaines d'application	75
8.1.1 Gradateur à angle de phase	75
8.1.2 Gradateur à train d'ondes	75
BIBLIOGRAPHIE	76

1. COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 4 : Techniques de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique

Code : GETC – 04

Durée : 30 heures

ENONCE DE LA COMPETENCE

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit

Analyser les techniques de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique

selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement
- A l'atelier et en laboratoire
- À partir :
 - des statistiques sur le mix énergétique marocain
 - des données statistiques sur l'énergie à partir de sources nationales (ex. observatoire Marocain de l'Energie) et internationales (ex. IEA)
- À l'aide :
 - des fiches techniques et schémas
 - des lois régissant l'énergie électrique
 - des outils de recherche d'information sur internet

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Repérage adéquat de l'information dans les documents
- Cross-check et interprétation justes des informations issues des différentes sources
- Utilisation pertinente des unités utilisées dans le domaine de l'énergie en général et l'énergie électrique spécialement

ÉLÉMENTS DE LA COMPÉTENCE	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Identifier les différents modes de production de l'énergie électrique.	● Classification pertinente des sources d'énergie entre intermittente et prévisible, de stock et de flux, renouvelable et non-renouvelable... ● Énumération exhaustive des modes de production de l'énergie électrique (centrale thermique, nucléaire, hydroélectrique ...) ● Interprétation juste des statistiques sur le mix énergétique marocain pour la production d'électricité ● Distinction correcte entre l'énergie primaire, secondaire, finale, utile et fatale
B. Identifier les différentes architectures de transport et de distribution de l'énergie électrique.	● Identification correcte de la stratification du réseau d'énergie électrique (BT, HTA, HTB...) ● Identification pertinente des composantes et paramètres d'une ligne électrique ● Différenciation précise de la transmission CC et la transmission AC ● Différenciation pertinente des réseaux triphasés et monophasés ● Identification correcte des types de distribution de l'énergie électrique ● Application rigoureuse des notions sur la compensation de l'énergie réactive ● Caractérisation adéquate des pertes dans le transport et la distribution d'électricité
C. Identifier les étapes de conversion de l'énergie électrique.	● Différentiation juste entre CC et DC ● Identification correcte des différentes conversions (DC/DC, DC/AC, AC/DC, AC/AC) ● Caractérisation précise des pertes énergétiques au niveau de la conversion de l'énergie électrique

Chapitre I INTRODUCTION

L'électricité est indispensable à la vie quotidienne, et près du tiers de l'énergie consommée dans le monde, l'est sous forme électrique. C'est aussi la clé du développement économique et social, et représente la forme d'énergie la plus facile à utiliser, car elle peut être :

- Convertible dans toutes formes d'énergie, aisément et avec un excellent rendement.
- Obtenue de n'importe quelle autre forme d'énergie quoique que le rendement de production ne soit pas toujours excellent.
- Transformée et transportée à n'importe quelle distance par les lignes de transport.
- Energie propre puisqu'elle n'entraîne aucune pollution au niveau de l'utilisateur.

Mais cette énergie exige des techniques et des investissements très importants pour la faire aboutir jusqu' à l'utilisateur. Cela exige l'installation de divers réseaux qui doivent assurer la transmission de cette énergie depuis la centrale jusqu'à l'utilisateur.

1. Contexte énergétique marocain

1.1 Définition du mix énergétique

Le terme de mix énergétique désigne la répartition des différentes sources d'énergies primaires utilisées pour les besoins énergétiques dans une zone géographique donnée. Il inclut les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), le nucléaire et les diverses énergies renouvelables (bois-énergie et autres bioénergies, hydraulique, éolien, solaire, géothermie). Ces énergies primaires sont utilisées pour produire de l'électricité, des carburants pour les transports, de la chaleur ou du froid pour l'habitat ou l'industrie.

La composition du mix énergétique est très variable d'un pays ou d'une région à l'autre et peut évoluer fortement d'une période à l'autre.

Elle dépend en effet :

- de la disponibilité des ressources exploitables sur le territoire ou de la possibilité d'en importer ;
- de l'ampleur et de la nature des besoins énergétiques à couvrir ;
- des choix politiques qui découlent du contexte historique, économique et social, démographique, environnemental et géopolitique.

1.2 Le mix énergétique marocain

Le secteur de l'énergie au Maroc est dominé par les énergies fossiles, presque entièrement importées, qui couvrent 91,8% de la consommation d'énergie primaire du pays en 2019 (pétrole 52,7%, charbon 35%, gaz 4,4%) ; les énergies renouvelables contribuent pour 9% (surtout 5,6 % d'éolien, 1,9% de solaire, 1,5% hydraulique). Ces chiffres indiquent une dépendance énergétique très forte des produits pétroliers importés (Figure 1.1).

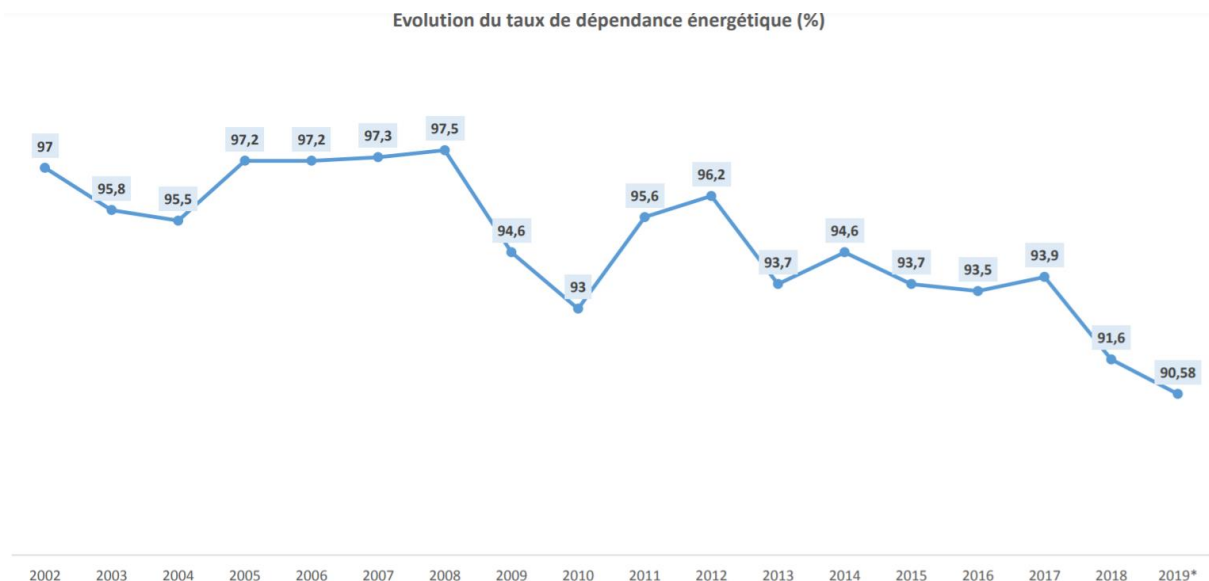


Figure 1.1 : Evolution du taux de dépendance énergétique (%)

Pour produire l'électricité, le Maroc s'est engagé à installer 2000MW de capacité de production éolienne et 2000MW de solaire à l'horizon 2020.

En 2019, la part d'énergie renouvelable dans la puissance installée est de 34.5% d'un total de 10677MW installée, sachant que l'objectif fixé par la stratégie énergétique nationale était d'atteindre 42% en 2020.

L'évolution de la puissance installée entre 2002 et 2019 est montrée sur la figure ci-dessous :

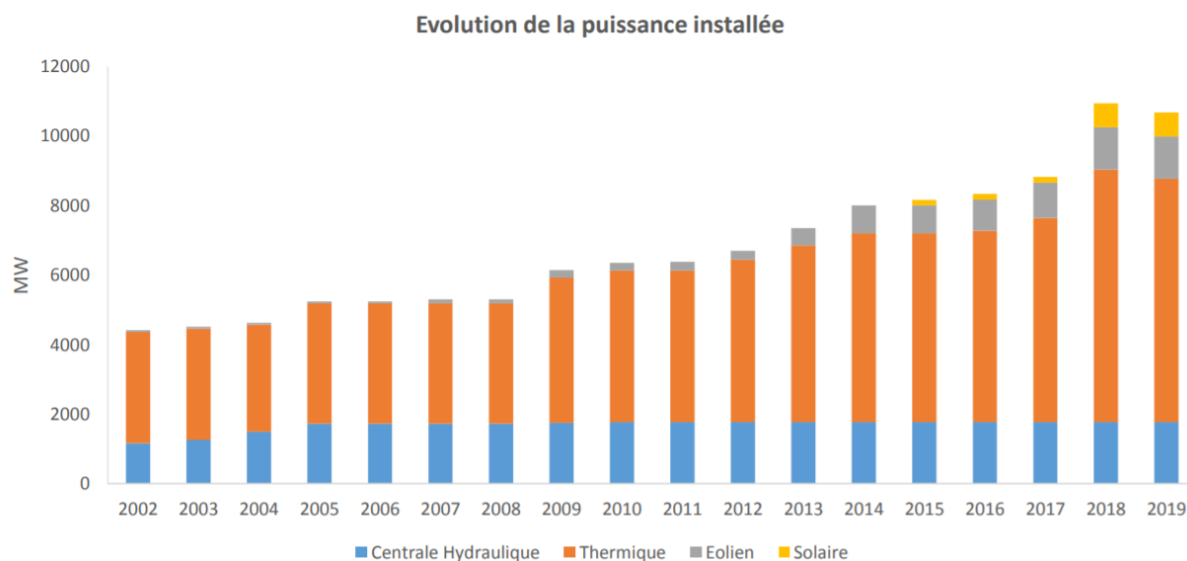


Figure 1.2 : Evolution de la puissance installée pour produire l'électricité au Maroc

Le Maroc est arrivé à un taux d'électrification rurale de 99,7% en 2019.

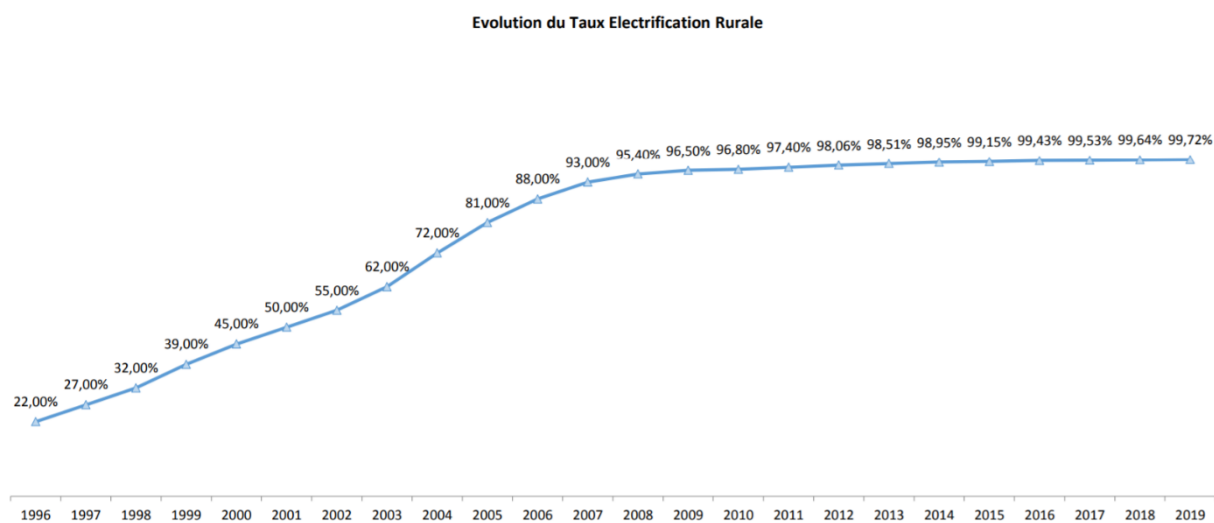


Figure 1.3 : Evolution du taux d'électrification rurale

Vidéos learning

Le mix énergétique

V1



Le mix énergétique
=
répartition des différentes
sources d'énergies primaires



Lien hypertexte



Questions d'autoévaluation :

- Quels sont les 4 principaux moyens de production d'électricité au Maroc
 - Centrale nucléaire
 - Centrale thermique
 - Fermes éoliennes
 - Centrales solaires PV
 - Centrales solaires Thermique
 - Hydraulique
 - Biomasse
- Quelles sont les sources d'énergie primaire utilisées dans les 4 principaux moyens de production d'électricité au Maroc ?
 - L'Uranium
 - Le rayonnement solaire
 - Le vent
 - Le pétrole
 - Le charbon
 - Le gaz naturel
 - L'eau des barrages

2. Les sources d'énergie

2.1 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Quelques exemples :

- l'énergie éolienne
- l'énergie solaire
- l'énergie hydraulique
- la biomasse
- l'énergie géothermique

2.2 Les énergies non renouvelables

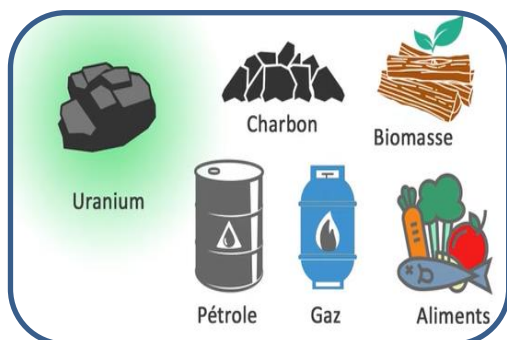
L'énergie non renouvelable est l'énergie qui provient d'une source qui ne peut être remplacée après son utilisation. Cette catégorie regroupe des sources d'énergie comme :

- Le pétrole et ses dérivés
- Le charbon
- Le gaz naturel
- L'uranium

Vidéos learning

Les sources et formes d'énergie

V2



Lien hypertexte



Chapitre II

LA PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE

1. Généralités sur le réseau électrique

1.1 Définitions

1.1.1 Le réseau électrique

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées (figure 3.1 et 3.2).

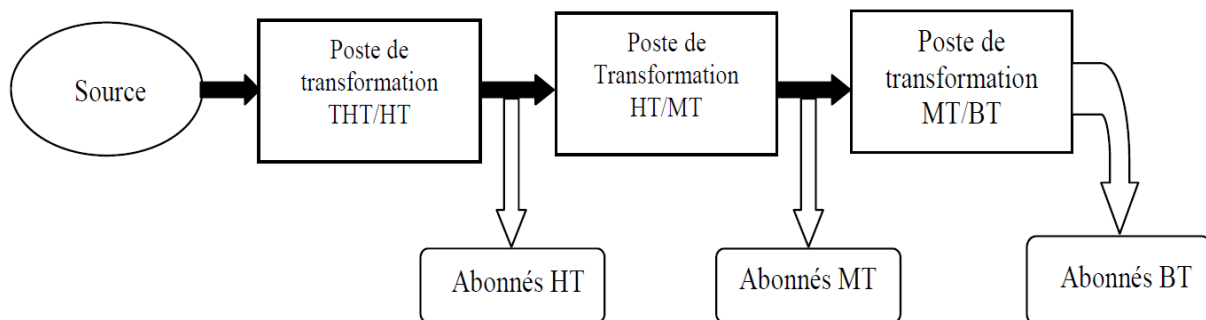


Figure 3.1 : Schéma simplifié d'un réseau électrique

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production – transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes, puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final.

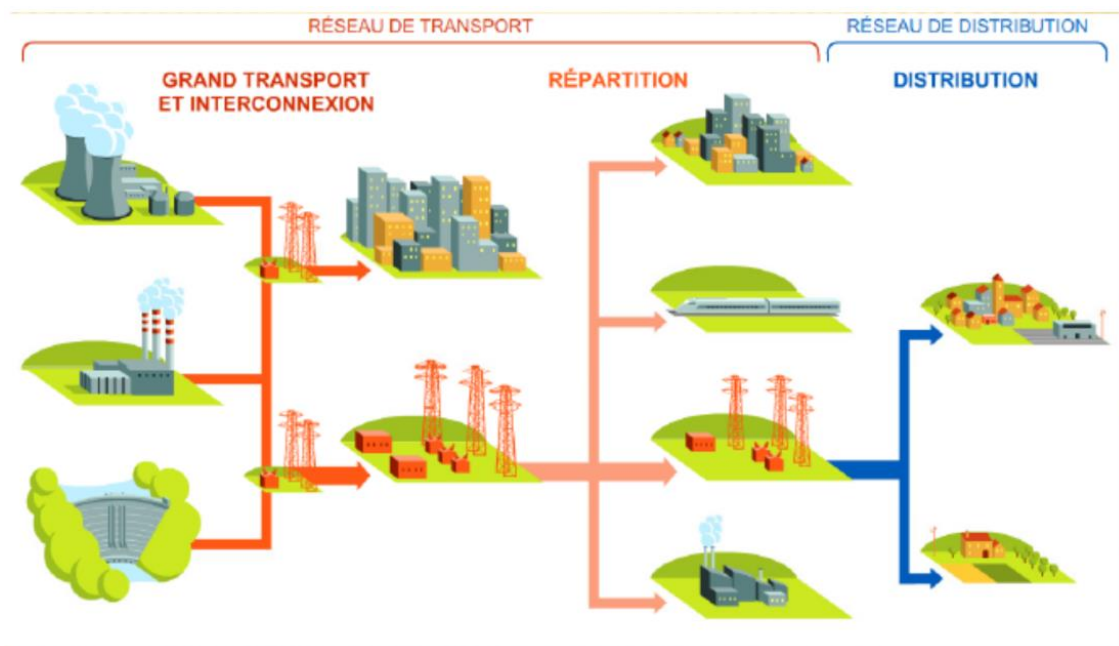
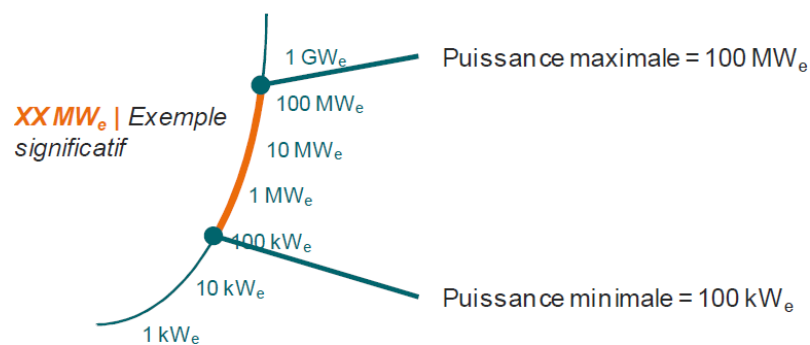


Figure 3.2 : Architecture générale du réseau électrique

1.1.2 La gamme de puissance

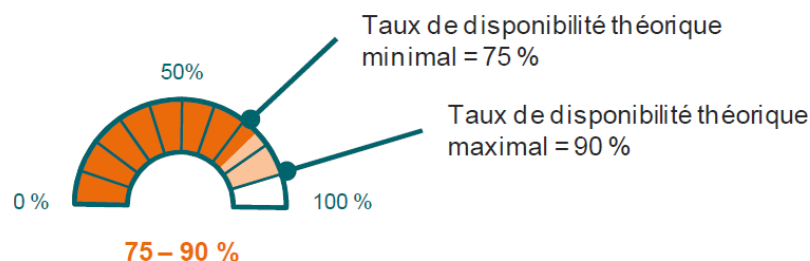
L'indicateur de gamme de puissance représente l'éventail des valeurs de dimensionnement possible du système concerné, sur une échelle en kW_e / MW_e / GW_e (kilo / Méga / Giga Watt électrique) ou kW_{th} / MW_{th} / GW_{th} (kilo / Méga / Giga Watt thermique), selon le vecteur énergétique principal. Ainsi, certains systèmes existent sur des gammes très variées, du petit système de quelques kW au système massif de l'ordre du GW (l'hydroélectricité par exemple). A l'inverse, certains systèmes possèdent une gamme de dimensionnement plus restreinte (centrales nucléaires par exemple).



1.1.3 Le taux de disponibilité

L'indicateur du taux de disponibilité rend compte de la disponibilité technique théorique du système. Il est défini comme le rapport entre le nombre d'heures durant lesquelles le système est effectivement disponible et le nombre d'heures total sur une année (8760 h/an).

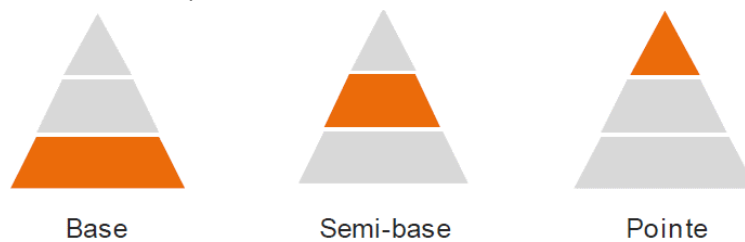
Cet indicateur prend notamment en compte l'indisponibilité due aux opérations de maintenance. Cette valeur est peu représentative pour certains systèmes dont la production est étroitement liée à la disponibilité de la ressource (solaire, éolien, etc.).



1.1.4 La durée de fonctionnement

L'indicateur de la durée de fonctionnement exprime le nombre d'heures par an durant lesquelles le système fonctionne de manière effective. Les systèmes de production d'énergie sont alors classés en 3 catégories :

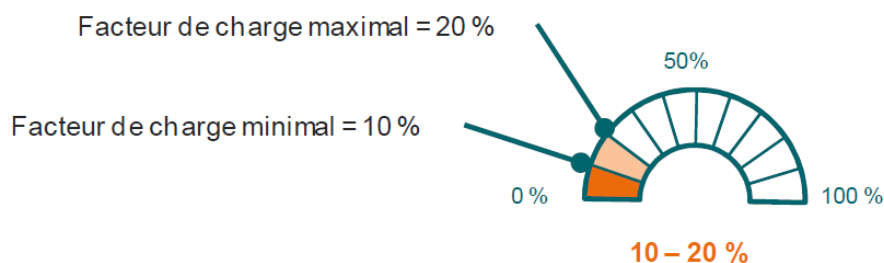
- base entre 6000 et 8760 h/an,
- semi-base entre 2000 et 6000 h/an
- pointe entre 1 et 2000 h/an



La durée de fonctionnement représente bien le temps durant lequel le système produit de l'énergie et non le taux d'utilisation de la puissance disponible (c'est le facteur de charge qui donnera cette indication). Ainsi, certains systèmes peuvent fonctionner une grande partie de l'année, mais à charge partielle (c'est le cas de l'éolien par exemple).

1.1.5 Le facteur de charge

L'indicateur du facteur de charge traduit le taux d'utilisation effectif de la puissance disponible théorique. Il est défini comme le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance et nombre d'heures total sur une année (8760 h/an). Sur une période donnée, et pour une même puissance installée, un système avec faible facteur de charge produira donc moins d'énergie qu'un système avec facteur de charge élevé.



Finalement, certains systèmes considérés comme de la production de base vis-à-vis du réseau électrique, car produisant dès que la ressource est disponible, ne fonctionnent finalement que la moitié du temps (cas du solaire photovoltaïque par exemple).

1.1.6 De l'énergie primaire à l'énergie utile

1.1.6.1 Energie primaire

L'énergie primaire est l'énergie disponible dans l'environnement et directement exploitable sans transformation. Étant donné les pertes d'énergie à chaque étape de transformation, stockage et transport, la quantité d'énergie primaire est toujours supérieure à l'énergie finale disponible.

Les sources d'énergie primaire sont multiples :

- le pétrole brut ;
- le gaz naturel ;
- les combustibles solides (charbon, biomasse) ;
- le rayonnement solaire ;
- l'énergie hydraulique ;
- l'énergie géothermique ;
- l'énergie tirée des combustibles nucléaires.

Ainsi, l'énergie mécanique produite par un moulin à vent est une énergie primaire. En revanche, si cette énergie mécanique est convertie en électricité, comme c'est le cas avec les aérogénérateurs, l'énergie électrique produite est considérée comme une énergie secondaire.

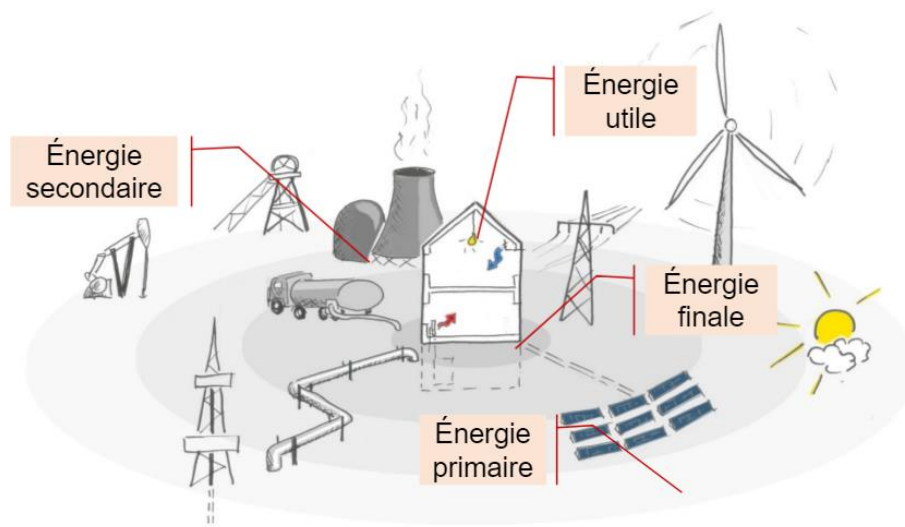


Figure 3.3 : De l'énergie primaire à l'énergie utile (source : humantektur)

1.1.6.2 Energie secondaire

L'énergie secondaire est une énergie obtenue par transformation, contrairement à l'énergie primaire, qui désigne une énergie disponible dans l'environnement et sans transformation.

Cette énergie est souvent plus facile à stocker, transporter et utiliser que les sources d'énergie primaire.

C'est pour cette raison que les formes d'énergie secondaire sont appelées « vecteurs énergétiques ». C'est le cas notamment de l'électricité, des carburants pétroliers raffinés (essence, gasoil) ou encore, à l'avenir, de l'hydrogène.

1.1.6.3 Energie finale

L'énergie finale est l'ensemble des énergies délivrées prêtes à l'emploi à l'utilisateur final : le litre d'essence sans plomb à mettre dans sa voiture, l'électricité disponible à sa prise, etc.

De par la diversité de ses usages, l'énergie finale adopte de multiples formes : énergie électrique, énergie thermique, énergie mécanique...

Cette énergie finale n'est qu'une fraction de l'énergie primaire initiale, une fois que celle-ci a été transformée en énergie secondaire, stockée, transportée et enfin distribuée au consommateur final.

1.1.6.4 Energie utile

L'énergie utile, est celle qui procure le service recherché. Par exemple quand une ampoule à incandescence est allumée, seulement 12% de l'énergie finale sert à la fonction d'éclairage ! le reste est perdu sous forme de chaleur par effet joule.

2. Centrales nucléaires

Une centrale nucléaire génère de l'électricité grâce à l'énergie dégagée par une réaction contrôlée de fission nucléaire, principalement des isotopes de l'Uranium et du Plutonium. Les principales technologies en service utilisent le réacteur de fission comme une chaudière alimentant en chaleur un circuit vapeur qui génère de l'électricité.

Les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) dit de 2ème génération, comprenant un cycle vapeur primaire confiné traversant le réacteur et un cycle vapeur secondaire relié aux turbines. Le réacteur EPR en construction, dit de 3ème génération, repose également sur la technologie eau pressurisée. Il intègre dès la conception des avancées en termes de sûreté.

Parmi les évolutions attendues, le développement des réacteurs à neutrons rapides (RNR) de 4ème génération permettrait de limiter drastiquement la consommation de combustible et les déchets. Les "Small Modular Reactors" (SMR) pourraient également se développer pour répondre aux besoins de moyenne puissance.

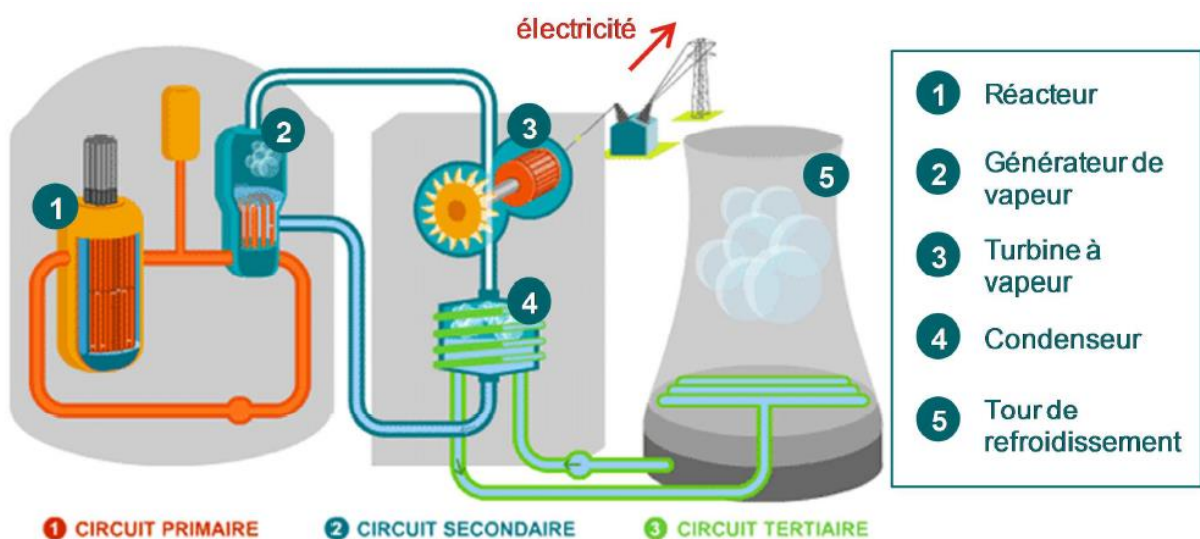
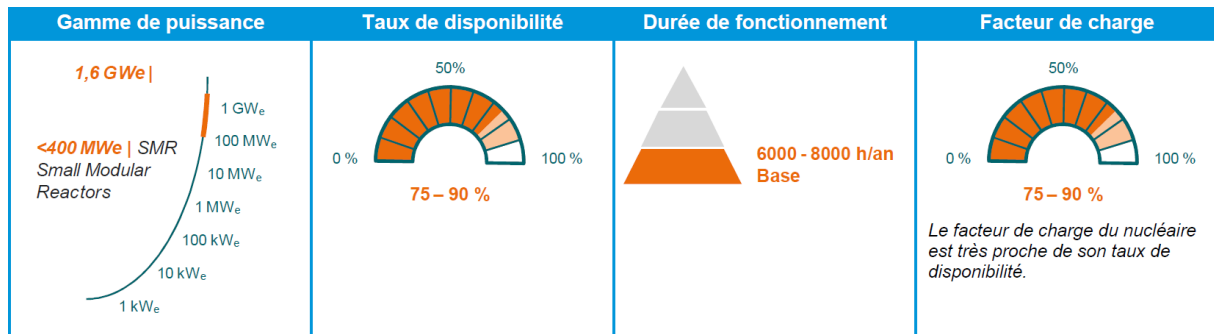


Figure 4.1 : Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire



Avantages	Inconvénients
• Pas d'émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité • Coût marginal de production d'électricité modéré, en raison notamment du coût relativement faible du combustible • Longue durée de vie (40 à 60 ans) • Ressources en combustible importantes pour la 4ème génération (potentiellement plusieurs siècles) • Forte densité énergétique	• Gestion des déchets nucléaires • Usage de combustible fissile (approvisionnement en combustible et dépendance énergétique) • Acceptabilité sociétale complexe (sécurité, sureté, déchets) • Criticité de l'impact en cas d'incident • Complexité du démantèlement et de la gestion de la fin de vie des centrales

Questions d'autoévaluation :

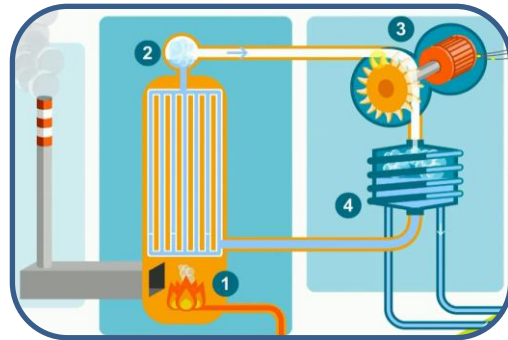
- Pourquoi les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon...) et fissiles comme l'uranium ne sont pas considérées comme renouvelables ?

3. Centrales thermiques à flamme

Vidéos learning

Les centrales thermique et nucléaire

V3



Lien hypertexte



Dans une centrale thermique dite "à flamme", la chaleur de combustion dégagée dans une chaudière permet de générer de la vapeur qui, en circulant dans une turbine reliée à un alternateur, produit de l'électricité.

Diverses technologies existent, en fonction du combustible (charbon, fioul, gaz) ou du type de chaudière. Les chaudières à charbon pulvérisé sont les plus nombreuses ; de meilleures performances peuvent encore être atteintes à des niveaux de température et de pression plus élevés. Les chaudières à lit fluidisé circulant (LFC), flexibles sur les combustibles utilisés, sont également en développement.

Les efforts actuels visent à réduire l'impact environnemental des installations (réduction des émissions polluantes, captage du CO₂, etc.). Le fonctionnement en cogénération est possible, accroissant ainsi l'efficacité énergétique globale.

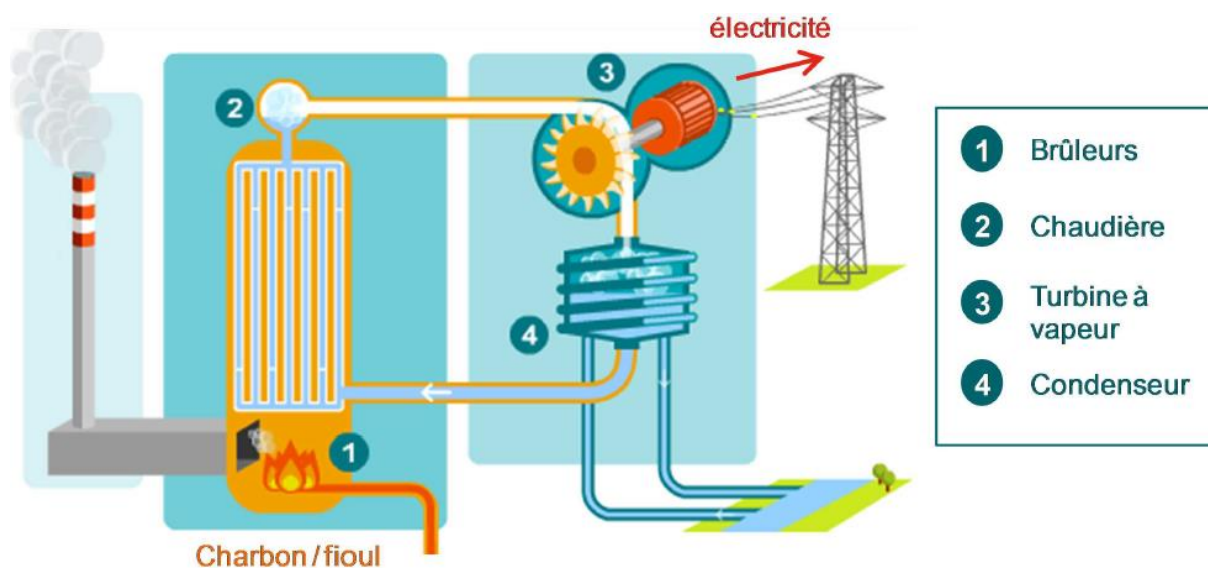
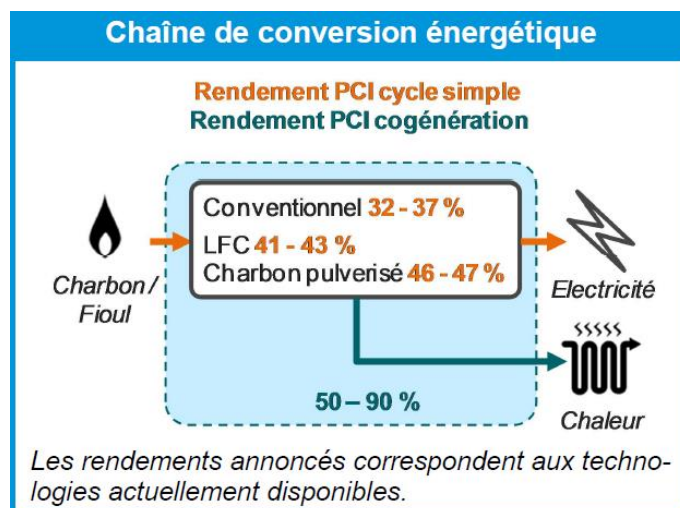


Figure 5.1 : Schéma de fonctionnement d'une centrale thermique à flammes

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
1 GW_e 100 MW_e 10 MW_e 1 MW_e 100 kW_e 10 kW_e 1 kW_e	50% 0 % 100 % 80 - 85 % L'indisponibilité est due en particulier aux opérations de maintenance.	2000 - 6000 h/an Semi-base	50% 0 % 100 % 20 - 85 % Utilisées en base, les centrales thermiques ont un facteur de charge plus élevé.

Avantages	Inconvénients
• Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande • Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible) • Flexibilité dans le choix du combustible (pour certaines technologies) • Longue durée de vie (30 à 40 ans)	• Réactivité faible au démarrage (plus d'1h pour atteindre la puissance max) • Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique) • Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, en particulier sur charbon et fioul (SOx, NOx, poussières) • Coût et usure liés aux arrêts / démarrages • Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

Questions d'autoévaluation :

- Dans une centrale thermique classique, par quoi est entraînée la turbine ?
- Dans une centrale thermique classique, quelle sorte d'énergie primaire utilise-t-on ?
- Après être passée dans la turbine, que devient la vapeur d'eau ?

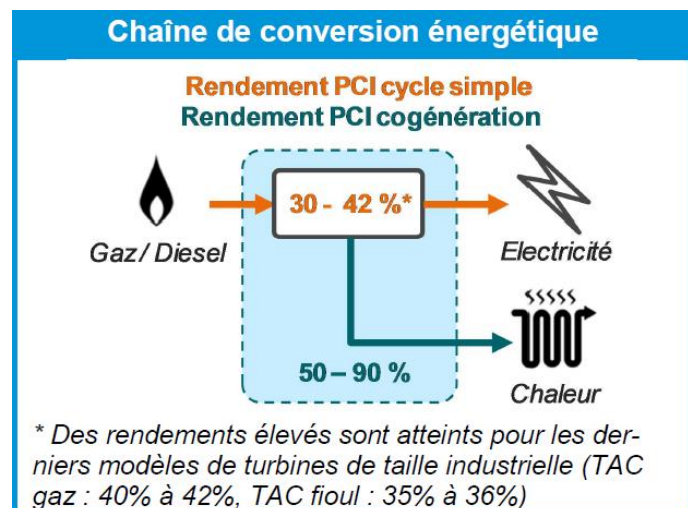
4. Turbine à combustion (TAC)

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un combustible (gaz ou fioul) et d'air initialement comprimé.

Alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture, le développement des TAC gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants moindres).

Sur le réseau électrique, la réactivité des TAC est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie ou le tertiaire, notamment pour un fonctionnement en cogénération.

L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique.



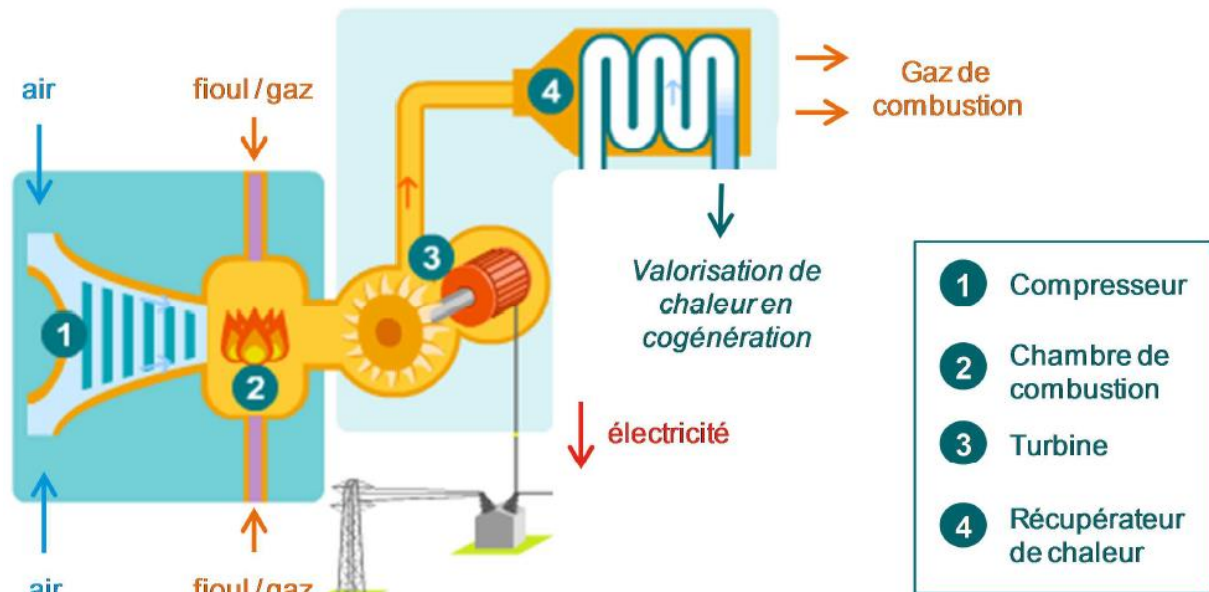
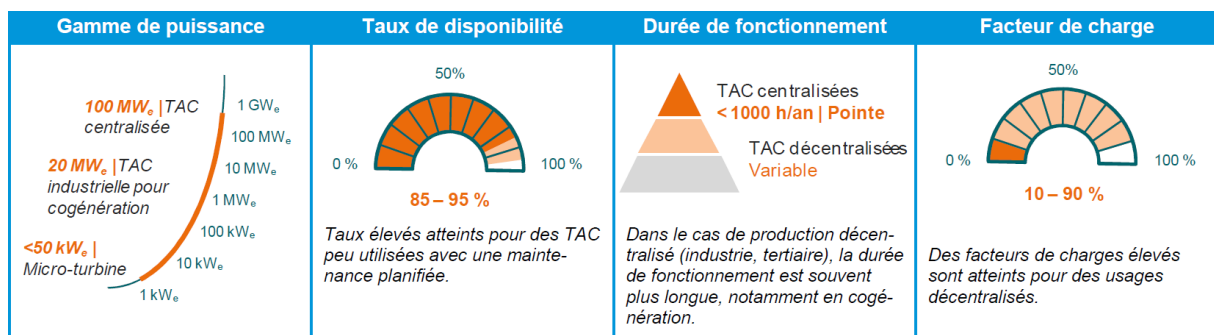


Figure 6.1 : Schéma de fonctionnement d'une TAC



Avantages	Inconvénients
- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande - Forte réactivité (moins de 30 min pour atteindre la puissance max) - Autonomie et sécurité de fourniture des TAC fioul, grâce au stock de combustible sur site - Longue durée de vie (25 à 30 ans) - Qualité de la chaleur pour cogénération (haute température)	- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique) - Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le fioul (SOx, NOx) - Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux) - Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

5. Centrales à cycle combiné

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC : le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine dédiée.

Les centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG) présentent l'avantage d'atteindre des rendements élevés, par rapport aux TAC en cycle simple, et de fournir une alternative aux centrales thermiques à flamme avec un moindre impact environnemental.

La cogénération sur les CCG est possible en valorisant la chaleur résiduelle, mais elle demeure peu répandue.

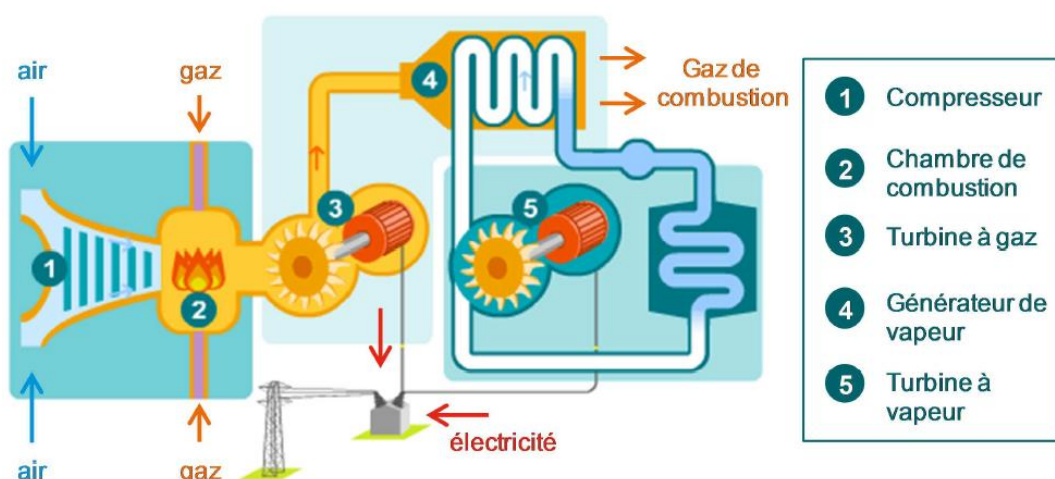
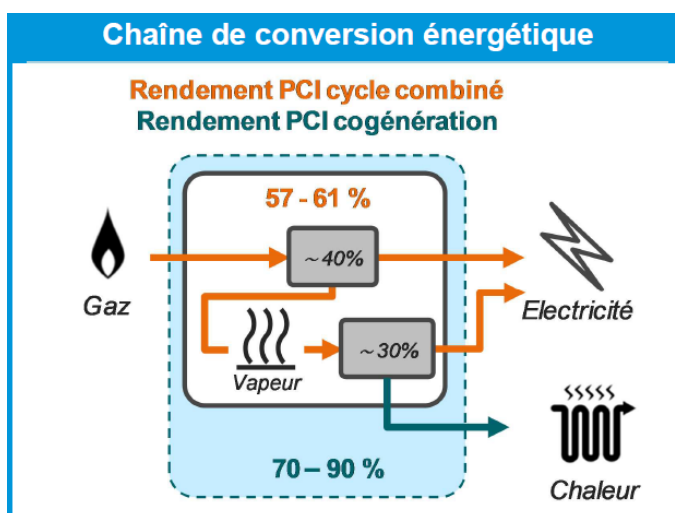
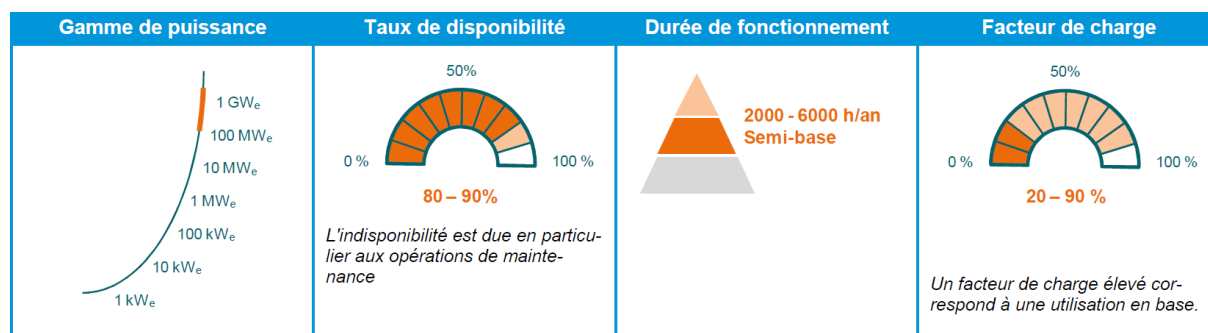


Figure 7.1 : Schéma de fonctionnement d'une centrale à cycles combinés



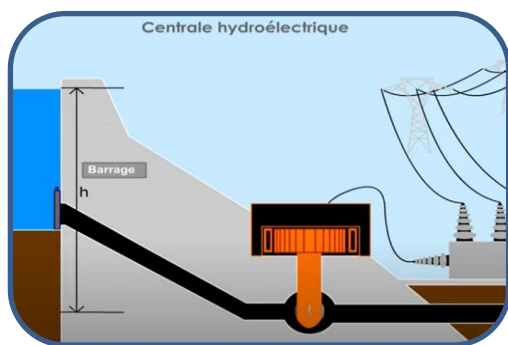
Avantages	Inconvénients
• Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande • Rendement élevé par rapport à un cycle simple • Réactivité (30 min à 1h pour atteindre la puissance max) • Impact environnemental réduit par rapport aux centrales thermiques à flammes: émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants (SOx, NOx, etc.) moindres • Longue durée de vie (25 à 30 ans)	• Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique) • Emissions de gaz à effet de serre • Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux) • Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

6. Centrales hydroélectriques

Vidéos learning

La centrale hydroélectrique

V4



Lien hypertexte

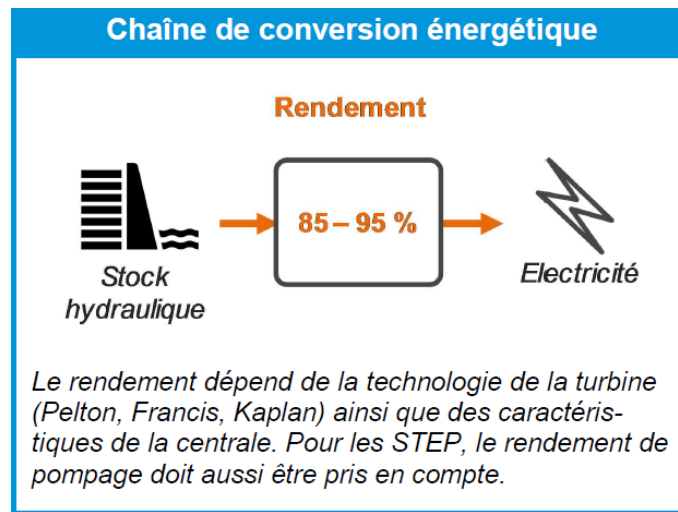


Les centrales hydroélectriques exploitent l'énergie potentielle gravitaire de l'eau pour produire de l'électricité. La chute de l'eau, guidée par un réseau de conduites, entraîne des turbines reliées à un alternateur. On distingue les ouvrages hydroélectriques disposant d'un stock d'énergie (ouvrages lac avec retenue d'eau) à ceux produisant au « fil de l'eau ». Les ouvrages éclusés sont mixtes, avec une capacité de stockage limitée.

La taille des ouvrages est extrêmement variable, de l'ordre du kWe pour la « pico-hydro » jusqu'à plusieurs dizaines de GWe, pour des hauteurs de chutes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Les centrales de taille restreinte, souvent au « fil de l'eau », produisent une électricité considérée comme fatale. A l'inverse, les ouvrages disposant d'un stock hydraulique sont des outils de flexibilité pour le réseau.

Certains ouvrages, les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), disposent en plus d'une capacité de pompage qui offre un degré de flexibilité supplémentaire, en remontant

l'eau dans un bassin supérieur pendant les périodes creuses de consommation électrique et en produisant de l'électricité durant les périodes de plus forte consommation.



La figure ci-dessous indique quelle turbine choisir pour un débit et une hauteur de chute donnée ainsi que la puissance pouvant être atteinte.

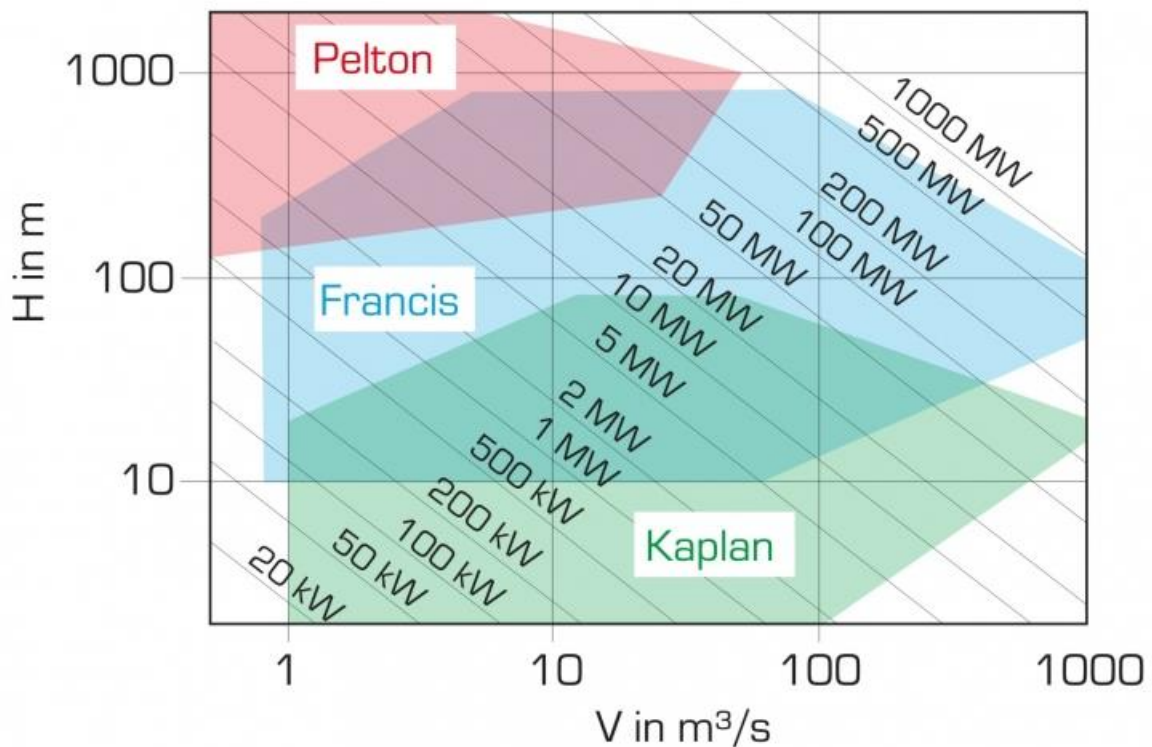


Figure 8.1 : Choix d'une turbine pour centrale hydroélectrique

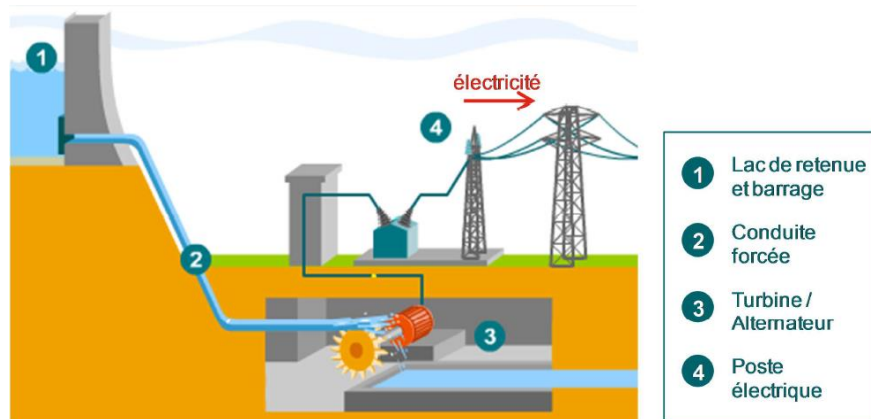
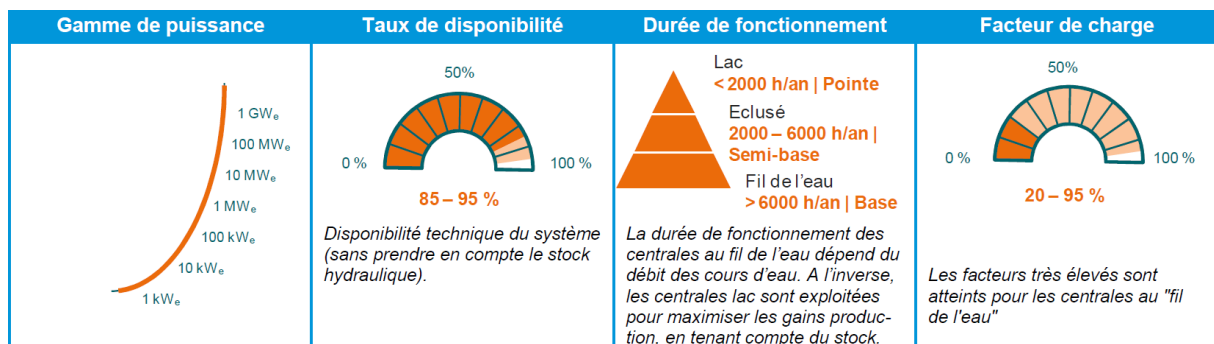


Figure 8.2 : Schéma de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique



Avantages	Inconvénients
• Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité • Forte réactivité (démarrage en quelques secondes) • Production d'électricité flexible pour les centrales disposant d'un stock (et d'une capacité de pompage pour les STEP) • Longue durée de vie (supérieur à 50 ans) • Coût marginal de production d'électricité faible (dépendant du stock)	• Raréfaction des sites exploitables (fortes contraintes géographiques) • Emprise au sol des gros ouvrages hydro-électriques • Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impacts sur la continuité écologique des cours d'eau, ennoiment de zones habitées, etc.) • Production électrique fatale pour les centrales sans stock • Sensibilité au stress hydrique

6.1 Turbine Kaplan

Une turbine Kaplan est une turbine hydraulique à hélices, de type « réaction » qui a été inventée en 1912 par l'ingénieur autrichien Viktor Kaplan.

Elle est adaptée pour les faibles chutes de 2 à 25 mètres de hauteur, et les très grands débits de 70 à 800 m³/s.

Les caractéristiques habituelles des turbines Kaplan sont les suivantes :

- Diamètre : 2 à 11 mètres.
- Vitesse de rotation : de 50 à 250 tr/min.
- Rendement énergétique : de 90 % à 95 %.



Figure 8.3 : Turbine Kaplan

6.2 Turbine Francis

Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type « à réaction ». Elle est adaptée à des hauteurs de chute moyennes (de 30 à 300 mètres), pour des puissances et débits moyens ou forts.



Figure 8.4 : Turbine Francis

Les caractéristiques habituelles des turbines Francis sont les suivantes :

- Diamètre : de quelques décimètres à 5 mètres.
- Vitesse de rotation : de 70 à 3 000 tr/min.
- Rendement énergétique : de 80 % à 95 %.

6.3 Turbine Pelton

Une turbine Pelton est une turbine hydraulique de type « à réaction ». Elle a été inventée en 1879 par Lester Allan Pelton.

Ces turbines sont adaptées à des chutes dites « hautes chutes » (supérieures à 400 m) avec un faible débit d'eau (inférieur à 15 m³/s)

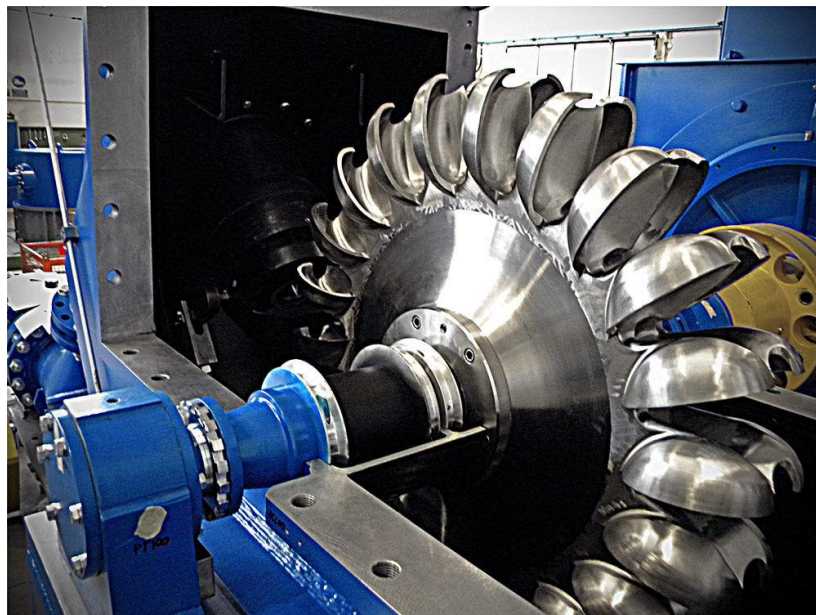


Figure 8.5 : Turbine Pelton

Les caractéristiques habituelles des turbines Pelton sont les suivantes :

- Diamètre : de quelques décimètres à 10 mètres.
- Vitesse de rotation : jusqu'à 1500 tr/min.
- Rendement énergétique : de l'ordre de 80%.

Questions d'autoévaluation :

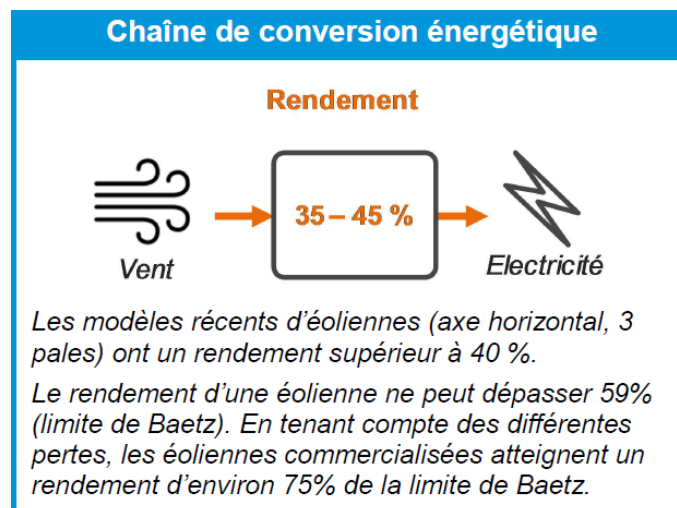
- Dans une centrale hydraulique, par quoi est entraînée la turbine ?
- Après être passée dans la turbine, que devient l'eau ?
- Où sont construites les centrales hydrauliques ? pourquoi ?
- Quel est le rôle du barrage, de la conduite forcée, de la turbine, de l'alternateur ?

7. Fermes éoliennes

7.1 Onshore

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité via un rotor, lié aux pales, ainsi qu'un dispositif électromécanique. La puissance fournie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la performance de l'éolienne dépend de l'emplacement ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles. L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3 m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 m/s à 15 m/s. Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil (variable selon les modèles).

Les modèles les plus répandus sont les éoliennes à axe horizontal à 3 pales, avec rotors à vitesse variable. Alors que les modèles initiaux étaient conçus avec des rotors à vitesse fixe, les exigences des opérateurs de réseaux pour une électricité de meilleure qualité ont fait évoluer les technologies vers une variabilité croissante de la vitesse des rotors. Une évolution majeure concerne également le passage des électroaimants à des aimants permanents, plus fiables et efficaces à charge partielle.



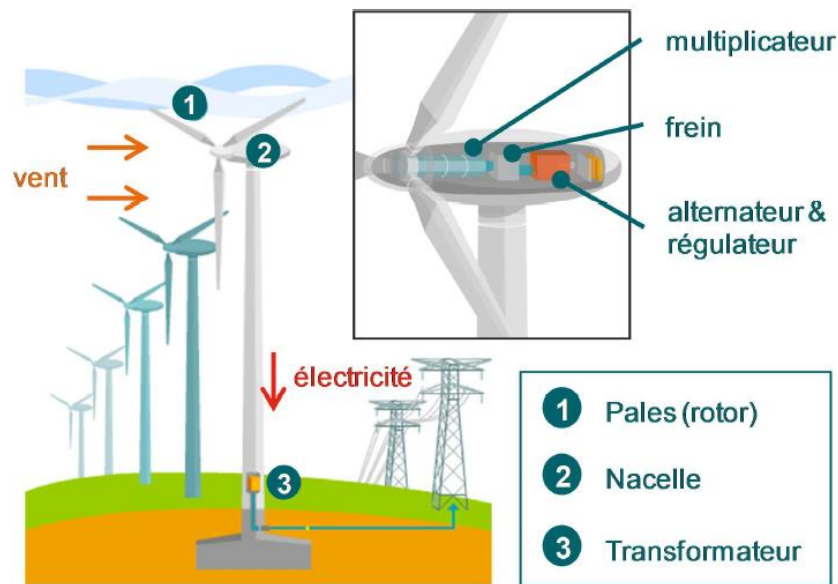
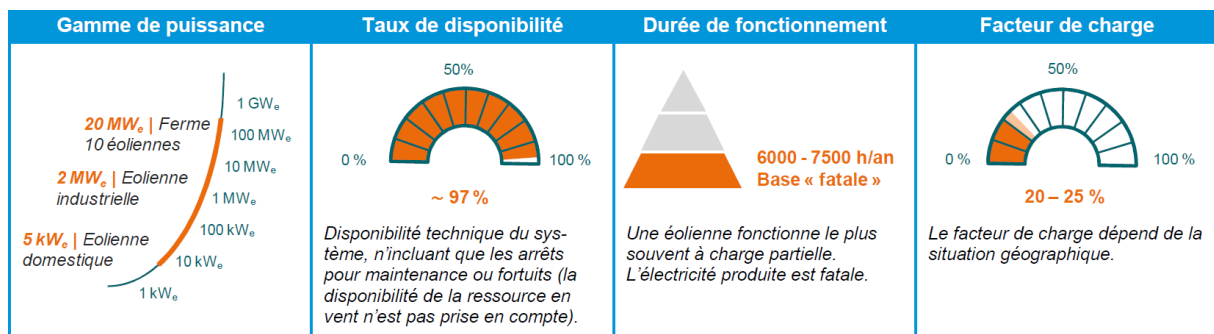


Figure 9.1 : Schéma de fonctionnement d'une éolienne onshore



Avantages	Inconvénients
• Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité • Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau national et européen • Conception, installation et maintenance aisée • Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")	• Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource) • Incertitude dans la prévision de la ressource • Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.) • Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

Vidéos learning

Les éoliennes

V5



Lien hypertexte



7.2 Offshore

Le principe de fonctionnement des éoliennes marines est similaire à celui des technologies terrestres : l'énergie du vent est convertie en électricité via la rotation d'un rotor relié à un dispositif électromécanique. Le milieu marin présente cependant des spécificités, avec une ressource en vent plus stable mais aussi de fortes contraintes sur la conception des infrastructures ou la conduite opérationnelle.

Les éoliennes posées, disposant de fondations fixées sur les fonds marins (20% à 25% de l'investissement), sont les technologies les plus développées. Le diamètre des rotors et la puissance des éoliennes n'a cessé de croître, atteignant plus de 150 m pour 8 MWe.

Pour étendre le champ d'application à des fonds plus profonds, des technologies éoliennes flottantes sont en cours de développement. Des premiers démonstrateurs ont été mis en place jusqu'à des profondeurs de 200 m. L'éolien flottant fait cependant face au problème du raccordement, dont le coût est déjà substantiel pour l'éolien posé (10% à 25% de l'investissement).

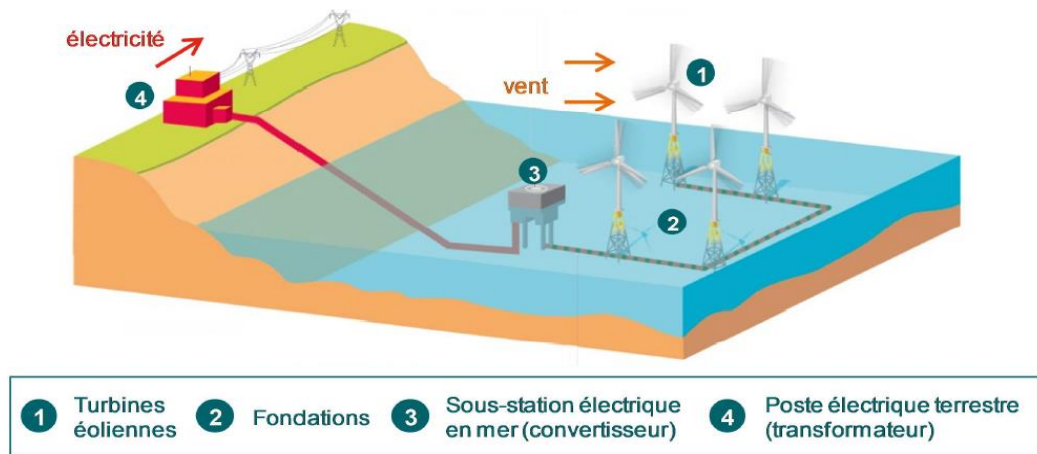
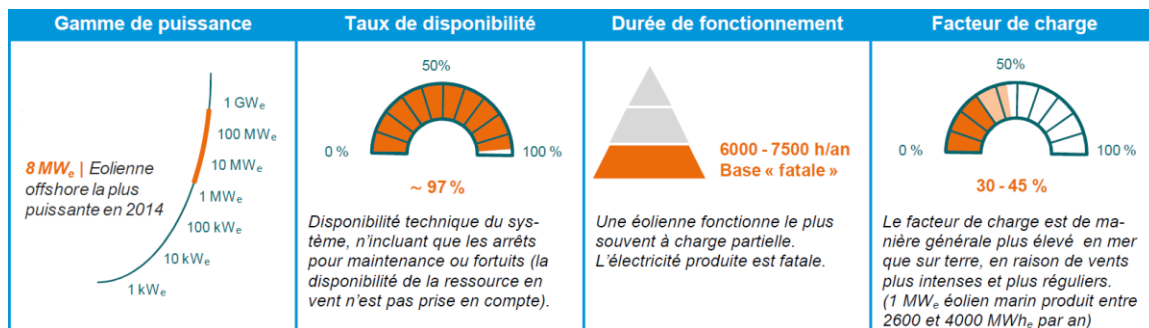


Figure 9.2 : Schéma de fonctionnement d'une éolienne offshore



Avantages	Inconvénients
• Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité • Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau national et européen • Ressource en vent élevée et stable en mer • Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")	• Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource) • Incertitude dans la prévision de la ressource • Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en raison du milieu marin • Complexité et coût du raccordement • Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (pollution visuelle, conflits avec les activités maritimes)

Questions d'autoévaluation :

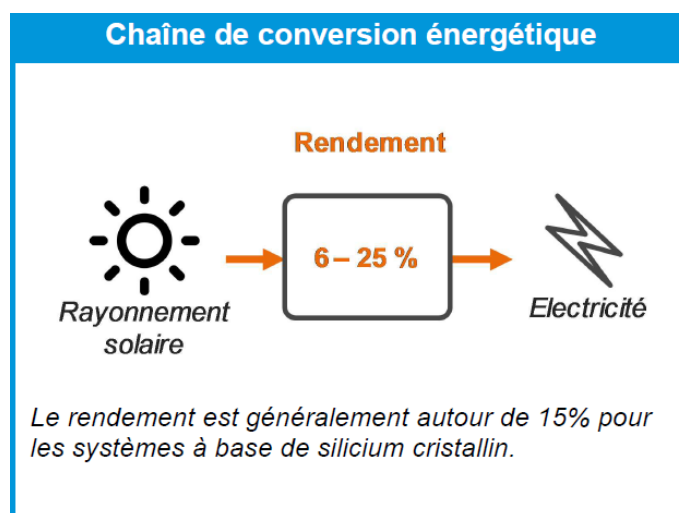
- Quel est l'élément que toutes les centrales possèdent dont la centrale éolienne ?
- Peut-on considérer que l'énergie éolienne est indirectement issue du soleil ?

8. Centrales solaires photovoltaïques

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité grâce à un matériau semi-conducteur qui, sous l'excitation des photons de la lumière, crée un déplacement d'électrons. Les matériaux semiconducteurs peuvent être cristallins (silicium monocristallin et polycristallin), sous forme de couche mince (silicium amorphe, tellure de cadmium), ou encore faits de matière organique. Les matériaux cristallins sont les plus répandus. Les couches minces ont toutefois des propriétés intéressantes, notamment pour une intégration aux bâtiments (meilleur captage du rayonnement diffus, bonne résistance à l'échauffement, etc.).

Les systèmes se présentent sous forme de panneaux disposés au sol ou sur des toitures, dans un nombre variant d'un à plusieurs centaines de panneaux. Le courant délivré étant continu, l'installation d'un onduleur est nécessaire pour délivrer un courant alternatif, notamment dans le cas d'une injection de l'électricité sur le réseau.

Les panneaux PV captent les rayonnements solaires direct et diffus. Certains systèmes comme les « trackers », qui suivent la course du soleil, ou les concentrateurs permettent de maximiser les rendements en zones de fort ensoleillement direct.



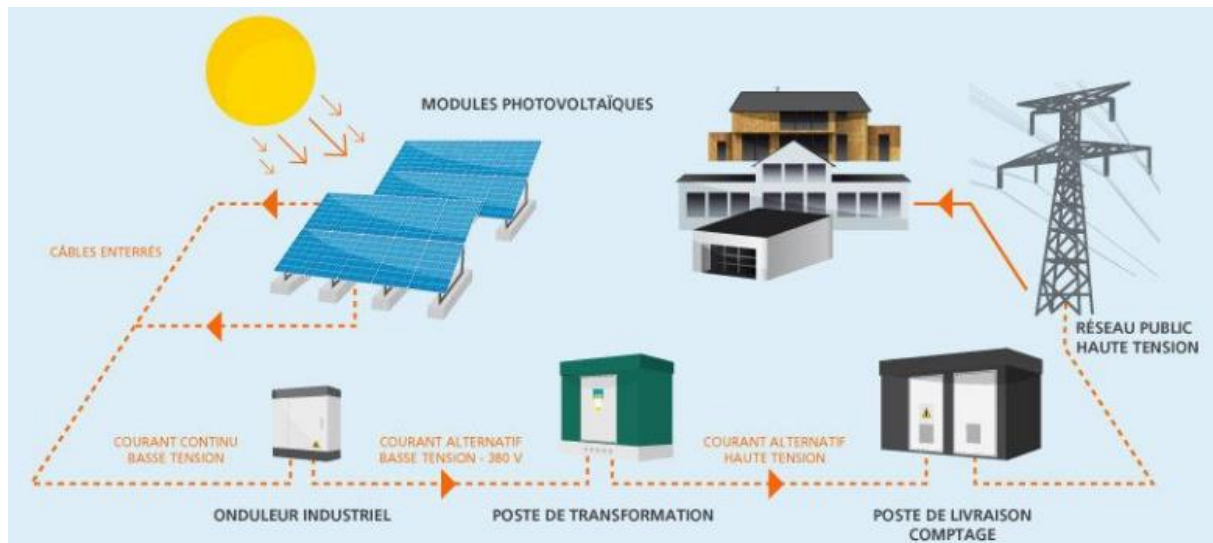
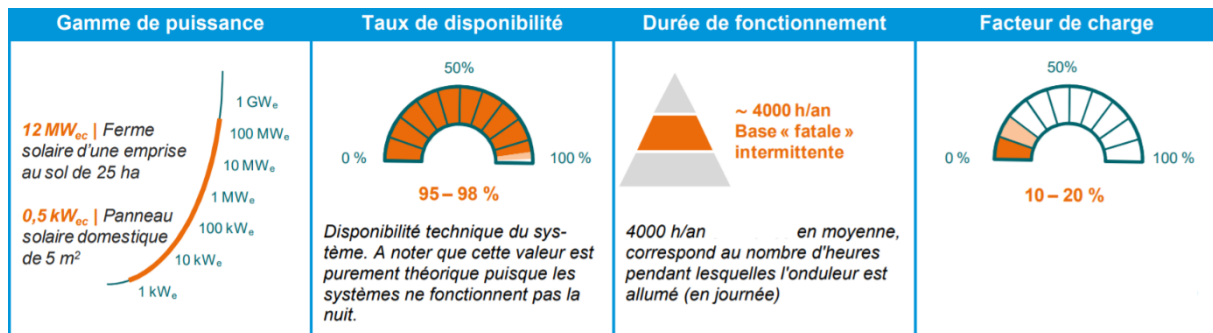


Figure 10.1 : Schéma de fonctionnement d'une centrale PV



Avantages	Inconvénients
• Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité • Abondance de la ressource • Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource") • Forte modularité d'installation, adaptée au logement particulier et à l'autoconsommation	• Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de l'ensoleillement) • Incertitude dans la prévision de la ressource • Création de perturbations sur le réseau (variations brutales d'ensoleillement) • Emprise au sol, conflits d'usage

Vidéos learning

La centrale solaire photovoltaïque

V6



Lien hypertexte



9. Centrales solaires thermiques

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques reposent sur la technique suivante :

- Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
- La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
- La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.
- L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Il existe 3 types de centrales solaires thermiques, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

Les centrales à tour : Un champ de miroirs orientables situés au sol renvoie les rayons solaires sur une chaudière située en haut d'une tour.

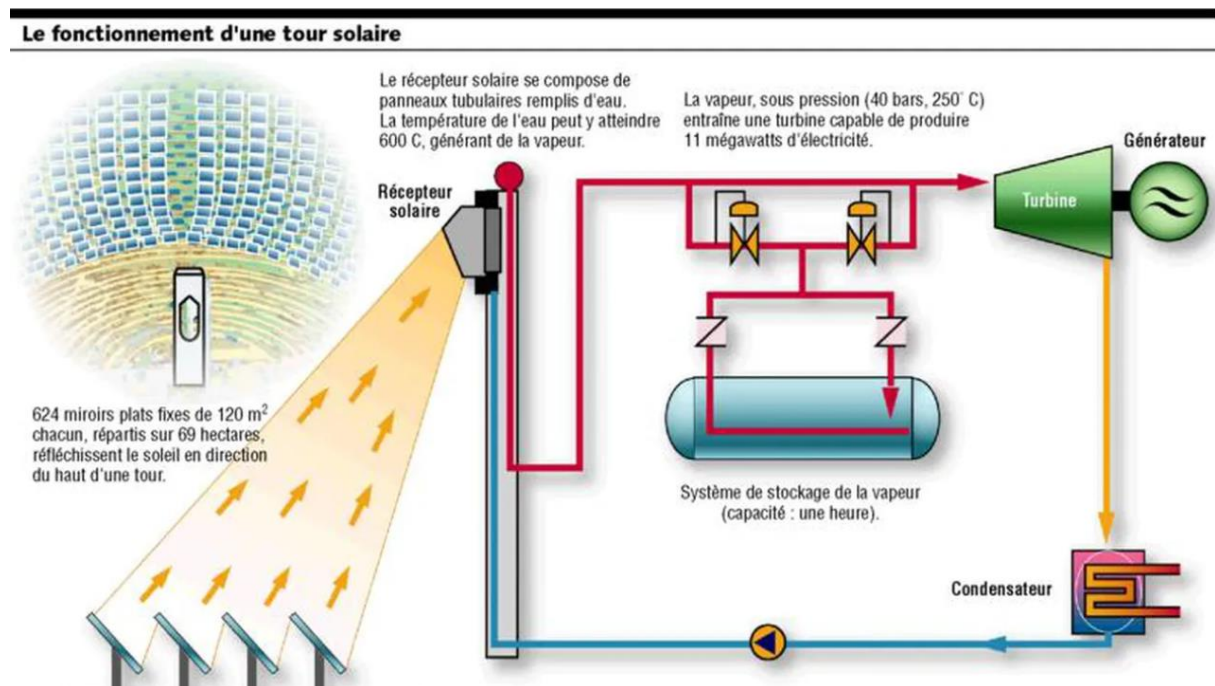


Figure 11.1 : Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire thermique



Figure 11.2 : Centrale à tour

Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques : De longs miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons sont concentrés sur un tube dans lequel circule le fluide qui servira à transporter la chaleur vers la centrale.



Figure 11.3 : centrale à collecteurs cylindro-paraboliques

Les centrales à collecteurs paraboliques : Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de paraboles orientables dans lesquelles se trouve des mini-centrales électriques.



Figure 11.4 : centrale à collecteurs paraboliques

Vidéos learning

La centrale solaire thermique

V7



Lien hypertexte

[WWW](#)

Chapitre III

LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION D'ELECTRICITE

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autres, les pertes joules sur les lignes ces réseaux sont à très haute tension. Du point de vue structure, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés.

Les réseaux d'électricité ont été conçus dans le but de veiller à la fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique. Les réseaux relient entre elles toutes les unités de production et visent à assurer une fonction de secours en cas de pannes et/ou de défaillances.

Vidéos learning

Le transport et la distribution d'électricité

V8



Lien hypertexte



1. Les transformateurs

Les transformateurs sont des éléments essentiels dans le transport, et la distribution de l'énergie électrique. Ils jouent le rôle d'échangeurs et permettent de passer d'un réseau à un autre, ils sont utilisés à la sortie des centrales et entre les réseaux de tensions différentes.

Le but principal des transformateurs de puissance est de convertir la tension à l'extrémité des centrales de production en tension transmises par les lignes de distributions et puis de la convertir à l'autre extrémité de réception à des tensions d'utilisation. Le transformateur a deux fonctions principales :

1. Le changement du niveau de tension. Le transformateur est largement utilisé sur le réseau de transport et de distribution pour élever ou abaisser la valeur efficace de la tension. Nous avons vu par exemple que pour chaque puissance, il y a une tension optimale d'un point de vue économique pour transporter la puissance.
2. L'isolation galvanique : Le transformateur permet de créer des sources de tensions qui n'ont pas de référence de potentiel les unes par rapport aux autres (alimentation de circuit électronique, de circuit de sécurité). On peut trouver pour ce type d'utilisation des transformateurs qui présentent un rapport de transformation égal à 1.



Figure 12.1 : Transformateur

Dans les réseaux de distribution ruraux, où les distances entre points à desservir augmentent les dépenses d'investissement, on recherche les solutions économiques. Les lignes à moyenne et basse tension sont aériennes, montées sur poteaux en béton ou en bois. Les postes de transformation sont placés dans des cabines maçonnées, étroites et hautes, de construction simple ou même portés par les pylônes eux-mêmes (poste sur poteaux).



Figure 12.2 : Transformateur haut de poteau

2. La stratification du réseau électrique

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit :

THT (VHV) : Très haute tension (Very high voltage), pour des tensions composées supérieures à 220 kV ;

HT (HV) : Haute tension (High voltage), des tensions composées supérieures comprises entre 33 kV et 220 kV ;

MT (MV) : Moyenne tension (Medium voltage), des tensions composées comprises entre 1 kV et 33 kV ;

BT (LV) : Basse tension (Low voltage), tension comprise entre 100 V et 1 kV ;

TBT (VLV) : Très basse tension (Very low voltage), inférieure à 100 V

Il y a aussi la norme française qui définit les niveaux comme suit : HTB : supérieure à 50 kV, HTA : entre 1 kV et 50 kV, BTB : entre 500 V et 1 kV, BTA : entre 50 et 500 V et TBT : inférieur à 50 V.

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (U_n en Volts)	
		Tension Alternatif	Tension Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50\,000$	$1500 < U_n \leq 75\,000$
	HTB	$U_n > 50\,000$	$U_n > 75\,000$

Tableau 13.1 : Table de correspondance entre les différents niveaux de tension

3. La structure du réseau électrique

Les structures du réseau électrique diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette structure est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation.

1.1 Réseau maillé

Cette structure est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage.

Elle permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale.

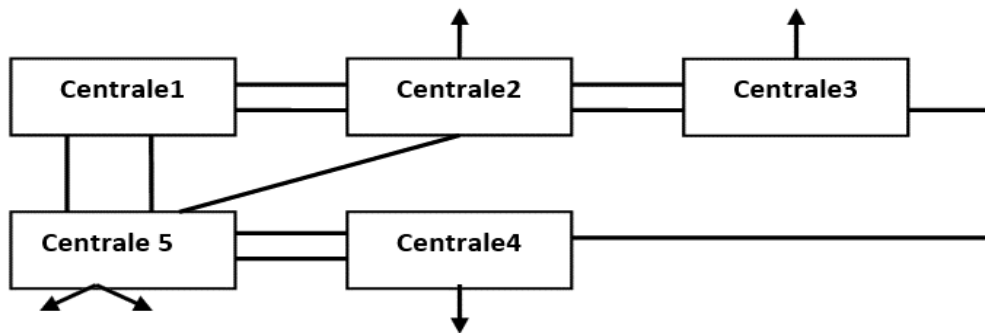


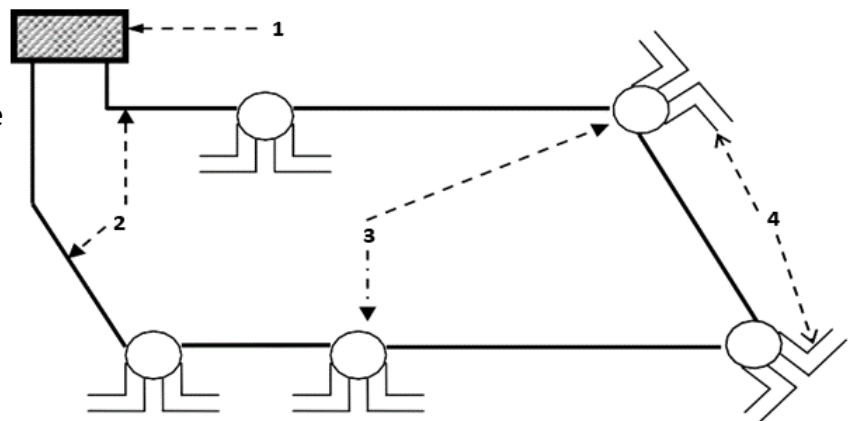
Figure 14.1 : Réseau maillé

3.1 Réseau bouclé

Cette structure est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

Figure 14.2 : Réseau bouclé

- 1-Poste HT/MT
- 2-Ligne MT
- 3-Post MT/BT
- 4-Ligne BT



3.2 Réseau radial

C'est une structure simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

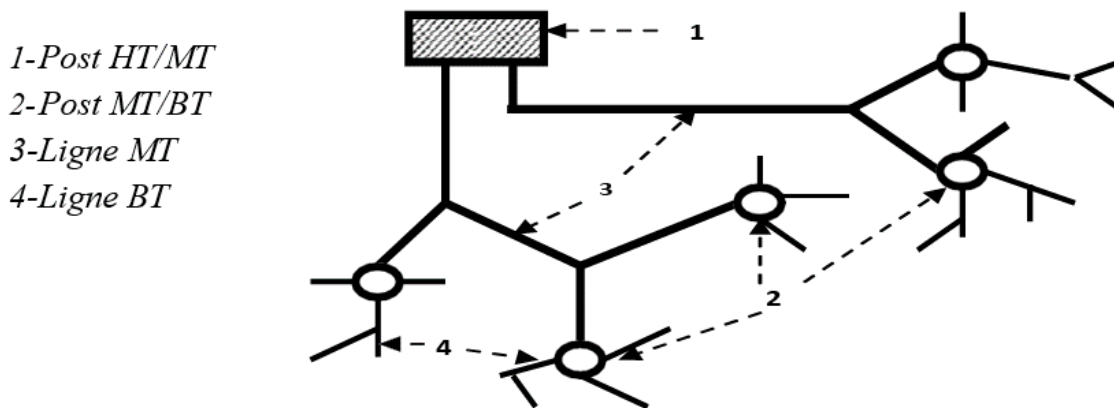


Figure 14.3 : Réseau radial

3.3 Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

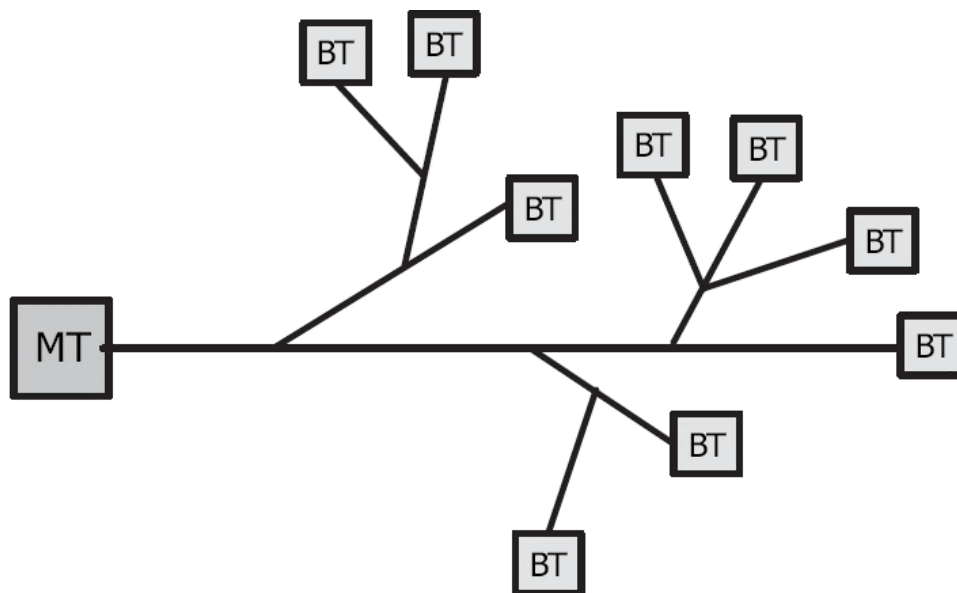


Figure 14.4 : Réseau arborescent

4. Architecture des réseaux de distribution

La qualité de service en milieu urbain est primordiale à cause des infrastructures sensibles comme les hôpitaux, usines. . .etc.

Le réseau urbain est plus souvent enterré avec des postes maçonnés. Ce choix réduit la fréquence des défauts, mais la durée d'intervention est souvent plus longue.

La répartition géographique des charges est l'une des contraintes qu'il faut prendre en compte lors du choix d'une architecture. En effet, un milieu urbain, est caractérisé par une densité de charge élevée avec des longueurs de conducteurs faibles. Ainsi, les puissances appelées sont importantes et les problèmes qui peuvent intervenir sont principalement liés aux courants admissibles dans les conducteurs.

Les architectures rencontrées habituellement en milieu urbain utilisent bouclées (parfois radiales) avec des dérivations double ou en coupure d'artère.

4.1 Distribution en « antenne » ou « simple dérivation »

Il est principalement utilisé dans les zones rurales, en réseau aérien. En cas de défaut sur un tronçon de câble ou dans un poste, les utilisateurs sont privés d'alimentation le temps de la réparation.

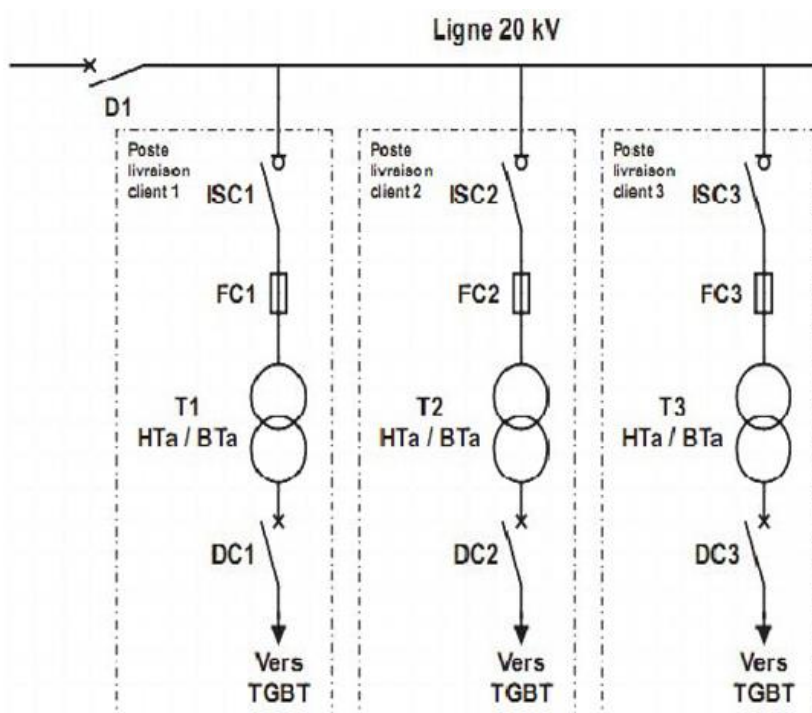


Figure 15.1 : Schéma de distribution en « simple dérivation »

4.2 Distribution en double dérivation

Il est utilisé pour assurer une continuité de service optimale. En cas de défaut sur l'une des lignes, l'alimentation de l'abonné est permutée sur la seconde. Les deux arrivées sont différentes mais peuvent être issues du même poste source. On ne peut se connecter sur les deux arrivées en même temps grâce aux verrouillages mécaniques présents entre D1 & A2. Il est possible que la seconde arrivée (ou la troisième) soit un groupe électrogène (diesel, gaz, autre).

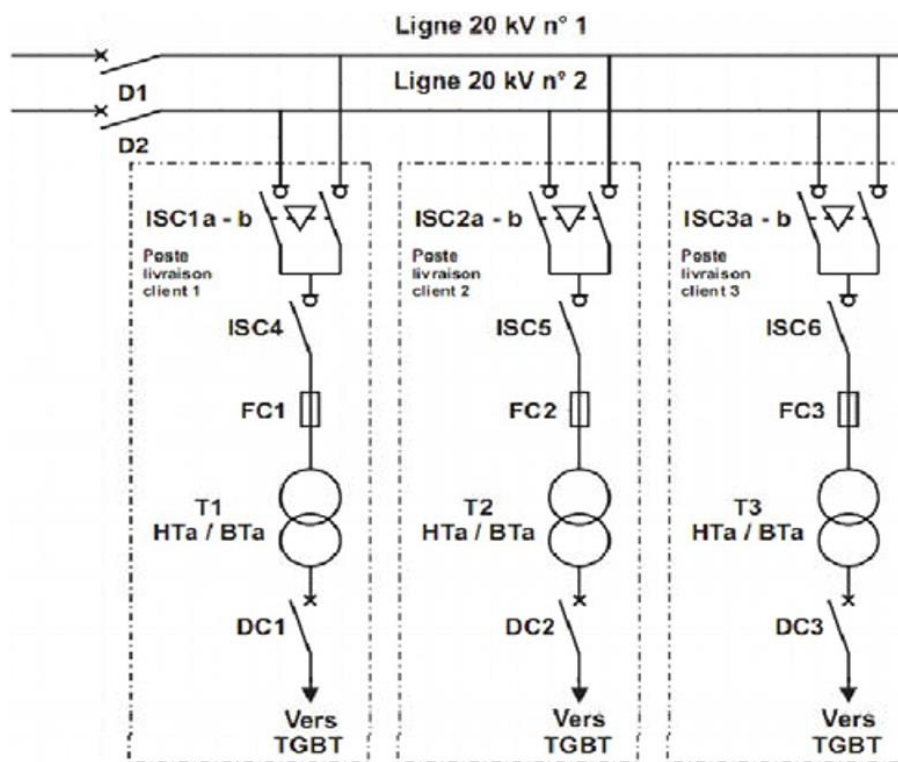


Figure 15.2 : Schéma de distribution en « double dérivation »

4.3 Distribution en « boucle » ou « coupure d'artère »

Il est utilisé en zone urbaine. En cas de défaut sur un tronçon de câble ou dans un poste, on isole le tronçon en défaut par l'ouverture des deux appareils de protection ou de sectionnement qui l'encadrent et on réalimente la boucle en refermant le disjoncteur.

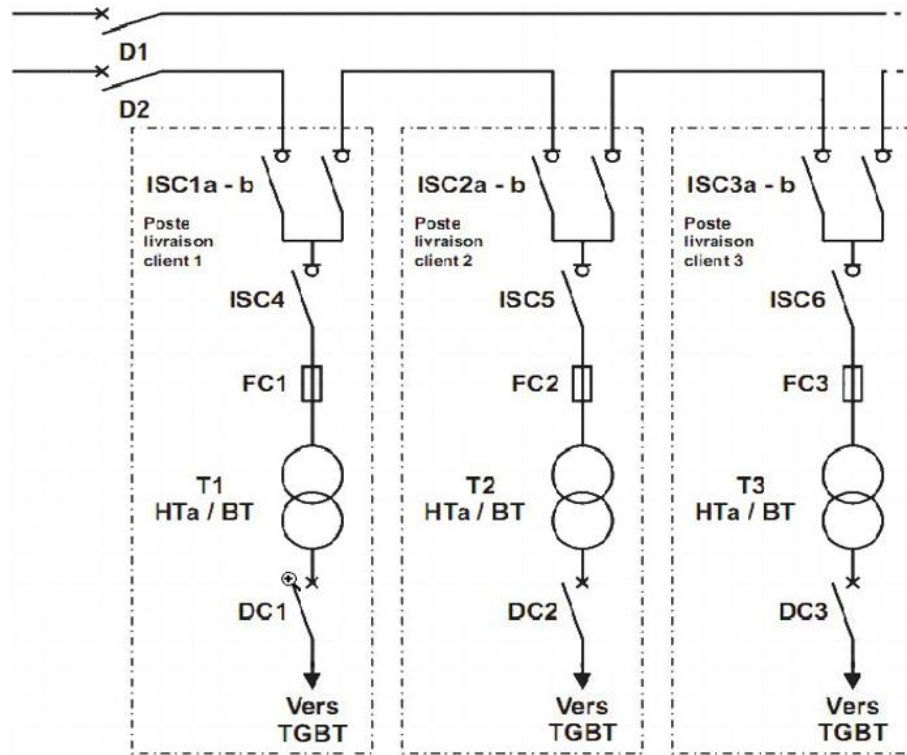


Figure 15.3 : Schéma de distribution en « coupure d'artère »

Chapitre IV

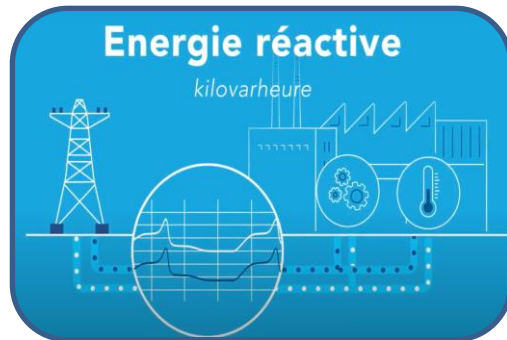
COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

1. Généralités

Vidéos learning

La compensation de l'énergie réactive

V9



Lien hypertexte



La circulation des puissances active et réactive provoque des pertes actives et des chutes de tension dans les conducteurs. Les pertes actives réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit le distributeur à ses clients.

La puissance apparente S [MVA] à deux composantes : la puissance (P) et la puissance (Q) liées par le déphasage « ϕ »

$$S = P + jQ = UI.(\cos \phi + j \sin \phi)$$

Le premier apparaît comme utile (puissance active), l'autre comme une puissance parasite (puissance réactive) dont la circulation sur le réseau provoque des phénomènes indésirables.

On voit donc l'intérêt économique de réduire les transits de la puissance réactive pour réduire les pertes. Ainsi est-il donc préférable sur le plan technique de les produire le plus près possible des lieux de consommation. C'est ce qu'on appelle « **compensation de l'énergie réactive** ». On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs.

La chute de tension à travers le réseau est donnée par :

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

R & X : Sont respectivement la résistance et la réactance de la ligne.

U : La tension au niveau de la charge.

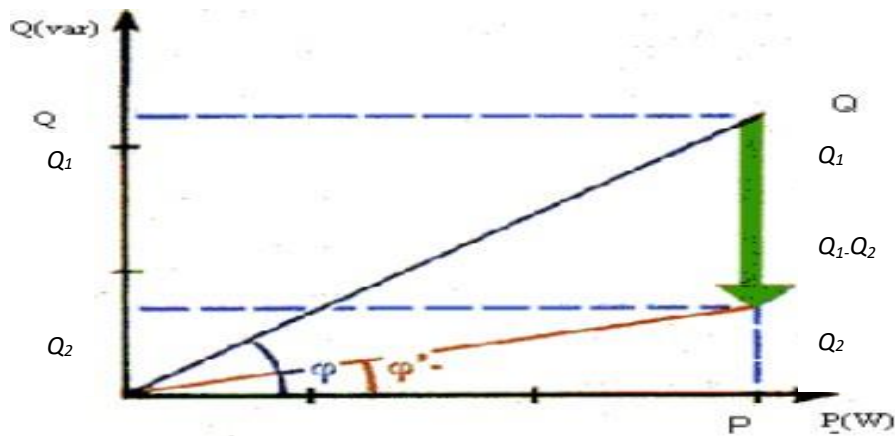


Figure 16.1 : Diagramme vectorielle représente l'importance de la compensation

Q_1 : La puissance réactive appelée par la charge seule.

$Q_1 - Q_2$: La puissance réactive fournie par la source supplémentaire.

Q_2 : La puissance réactive transitée par la source principale.

P : La puissance active appelée par la charge.

La puissance des condensateurs à installer sera égale à :

$$Q_b = Q_1 - Q_2$$

$$Q_b = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

2. Facteur de puissance

Le facteur de puissance de l'installation est le quotient de la puissance active en kW consommée par l'installation sur la puissance apparente en kVA fournie à l'installation.

Il est égal au cosinus de l'angle de déphasage « φ » entre la tension et le courant.

- Un facteur de puissance proche de 1 optimise le fonctionnement d'une installation.
- Il est possible d'exprimer la « $\tan \varphi$ » avec :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \text{facteur de puissance} ; \text{Le } \cos \varphi \text{ est compris entre } 0 \text{ et } 1.$$

- La valeur la plus faible de « $\tan \varphi$ » optimise l'installation.

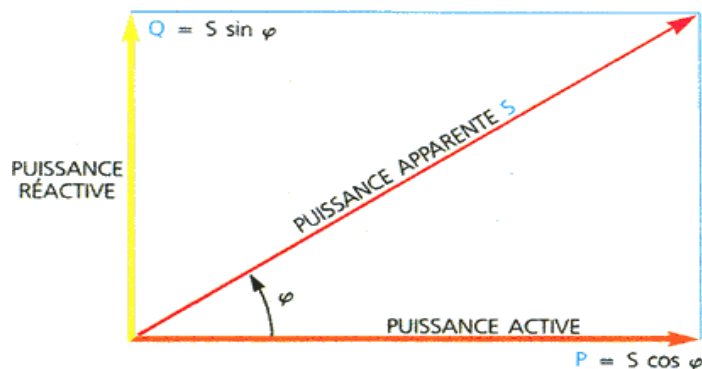


Figure 16.2 : Représentation des puissances par FRESNEL

Une trop grande consommation d'énergie réactive pour une installation électrique va augmenter considérablement ses courants en ligne bien que sa puissance active ne soit pas changée.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}.U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}.U}$$

Si « Q » augmente on a l'augmentation de « I ».

La compensation permet d'améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$). Soit un appareil ou groupe d'appareils appelant une puissance active P (W) et une puissance réactive Q (VAR). On souhaite réduire la ($\tan \varphi$) à une valeur plus faible ($\tan \varphi'$).

L'amélioration du facteur de puissance tend idéalement à lui donner une valeur proche de l'unité « 1 ».

En pratique, on se contente d'une valeur proche de 0,9 (inductif).

3. Avantages d'amélioration du facteur de puissance

Cette amélioration présente de nombreux avantages :

3.1 Diminution de la section des câbles

La puissance active transportée par un câble diminue lorsque le facteur de puissance s'éloigne de 1. Pour une même puissance active à fournir la diminution du facteur de puissance impose le choix de câbles de plus grande section.

3.2 Diminution des pertes en ligne

Un bon facteur de puissance permet une diminution des pertes en ligne à puissance active constante. Les pertes wattées (dus à la résistance des conducteurs) sont intégrées dans la consommation enregistrée par les compteurs d'énergie active (kWh) et sont proportionnelles au carré du courant transporté.

3.3 Réduction de la chute de tension

L'amélioration du facteur de puissance diminue l'énergie réactive transportée et de ce fait diminue les chutes de tension en ligne.

3.4 Augmentation de la puissance disponible

La puissance active disponible au secondaire d'un transformateur est d'autant plus grande que le facteur puissance de l'installation est élevé.

4. Moyens, principes et modes de compensation

4.1 Moyens de compensation

Compenser une installation consiste à installer une source d'énergie réactive de compensation qui permet d'améliorer le facteur de puissance de l'installation.

La compensation peut se faire en basse tension ou en haute tension, en utilisant des condensateurs. En basse tension la compensation est réalisée avec deux familles de produits :

- Les condensateurs de valeurs fixes ou condensateurs fixes,
- Les équipements à régulation automatique ou batteries automatiques qui permettent d'ajuster en permanence la compensation aux besoins de l'installation.
- Lorsque la puissance à installer est supérieure à 800 (kvar) avec une charge stable et continue il peut être plus économique de choisir des batteries de condensation haute tension à installer sur le réseau. (Rappel : $Q = U^2 C \omega$ d'où pour une même valeur de « Q », on a réduction de la capacité et coût moins élevé du condensateur).

4.2 Principe et intérêt de la compensation automatique

Installées en tête de l'ensemble de la distribution BT ou d'un secteur important, les batteries de condensateurs sont divisées en gradins. La valeur du $\cos \varphi$ est détectée par un relais var-métrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \varphi$ désiré. Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs.

La compensation automatique permet l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge et évite, ainsi, le renvoi d'énergie réactive sur le réseau et les surtensions dangereuses pour les circuits d'éclairage lors des marches à faible charge de l'installation.

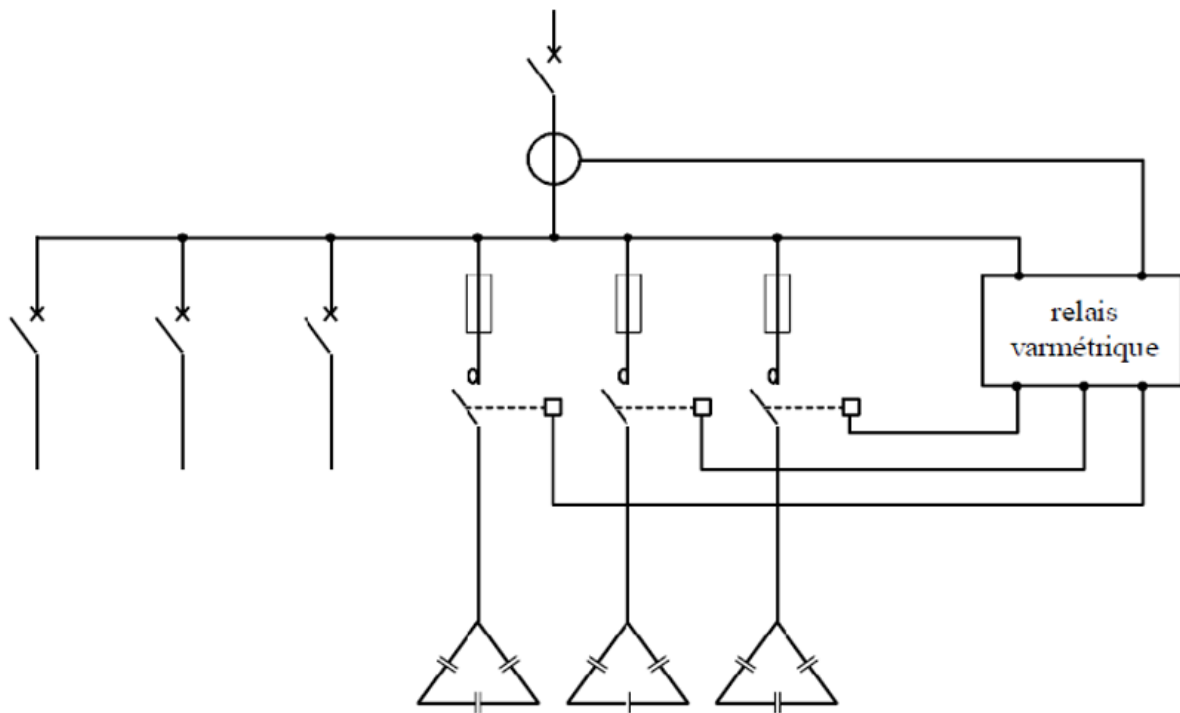


Figure 19.1 : Principe de la compensation automatique d'une installation

4.3 Modes de compensation

4.3.1 Compensation globale

La batterie de condensateurs est raccordée en tête de l'installation et reste en service de façon permanente. Ce mode de compensation convient lorsque la charge est stable et continue.

Intérêts

- Ajuste le besoin réel de l'installation kW à la souscription de la puissance apparente (S en kVA).
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

Remarque

- Le courant réactif (I_r) est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet joule dans les câbles ne sont pas diminuées (kWh).
- Le facteur de puissance est variable suivant le nombre de machines en service.

4.3.2 Compensation partielle

La batterie de condensateurs est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive par atelier ou par groupe de récepteur. Ce mode de compensation convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

Intérêts

- Optimise une partie du réseau, le courant réactif (I_r) n'est pas véhiculé entre les deux niveaux 1 & 2.
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

Remarque

- Le courant réactif (I_r) est présent dans l'installation du niveau 2 jusqu'aux récepteurs,
- Les pertes par effet joule dans les câbles ne sont pas diminuées (kWh).
- Le facteur de puissance est variable suivant le nombre de machines en service.

4.3.3 Compensation individuelle

La batterie de condensateurs est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur du type inductif, notamment les moteurs. Elle convient lorsque la puissance de certains récepteurs est très importante par rapport à la puissance totale, elle offre le plus d'avantages.

Intérêts

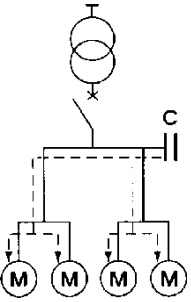
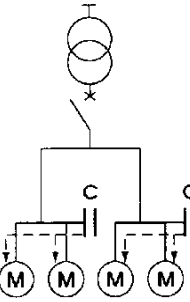
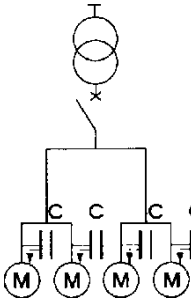
- Optimise tout le réseau électrique, le courant réactif est fourni à l'endroit de sa consommation,
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).
- Le facteur de puissance n'est plus variable suivant le nombre de machines en service.

Remarque

- Le courant réactif n'est plus présent dans les câbles de l'installation,

- Les pertes par effet joule dans les câbles sont totalement supprimées (kWh)
- Le nombre de batteries de condensateurs est dans ce cas plus important, il en résulte un investissement généralement plus élevé.

Tableaux 19.1: Différents modes de compensation

Globale (centralisée)	Partielle (par groupe)	Individuelle (locale)
		

4.4 Autres types de compensation

4.4.1 La compensation série

Les condensateurs sont placés en séries sur une ligne dont ils compensent la réactance. La compensation série est employée sur certaines lignes à haute tension à la fois très longues et très chargées. Elle est justifiée par des considérations telles que la stabilité.

Ce type de compensation est assez exceptionnel.

Mentionnons que les principaux problèmes résident dans la protection contre les surintensités qui traversent les batteries lorsqu'un court-circuit se produit sur la ligne où elles sont installées.

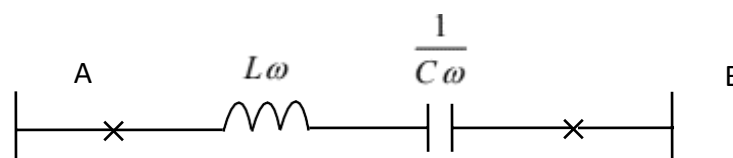


Figure 19.2 : Compensation Série

4.4.2 Les inductances

Les inductances sont souvent utilisées pour absorber la puissance réactive produite par de longue ligne dans le réseau de transport. Elles peuvent être raccordées en direct ou via le tertiaire de transformateurs. Leur puissance peut aller de 50 à 400 MVar.

4.4.3 Compensateurs synchrones

Cette solution utilise des générateurs du réseau pour produire ou absorber du réactif. En effet, une machine synchrone peut être commandée de manière à préserver la tension via la puissance réactive qu'elle produit. Le principe du contrôle est le même que celui des machines soumises au réglage primaire avec un régulateur en charge du maintien de la tension. Une sous excitation permet à la machine synchrone d'absorber de la puissance réactive et donc de diminuer la tension ; inversement, une sur excitation lui permet d'en fournir et donc d'augmenter la tension.

Chapitre V

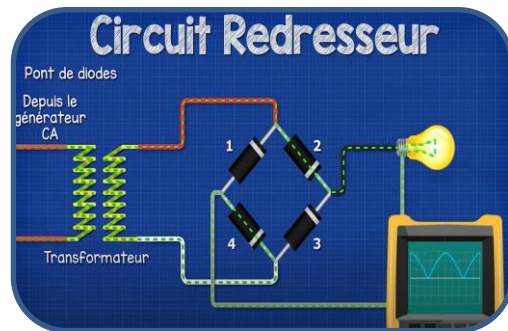
CONVERSION DE L'ENERGIE

5. Les redresseurs

Vidéos learning

Les redresseurs

V10



Lien hypertexte

[WWW](#)

La fonction « redresseur » consiste à transformer une tension ou un courant alternatif en son équivalent continu, c'est donc un convertisseur AC/DC.

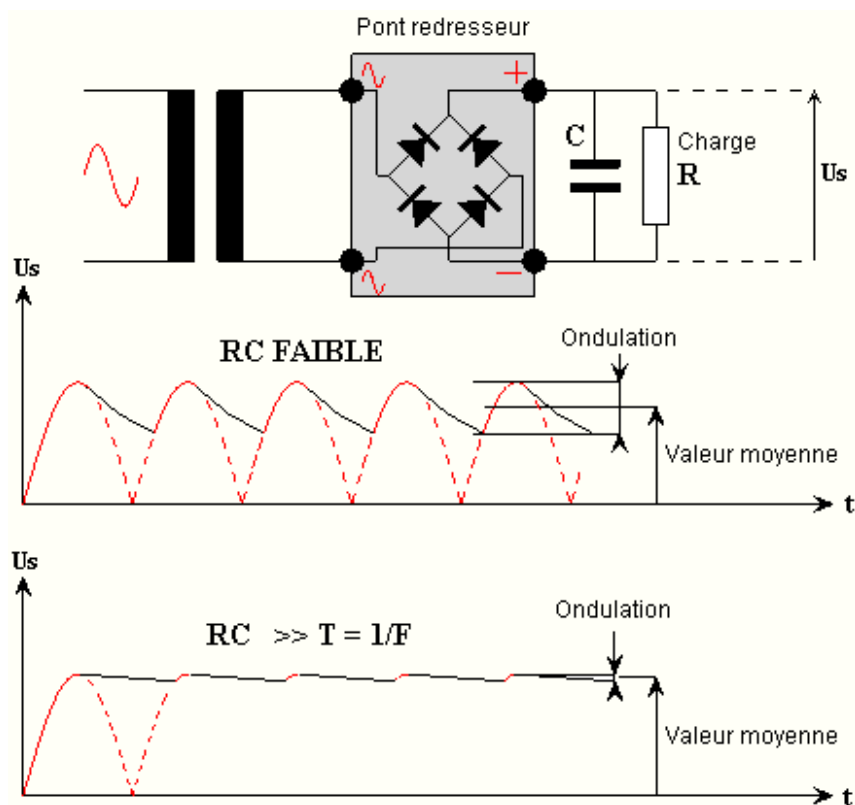


Figure 20.1 : Schéma de fonctionnement d'un redresseur

5.1 Domaines d'application

La conversion alternative / continue est utilisée dans une très large plage de puissance :

- De quelques mW (milliwatts) pour les alimentations de petits ensembles électroniques (chargeur de téléphone portable),
- A plusieurs GW (gigawatts) pour l'interconnexion de réseaux de distribution d'énergie électrique de phases différentes.

Quelques applications usuelles :

- Alimentation des structures électroniques sous tension continue de bas niveau (3,3 à 15V) à partir du réseau 50Hz en HIFI, télévision, électroménager,
- Recharge des accumulateurs d'appareils nomades (téléphone, ordinateur portable...),
- Entraînement de machines à courant continu à vitesse variable,
- Electrolyse en industrie électrochimique.

6. Les hacheurs

Les hacheurs opèrent une conversion DC/DC. Leur principal domaine d'application est l'alimentation des machines à courant continu (MCC), en vue d'obtenir une vitesse variable.

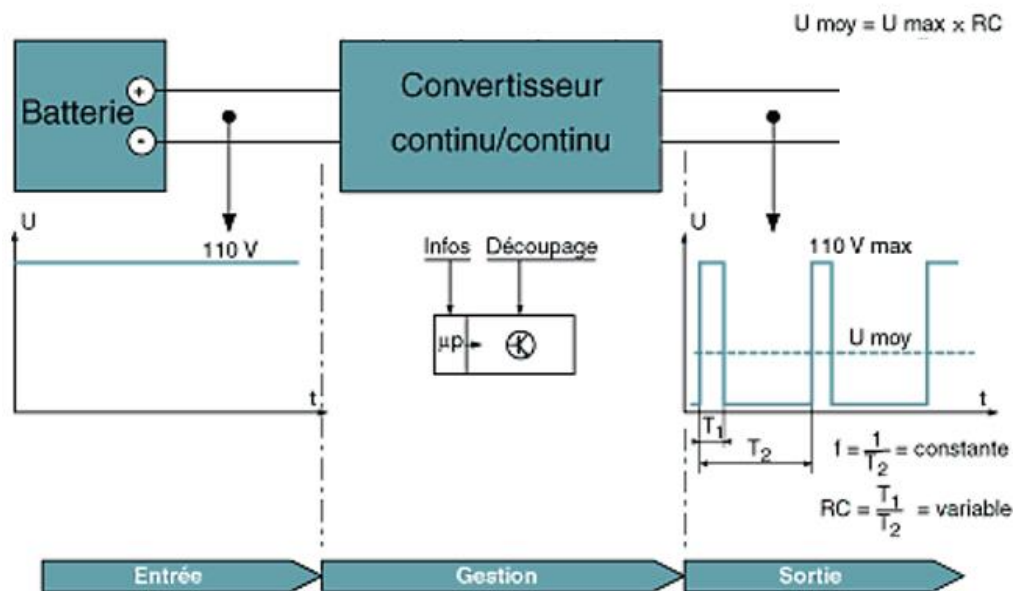


Figure 21.1 : Schéma de fonctionnement d'un hacheur

6.1 Domaines d'application

On distingue deux familles de convertisseurs continu / continu.

- Les hacheurs à liaison continue (continuité électrique entre entrée et sortie) : Charge rapide et contrôlée de batteries d'accumulateurs, et typiquement entraînement de moteurs à courant continu à vitesse variable



Shield Arduino L298

Figure 21.2 : exemple d'hacheur à liaison continue

- Les alimentations à découpage avec isolation galvanique : Les alimentations à découpage se sont fortement développées pour remplacer les alimentations linéaires de poids élevé et faible rendement. Elles sont utilisées désormais dans tous les appareils électroniques « grand public ».



Alimentation à découpage
MW 3 à 12V/ 1.5A max. 100-
240V

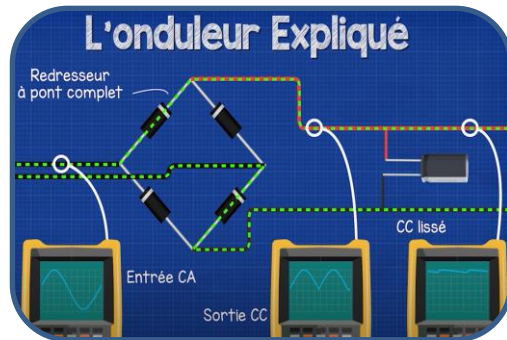
Figure 21.3 : Exemple d'hacheur à découpage

7. Les onduleurs

Vidéos learning

L'onduleur

V11



Lien hypertexte



Un onduleur de tension est un convertisseur DC/AC. Il permet d'obtenir une tension alternative de valeur efficace fixe ou réglable à partir d'une source de tension continue.

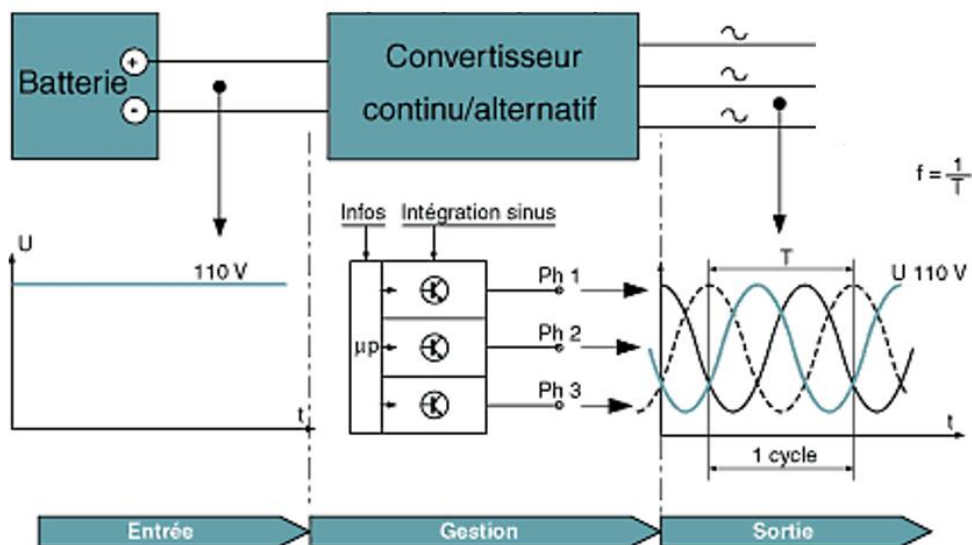


Figure 22.1 : Schéma de fonctionnement d'un onduleur

Il existe trois types d'onduleurs :

7.1 Onduleur autonome

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner. (Par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz) ;



Figure 22.2 : Onduleur autonome

7.2 Onduleurs non autonomes

Un onduleur non autonome est un montage redresseur qui permet un fonctionnement en onduleur, celui-ci fonctionne à la fréquence du réseau.



Figure 22.3 : Onduleur non autonome

7.3 Onduleurs hybrides

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire).



Figure 22.4 : Onduleur hybride

7.4 Domaines d'application

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus, il a de multiples applications :

- les alimentations de secours ;
- le raccord des panneaux solaires au réseau électrique ;
- les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique comme
 - les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical,
 - l'alimentation des lampes utilisées pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides

8. Les gradateurs

Un gradateur est un convertisseur AC/AC. Il permet de contrôler la valeur moyenne d'un signal sinusoïdal AC.

Il existe deux types de gradateurs :

- Gradateur à angle de phase
- Gradateurs à train d'ondes

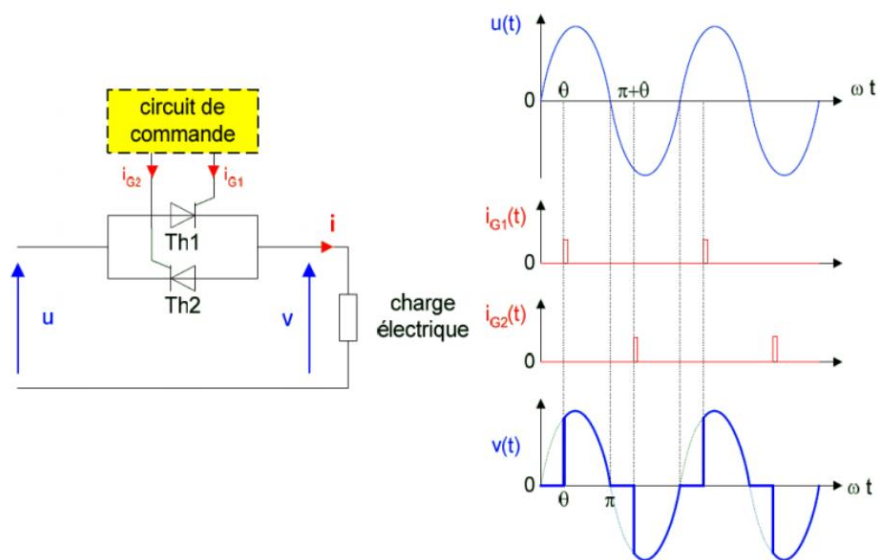


Figure 23.1 : Schéma de fonctionnement d'un gradateur à angle de phase

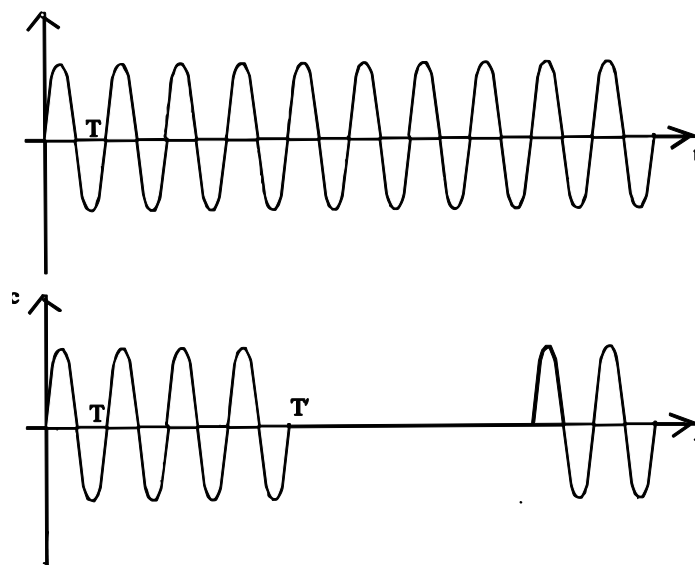


Figure 23.2 : Signal d'un gradateur à train d'ondes

8.1 Domaines d'application

8.1.1 Gradateur à angle de phase

- Le chauffage électrique...
- L'éclairage...
- La variation de vitesse des moteurs alternatifs de faibles puissance (perceuses, aspirateurs de quelques centaines de Watts) ...
- En règle générale, ils sont utilisés sur des systèmes ne présentant pas ou peu d'inertie thermique ou mécanique...

8.1.2 Gradateur à train d'ondes

- Régulation du chauffage électrique
- Utilisés sur des systèmes présentant une inertie thermique importante (Ex. Four industriel)

Bibliographie

- IEA, IEA. World Energy Statistics and Balances, IEA. 2019.
- Sabonnadière, J. C., & Hadjsaïd, N. (2008). Lignes et réseaux électriques: Fonctionnement dans le cadre de la libéralisation des marchés. Hermes science publ.(Lavoisier).
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. (2012). Power system analysis & design, SI version. Cengage Learning.
- Recherches sur sites internet