



المسيلة في : 24 أفريل 2024

رقم: 2024/GE/.....128

شهادة إدارية

بخصوص مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ

بن قسمية هاني

بناءً على محضر اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية رقم 2024/107 المنعقد بتاريخ 04 مارس 2024 والمتضمن تعيين الخبراء: الأستاذ براج فؤاد أستاذ بجامعة المسيلة، الأستاذ رواجي رياض أستاذ محاضر – أ- بجامعة المسيلة والأستاذ راجي بوعلاقة أستاذ محاضر "أ" بجامعة بسكرة وذلك لتقييم مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ بن قسمية هاني أستاذ محاضر "أ" بقسم الهندسة الكهربائية لجامعة المسيلة تحت عنوان " **Production centralisée et décentralisée** " وبعد إطلاع رئيس اللجنة العلمية ورئيس القسم على التقارير الواردة و التي كانت كلها ايجابية، وعليه فإن اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذه سندا في تدريس طلبة السنة الأولى ماستر شبكات كهربائية، شعبة كهروتقني ميدان علوم و تكنولوجيا و أن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس القسم
أ.د. زغلاش سمير

رئيس اللجنة العلمية
أ.د. بوقرة عبد الرحمان



ملاحظة: سلمت هذه الشهادة للمعني(ة) لاستعمالها في حدود ما يسمح به القانون.

Université Mohamed Boudiaf –M'sila
Faculté de Technologie
Département : Génie Electrique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
كلية التكنولوجيا
قسم : الهندسة الكهربائية

Niveau : 1^{er} Année Master Académique

Intitulé du Master : Réseaux Electriques

Semestre : 2

Intitulé de l'UE Fondamentale

Code : UEF 1.2.1

Intitulé de la matière : Production centralisée et décentralisée

Crédits : 2

Coefficients : 1

Polycopié

Cours intitulé :

Production centralisée et décentralisée

Préparé par :

Hani BENGUESMIA

Maître de Conférences classe A

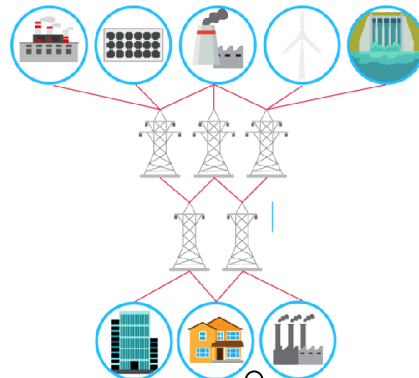
Département de Génie électrique




Département de Génie Electrique
Filière: Electrotechnique
Spécialité: Réseaux Electriques
Email: hani.benguesmia@univ-m'sila.dz

**Production centralisée et
décentralisée**

Dr. Hani BENGUESMIA



Année académique : 2023-2024

A decorative scroll graphic with a white background and a black border, featuring three grey circular accents at the top corners. The text is centered within the scroll.

**Offre de Formation L.M.D
Master Académique
Programme National
2016-2018**

**Domaine : Science et Technologie
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques**

Master : Réseaux Electriques

Semestre : 2

UE Fondamentale Code : UEF 1.2.1

Matière : Production centralisée et décentralisée

VHS: 22h30 (Cours: 1h30)

Crédits : 2

Coef icient : 1

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à présenter l'évolution fondamentale des systèmes énergétiques induite par la transition énergétique qui est une décentralisation de ces systèmes.

Connaissances préalables recommandées

Principe de la production de l'énergie électricité

Contenu de la matière

Chapitre I: Techniques générales de production de l'électricité (3 semaines)

Sources d'énergie électrique, centrales électriques classiques (thermique et nucléaire), Service systèmes, gestion et rendement.

Chapitre II : Production électrique décentralisée (PD) (4 semaines)

Les technologies de la production décentralisée (Les sources conventionnelles, les sources nouvelles et renouvelables (géothermie, petite hydraulique, biomasse, micro cogénération, solaire et éolien)), avantages.

Chapitre III: Raccordement de la PD au réseau électrique (4 semaines)

Conditions de raccordement de la PD dans le système électrique, aspects règlementaires et organisationnels du développement de la PD, aspects techniques du raccordement sur les réseaux HTA, interactions entre PD et réseau électrique et les normes en vigueur.

Chapitre IV : Infrastructures critiques du système électrique (4 semaines)

Gestion en présence de fort taux d'insertion des PD, les surcoûts techniques liés à l'intermittence, méthodologie de gestion des situations critiques, intérêt du stockage de l'énergie, ilotage.

Chapitre V: Autoproduction dans les énergies renouvelables (μ -réseaux)(4 semaines)

Concept et fonctionnement des micro-réseaux (micro-turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petite hydraulique), exploitation et contrôle des micro-réseaux, micro-réseaux hybride avec génération et accumulation distribuée, monitoring et enregistrement de données.

Mode d'évaluation :

Examen: 100%.

Références bibliographiques :

1. N. Hadjsaïd, « Distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée », édition Hermès, 2010.
2. R. Caire, « Production Décentralisée et réseaux de distribution », Editions universitaires européennes EUE, 2010.
3. B. Multon, "Production d'Énergie Électrique par Sources Renouvelables", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, D4, 2003.
4. A. Maczulak, 'Renewable Energy: Sources and Methods', Green technology, 2010.
5. N. Hatziargyriou, «Microgrids: Architectures and Control», Wiley-IEEE Press, 2014.



Avant-propos

Avant-propos

Ce polycopié a été conçu dans le but d'être considéré comme étant un support pédagogique. Ce cours "**Production centralisée et décentralisée**", s'adresse aux étudiants en Master professionnelle, filière électrotechnique, en particulier les étudiants en Master 1 option Réseaux Electriques.

Ce polycopié vise présenter l'évolution fondamentale des systèmes énergétiques induite par la transition énergétique qui est une décentralisation de ces systèmes. Ce document comporte cinq parties essentielles:

- ✚ **Chapitre I** : Techniques générales de production de l'électricité
- ✚ **Chapitre II** : Production électrique décentralisée (PD)
- ✚ **Chapitre III** : Raccordement de la PD au réseau électrique
- ✚ **Chapitre IV** : Infrastructures critiques du système électrique
- ✚ **Chapitre V** : Autoproduction dans les énergies renouvelables (μ -réseaux)

Ce support est constitué d'un plan de cours qui a pour but de donner les directives pédagogiques qui facilitent la compréhension et l'assimilation des leçons de "**Production centralisée et décentralisée**".

Enfin, j'espère bien que ce présent polycopié de cours donne intérêt aux lecteurs, et je serais très heureux de recevoir avec reconnaissance leurs remarques, leurs questions, critiques et suggestions.

L'ensemble des parties présentées dans ce document ont été effectuées au sein du Laboratoire de Génie Electrique (LGE) de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Charges Horaires

22h30 (Cours :1h 30mn) par semaine.

Mode d'évaluation

Examen 100%

Pré-requis

Principe de la production de l'énergie électrique.

Public cible

Les étudiants en 1^{er} Année Master en Réseaux Electriques (Filière : Electrotechnique) de l'université de M'sila,

Faculté : Technologie.

Contact : par plateforme moodle, toute question en relation avec le cours doit être postée sur le forum dédié pour que vous puissiez, tous, tirer profit de ma réponse, je m'engage à répondre aux questions postées dans un délai de 48 heures.

Le lien : <https://elearning.univ-msila.dz/moodle/course/view.php?id=7760>

Par mail je m'engage à répondre par mail dans 48 heures qui suivent la réception du message, sauf en cas des imprévus, au hani.benguesmia@univ-msila.dz

Disponibilité: Au dépt. Génie Electrique, Faculté de Technologie.

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à présenter l'évolution fondamentale des systèmes énergétiques induite par la transition énergétique qui est une décentralisation de ces systèmes.

Connaissances préalables recommandées

Principe de la production de l'énergie électrique.



Sommaire

Sommaire

Avant-propos	i
Sommaire	v
Introduction	02
Chapitre I : Techniques générales de production de l'électricité	
I.1. Introduction	04
I.2. Les sources d'énergies	04
I.2.1. Energies fossiles	04
I.2.2. Energies renouvelables	06
I.3. Centrales électriques classiques	09
I.3.1. Centrales thermiques	09
I.3.2. Centrales nucléaires	11
I.3.3. Centrales hydroélectriques	12
I.3.4. Centrales photovoltaïque	13
I.3.5. Centrale d'énergie éolienne	14
I.4. Gestion des systèmes de production électrique	14
I.5. Services système	15
I.5.1. Salle de contrôle-commande	15
I.5.2. Les composants d'une centrale électrique	16
I.6. Rendement énergétique de production l'électricité	19
I.7. Conclusion	19
Chapitre II : Production électrique décentralisée (PD)	
II.1. Introduction	21
II.2. Définition	21
II.3. Les technologies de la production décentralisée	21
II.3.1. Les sources conventionnelles	21
II.3.2. Les sources nouvelles et renouvelables	23
II. 3.3. La cogénération	31
II.4. Les avantages de la production décentralisée	32
II.4.1. Efficacité	32
II.4.2. Efficience	33
II.4.3. Rapidité	33
II.4.4. Flexibilité	33
II.4.5. Localisation	33

II.4.6. Fiabilité	33
II.5. Conclusion	34
Chapitre III : Raccordement de la PD au réseau électrique	
III.1. Introduction	36
III.2. Qu'est-ce que la production décentralisée (PD) ?	36
III.3. Le raccordement de la PD sur les réseaux de distribution	36
III.3.1. Étude de raccordement d'une installation	37
III.3.2. Aspects réglementaires et organisationnels du développement de la production électrique décentralisée	38
III.4. Impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution	39
III.4.1. Impacts sur le sens de transit de puissance	40
III.4.2. Impacts sur la stabilité du système	40
III.4.3. Impacts sur la qualité de service	40
III.4.4. Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système	41
III.4.5. Impacts sur la continuité de service	41
III.4.6. Impacts sur le plan de protection	41
III.5. Normes et textes réglementaires	41
III.5.1. Récapitulatifs des normes ont respecté pour une installation solaire photovoltaïque	42
III.5.2. Exemple sur La norme : UTEC 15-712	43
III.5.3. Exemple d'installation normalisée	44
III.6. Conclusion	45
Chapitre IV : Infrastructures critiques du système électrique	
IV1. Introduction	47
IV.2. Gestion en présence de fort taux d'insertion des productions électrique décentralisée PD	47
IV.2.1. Prévision de la production décentralisée	48
IV.2.2. Intégration des ressources distribuées	48
IV.2.3. Flexibilité et réactivité du réseau	48
IV.2.4. Contrôle et gestion avancés du réseau	48
IV.2.5. Tarification et incitations	48
IV.2.6. Réglementation et politiques publiques	49
IV.3. Les surcoûts techniques liés l'intermittence	49
IV.3.1. Renforcement du réseau électrique	49

IV.3.2. Stockage d'énergie	49
IV.3.3. Mécanismes de flexibilité	50
IV.3.4. Systèmes de contrôles avancés	40
IV.3.5. Pertes d'énergie et inefficacités de fonctionnement	40
IV.4. Méthodologie de gestion des situations critiques	40
IV.4.1. Identification des risques potentiels	51
IV.4.2. Évaluation de la criticité des scénarios	51
IV.4.3. Développement de plans d'intervention d'urgence	51
IV.4.4. Mise en œuvre de mesures préventives	51
IV.4.5. Déploiement de systèmes de surveillance et de contrôle	51
IV.4.6. Formation et exercices d'urgence	52
IV.4.7. Analyse post-incident et amélioration continue	52
IV.5. Intérêt du stockage de l'énergie	52
IV.5.1. Gestion des intermittences des sources d'énergie renouvelable	52
IV.5.2. Optimisation de l'utilisation des ressources renouvelables	53
IV.5.3. Réduction des pointes de demande	53
IV.5.4. Amélioration de la stabilité et de la fiabilité du réseau	53
IV.5.5. Flexibilité et adaptation aux besoins changeants	53
IV.6. Ilotage	54
IV.6.1. Détection de la perturbation	54
IV.6.2. Isolation de la zone	55
IV.6.3. Fourniture d'électricité locale	55
IV.6.4. Surveillance et rétablissement du réseau principal	55
IV.7. Conclusion	55
Chapitre V : Autoproduction dans les énergies renouvelables (μ-réseaux)	
V.1. Introduction	67
V.2. Concept de Micro-réseaux	68
V.3. Composants des micro-réseaux	68
V.3.1. Sources de production	68
V.3.2. Stockage d'énergie	68
V.3.3. Charges locales	68
V.4. Mode de fonctionnement des Micro-réseaux	69
V.5. Technologies de génération	69
V.5.1. Micro-turbines.	70

V.5.2. Les piles à combustible	72
V.5.3. Petits générateurs diesel	72
V.5.4. Les cellules photovoltaïques (PV)	74
V.5.5. Éoliennes	76
V.6. Exploitation et contrôle des micro-réseaux	77
V.6.1. Stratégies d'Exploitation	77
V.6.2. Systèmes de Contrôle	78
V.6.3. Défis de Fonctionnement et de Contrôle	79
V.7. Types de micro-réseaux	80
V.7. 1. Micro-réseaux Connectés au Réseau	80
V.7. 2. Micro-réseaux en Îlots	80
V.7. 3. Micro-réseaux hybrides	80
V.7. 5. Micro-réseaux DC	80
V.7. 6. Micro-réseaux communautaires	81
V.7. 7. Micro-réseaux distants	81
V.8. Micro-réseaux hybrides avec production et accumulation distribuées	81
V.8.1. Intégration des sources d'énergie renouvelables	81
V.7. 4. Micro-réseaux AC	81
V.8.2. Systèmes de stockage d'énergie	81
V.8.3. Avantages des micro-grids hybrides	81
V.9. Surveillance et Enregistrement des Données	82
V.9.1. Importance du suivi des données	82
V.9.2. Systèmes de Surveillance	82
V.10. Applications de micro-réseaux	83
V.10.1. Micro-réseaux communautaires et résidentiels	83
V.10.2. Micro-réseaux d'épicerie	83
V.10.3. Mini-réseaux de soins de santé	83
V.10.4. Mini-réseaux militaires	83
V.10.5. Ports et aéroports de l'Espagne	84
V.10.6. Micro-réseaux utilitaires	84
V.11. Conclusion	84
Conclusion	87
Références bibliographiques	89



Introduction

Introduction

En raison des tendances récentes de croissance démographique ainsi que du renouveau de l'agriculture et de l'industrie à l'échelle mondiale, l'énergie électrique a acquis une importance capitale dans les secteurs de l'économie contemporaine et de la vie quotidienne.

La production d'énergie est un élément essentiel de nos sociétés modernes, alimentant nos maisons, nos industries et nos transports. Deux approches principales émergent dans ce domaine : la production centralisée et la production décentralisée. Chacune de ces méthodes présente ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients.

La production centralisée implique la génération d'énergie à grande échelle dans des installations de production dédiées, telles que les centrales électriques conventionnelles ou les parcs éoliens et solaires de grande taille. Ces installations sont souvent situées à distance des centres de consommation et alimentent un vaste réseau électrique qui distribue l'électricité aux consommateurs finaux. Les technologies utilisées dans la production centralisée sont généralement hautement spécialisées et requièrent d'importants investissements en capital.

D'autre part, la production décentralisée se concentre sur la génération d'énergie à petite échelle, souvent près des lieux de consommation. Les sources d'énergie décentralisée peuvent inclure des panneaux solaires sur les toits des maisons, des éoliennes de petite taille, des turbines hydroélectriques locales, ainsi que des systèmes de cogénération dans les industries et les institutions. Cette approche favorise une plus grande autonomie énergétique pour les utilisateurs finaux et peut réduire les pertes associées au transport de l'énergie sur de longues distances.

Les principaux concepts abordés incluent les techniques générales de production de l'électricité, Production électrique décentralisée (PD), Raccordement de la PD au réseau électrique, Infrastructures critiques du système électrique, ainsi que l'autoproduction dans les énergies renouvelables (μ -réseaux). Les étudiants auront l'occasion de mieux comprendre les défis et les opportunités liés à la production centralisée et décentralisée.

Ce document est constitué dans le but de donner les directives pédagogiques qui facilitent la compréhension et l'assimilation des leçons de "**production centralisée et décentralisée**".



**Chapitre I : Techniques
générales de production de
l'électricité**

I.1. Introduction

L'énergie est un élément utile du développement et de l'évolution des sociétés humaines.

L'électricité est parmi les genres d'énergies la plus largement utilisée dans pratiquement tous les secteurs de l'économie mondiale. Au fil des temps, elle a aussi permis à l'homme d'améliorer ses conditions de vie si bien qu'elle est devenue vitale et indispensable.

L'électricité est produite dans des centrales qui proviennent de la transformation de l'énergie: mécanique, hydraulique, thermique, nucléaire, éolienne, solaire...etc., par l'exploitation de plusieurs sources d'énergie. En utilisant des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel ou charbon) ou qui font appel à l'énergie nucléaire ou à l'énergie hydraulique.

Les autres sources d'énergie renouvelables comme le vent, l'énergie solaire, l'énergie géothermique ou la biomasse ne représentent qu'une faible proportion de la production mondiale d'électricité.

En général les centrales électrique sont situé dans des régions éloigné des centres de consommation. A la sortie de ces centrales, le courant électrique est transmis par des réseaux interconnectés à des systèmes de distribution locaux et, à partir de ceux-ci, aux consommateurs que ce soit résidentielles ou industrielles.

De plus, les besoins augmentent chaque année à un rythme exponentiel et la production d'électricité à grande échelle est ainsi devenue indispensable. Cela explique aussi la construction de plusieurs centrales électriques.

I.2. Les sources d'énergies

Les sources d'énergie sont soit des matières premières ou des phénomènes naturels servis pour produire de l'énergie.

On distingue deux types d'énergies : Les énergies fossiles et les énergies renouvelables.

I.2.1. Energies fossiles

Énergies fossiles sont présentes naturellement dans des réservoirs sous terrains. Le charbon, le pétrole et le gaz naturel constitués à partir de matières organiques proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enterrés sous la terre durant des millions d'années. Elles servent de carburants, de combustibles et en plus utilisées pour produire de l'électricité.

Elles sont actuellement la source d'énergie la plus utilisée dans le monde (80 %). Elles sont souvent toujours considéré comme des sources polluants, mais l'exploitation internationale du pétrole et du charbon ne cesse pas de se stoppe.

Les gisements de gaz et de pétrole se situent surtout sous les mers et les océans. Pour les récupérer, il faut pratiquer le forage. Quant au charbon, il se trouve en sous-sol et nécessite de creuser des mines pour l'extraire. Ces gisements diminuent quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former et sont donc des sources d'énergies non renouvelable.

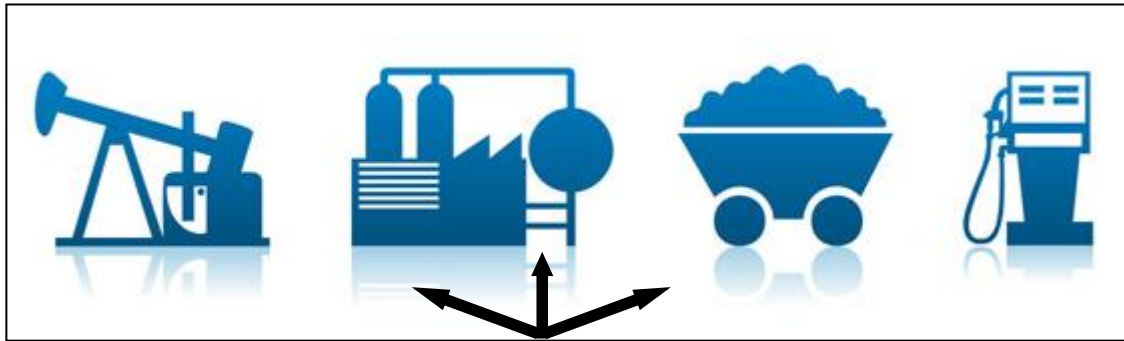


Figure I.1. Les énergies fossiles.

+ Le pétrole

Le pétrole est une huile minérale d'origine naturelle composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures. Le raffinage permet de séparer ses divers constituants et d'obtenir, après purification, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie. Parmi les dérivés du pétrole on trouve l'essence, le gazole et le kérosène.

+ Le charbon

Le charbon est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se sont transformées en charbon. Quand l'homme a découvert le charbon il l'a utilisé pour chauffer les maisons ou faire tourner les machines des usines ou bien faire fonctionner les trains. Aujourd'hui on s'en sert encore pour produire de l'électricité, mais lorsqu'il brûle il émet beaucoup de dioxyde de carbone : CO₂. Cette émission de CO₂ est très polluante et accélère le réchauffement climatique. Le charbon est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

+ Le gaz naturel

L'origine du gaz naturel provient des organismes vivants microscopiques qui ont été enfouis sous-solde la terre pendant des millions d'années et sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air. Les poches de gaz naturel se trouvent entre 3000 et 4000 mètres sous la surface de la Terre. C'est un très bon combustible qu'on utilise par exemple pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons et produire du

chauffage. Le gaz naturel est le moins polluant des combustibles fossiles, car sa combustion émet moins de particules et produit moins de CO₂.

Ces substances sont des hydrocarbures : elles sont composées d'hydrogène et de carbone ce qui font d'elles des substances à haut pouvoir énergétique. C'est leur combustion qui va permettre la production d'électricité dans des centrales thermiques.

☀ Energie nucléaire

L'énergie nucléaire provient également d'une matière première et produit de l'électricité à partir d'un combustible fissile qui est l'uranium. Cependant on la considère comme une alternative aux autres énergies fossiles car elle n'émet pas de CO₂ et offre une certaine indépendance énergétique même si elle cause des problèmes de sécurité et de stockage des déchets radioactifs.

I.2.2. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ne sont pas des énergies fossiles. Appelées aussi énergies propres, non polluantes et inépuisables. Elles proviennent des phénomènes naturels (le soleil, le vent, la chaleur du sous-sol, l'eau (les chutes d'eau, les marées), leur exploitation est en plein essor : elles ne permettent pas encore de remplacer les autres sources d'énergie mais offrent la possibilité de réduire d'une manière significative l'utilisation des combustibles fossiles.

Cinq grandes familles d'énergies renouvelables existent : l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire (solaire photovoltaïque, la géothermie solaire thermique), et la biomasse.

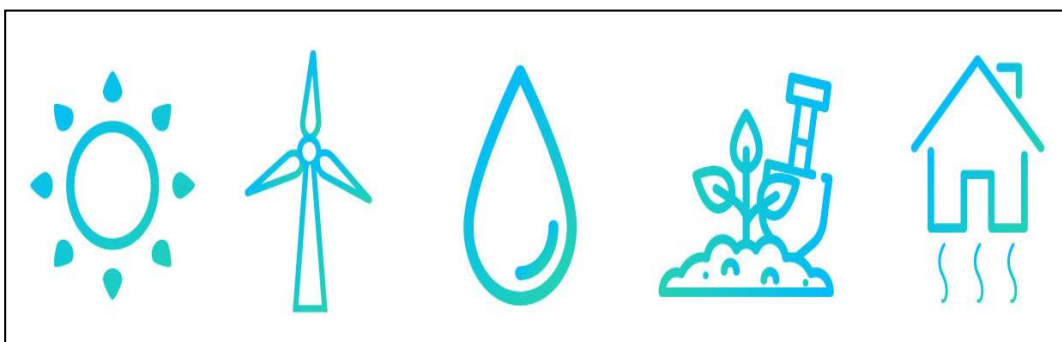


Figure I.2. Les cinq énergies renouvelables.

☀ Hydroélectricité

L'énergie hydraulique est une énergie cinétique. Cela indique qu'elle est fournie par le mouvement de l'eau, quelle que soit sa forme : chute d'eau, cours d'eau, courant marin, marée, vague...

Cette énergie hydraulique est utilisée depuis longtemps. De à la force de l'eau, l'énergie hydraulique permet par exemple de faire fonctionner les moulins à eau qui produisaient de l'énergie mécanique pour entre autres moudre les grains et fabriquer du papier.

Elle est la principale source d'énergie renouvelable pour produire de l'électricité. Celle-ci peut être obtenue de différentes façons :

- En exploitant l'énergie des vagues,
- En construisant une centrale hydroélectrique,
- En installant une hydrolienne,
- En créant une centrale marémotrice.

Energie éolienne

Cette énergie renouvelable est obtenue grâce au vent dont la force est convertie en électricité au moyen des éoliennes. Son utilisation est loin d'être récente : le fonctionnaient des moulins à vent, qui datent de plusieurs siècles.

Il existe deux types d'éoliennes, dont le rendement énergétique et la puissance fournie dépendent de la vitesse du vent : les horizontales et les verticales.

Les éoliennes sont limitées au rendement théorique maximal de 59,3 %, ce qui est connu sous le nom de limite de Belz.

Cette loi est dérivée d'une analyse de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans l'écoulement de fluide autour d'un actionneur d'éolienne. Le rendement d'une éolienne fait référence à la quantité d'énergie qu'elle peut obtenir du vent soufflant dans les rotors.

Cette énergie verte est promise à un avenir ambitieux vu de son caractère inépuisable. Cependant elle reste à l'heure actuelle assez variable puisqu'elle dépend de la force des vents et pose des problèmes de surface au sol et de nuisances sonores et visuelles.

Energie solaire

L'énergie lumineuse du soleil est captée grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique, comme pour les chauffe-eaux solaires).

L'installation de panneaux photovoltaïques peut permettre de fournir au plus de la moitié de leurs besoins en chauffage (eau et habitation).

Energie géothermique

L'énergie produite de la géothermie provient de la chaleur contenue dans les sous-sols de la Terre. Ceux-ci contiennent de l'eau à une température très élevée et plus elle est située en profondeur, plus elle est chaude. Elle se rapproche du centre de la Terre dont le noyau contient une énergie considérable.

La température varie donc en fonction de l'emplacement de l'eau. Par conséquent, celle-ci peut être utilisée à des fins différentes.

Dans les zones peu profondes, dites à basse température, la géothermie permettra surtout de chauffer les habitations. Par contre, les zones à haute température, situées dans les régions volcaniques, sont idéales pour obtenir de l'électricité.

Celle-ci peut être produite selon deux méthodes : par la géothermie naturelle à haute énergie et par le système géothermique stimulé.

Géothermie naturelle à haute énergie : dans les endroits volcaniques, la chaleur du centre de la Terre remonte et réchauffe d'immenses cavités d'eau stockées dans le sous-sol. L'eau y est alors disponible sous forme liquide ou sous forme de vapeur. Cette vapeur va actionner une turbine qui entraînera un alternateur. Celui-ci produira alors de l'électricité.

Système géothermique stimulé : cette technologie n'est pas encore terminée mais son but est de produire de l'électricité à partir de roches sèches. Elle est appelée système géothermique stimulé car l'eau chaude n'est pas immédiatement extraite du sous-sol, mais y est introduite pour y être réchauffée.

Biomasse

L'énergie de la biomasse est produite par combustion directe de matière biologique comme le bois ou par conversion en biocarburants.

Elle rassemble des matières organiques ou végétales qui peuvent être transformées en énergie. Elles peuvent provenir de forêts, milieux aquatiques, haies, parcs et jardins, des déchets organiques ou des effluents d'élevage (fumiers et lisiers).

Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable tant qu'il n'y a pas de surexploitation des ressources. La fertilité du sol ainsi que la biodiversité doivent dans ce cas être préservées

L'utilisation des ordures ménagères et agricoles font de la biomasse une énergie moins verte que celle constituée par le soleil ou le vent. Elle peut même devenir polluante lorsque la matière organique dégage du CO₂ ou des fumées lors de sa combustion.

Trois technologies existent pour convertir la biomasse en énergie : la combustion, la méthanisation (biogaz) et la transformation chimique (agro carburants).

Energie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil. Elle est utilisée soit sous forme d'énergie potentielle - l'élévation du niveau de la mer, soit sous forme d'énergie cinétique - les courants de marée.

I.3. Centrales électriques classiques

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. La production d'électricité y est assurée par la conversion en énergie électrique d'une énergie primaire qui peut être soit mécanique (force du vent, force de l'eau des rivières, des marées...), soit chimique (réactions d'oxydoréduction avec des combustibles, fossiles ou non, tels que la biomasse), soit nucléaire, soit solaire. Parmi ces centrales :

I.3.1. Centrales thermiques

Les centrales thermiques appartiennent à la catégorie des centrales classiques, la production de l'électricité se fait grâce à l'exploitation des sources d'énergies fossiles. Elles sont classées comme suivant :

- Le combustible utilisé
 - ❖ Centrale à combustible organique (charbon, fuel),
 - ❖ Centrales nucléaires (uranium ou plutonium),
 - ❖ Centrales géothermiques (source d'eau chaude ou vapeur).
- Le transfert d'énergie
 - ❖ Turbine à vapeur,
 - ❖ Turbine à gaz,

Centrale thermique à vapeur

Une centrale thermique à vapeur est une centrale qui convertit l'énergie thermique de la combustion du charbon en énergie électrique. La combustion du charbon produit de la chaleur

dans un brûleurs de la chaudière qui est recouverte des conduits d'eau froide qui se transformera en vapeur, qui sera condensé dans un condenseur pour être à nouveau introduite dans la chaudière, Cette vapeur actionnera la turbine qui fera fonctionner l'alternateur afin d'obtenir de électricité. La distribution du courant vers les lignes à haute tension sera ensuite assurée par un transformateur.

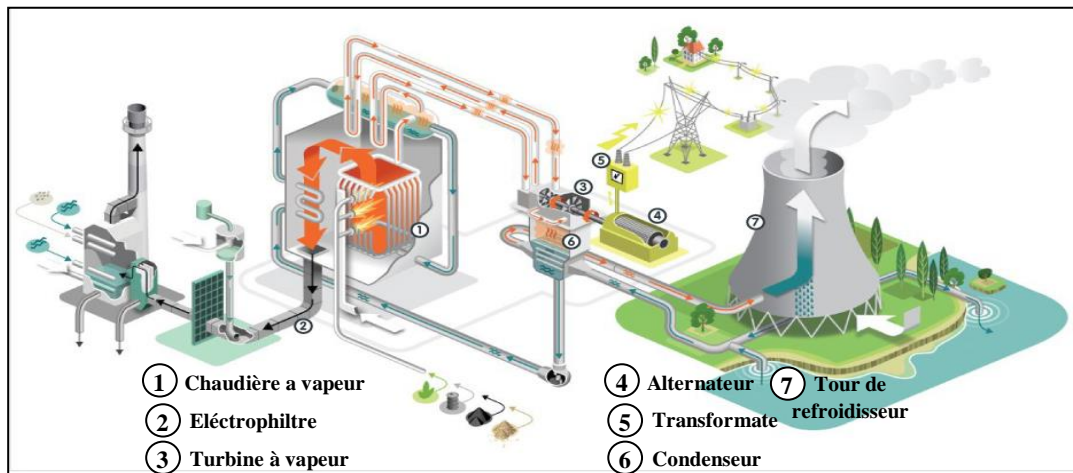


Figure I.3. Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale thermique.

Le rendement globale d'une centrale à vapeur est assez faible (environ 29%), pour deux raison :

- Des pertes énormes de quantité chaleur dans le condenseur,
- Des pertes de chaleur se produisent à divers stades de la centrale.

✚ Centrale thermique à gaz

Une centrale thermique à gaz produit d'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion d'un gaz à fort pouvoir calorifique comme le gaz naturel qui met une turbine, relie a un alternateur, en mouvement.

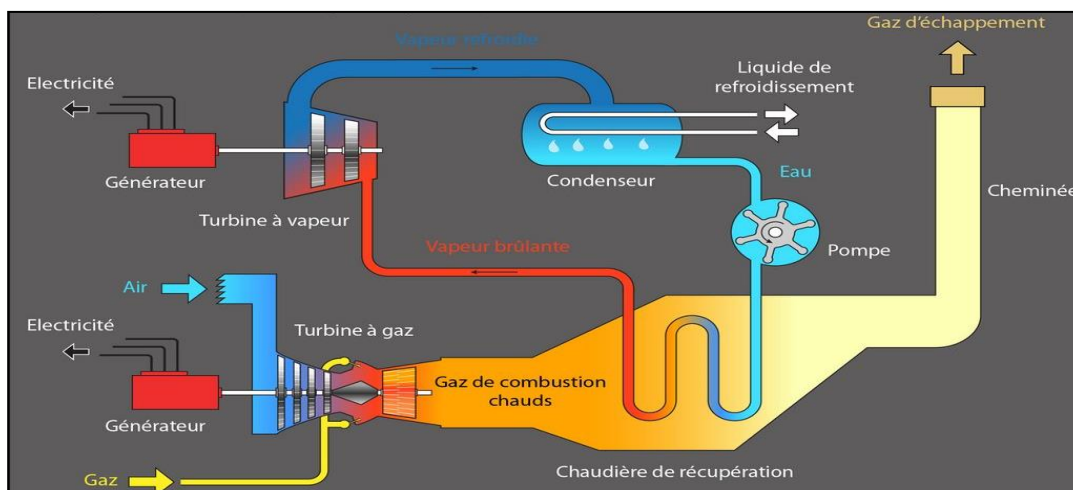


Figure I.4. Schéma de principe d'une centrale thermique à gaz.

☛ Centrale thermique à cycle combiné

Les centrales à cycle combiné sont des grandes centrales thermiques utilisant le gaz naturel comme combustible pour produire de l'électricité sur deux cycles successifs. Le premier cycle est similaire à celui d'une turbine à combustion : 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 turbine à combustion alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine dédiée.

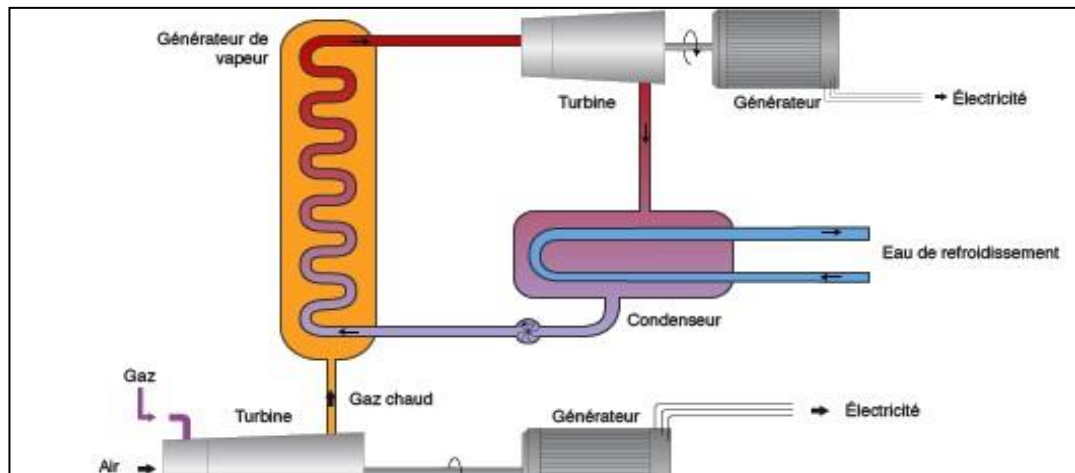


Figure I.5. Schéma de principe d'une centrale à gaz à cycle combiné.

I.3.2. Centrales nucléaires

Une centrale nucléaire est une centrale dans laquelle l'énergie nucléaire est convertit en énergie électrique.

La centrale nucléaire exploite des éléments lourds tels que l'uranium ou le plutonium, une énergie fossile. C'est grâce à la fission d'atomes lourds dans un réacteur nucléaire produit de l'énergie thermique.

La caractéristique importante d'une centrale nucléaire est qu'une énorme quantité d'énergie électrique peut être produite à partir d'une quantité relativement faible de combustible nucléaire par rapport à d'autres types de centrales habituelles.

Le traitement par fission d'atomes consiste à chauffer de l'eau à plus de 300 °C et en la gardant sous pression pour qu'elle ne bouille pas. Un échange de chaleur s'effectue dans un autre circuit et pendant lequel l'eau sera transformée en vapeur. Cette vapeur sera mise sous pression et elle actionnera ensuite la turbine reliée à l'alternateur. Ce dernier produira à la fin de l'électricité. Enfin, la dernière étape consiste à refroidir cette vapeur et à la transformer en eau par un processus de condensation.

La réaction nucléaire a lieu lorsque les atomes se séparent afin d'en créer des plus petits. Ils libèrent ainsi de l'énergie et la chaleur.

Les centrales nucléaires sont divisées en quatre grandes parties :

- ✚ Le bâtiment où est situé le réacteur dans lequel a lieu la fission;
- ✚ La salle des machines, endroit où est produite l'électricité;
- ✚ Les départs de lignes électriques qui acheminent l'électricité;
- ✚ Des tours de refroidissement basées près d'une rivière.

Les centrales nucléaires suscitent souvent des craintes, car la matière radioactive est dangereuse et peut provoquer des brûlures et des maladies. Les installations doivent être néanmoins ultra-sécurisées et elles ne présentent pas de risques pour la population. Les enceintes de confinement des réacteurs sont par exemple renforcées pour que les matières radioactives ne se déversent pas dans la nature en cas d'explosion.

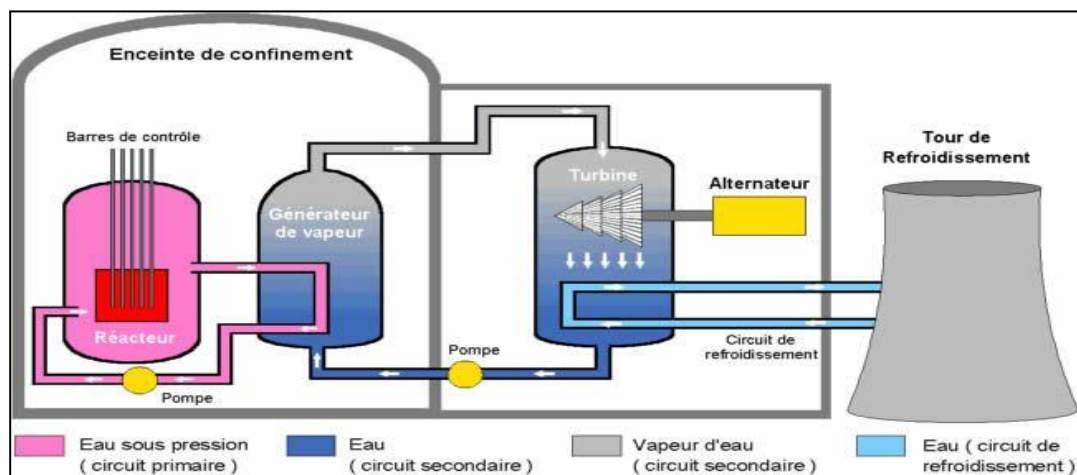


Figure I.6. Schéma de principe d'une centrale nucléaire

I.3.3. Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques utilisent l'eau pour produire de l'électricité. Par conséquent, la centrale doit être installée à proximité d'un cours d'eau ou d'une mer pour profiter des courants et courants marins. Le système d'activation de ses turbines est basé sur l'énergie cinétique générée par le passage des vagues. Ces derniers vont à leur tour activer l'alternateur qui va générer de l'électricité.

Il existe trois types de centrales hydroélectriques : les centrales gravitaires, les stations de transfert par pompage-turbinage et les centrales marémotrices.

Les centrales hydroélectriques participent aussi à réduire les émissions de dioxyde de carbone et de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

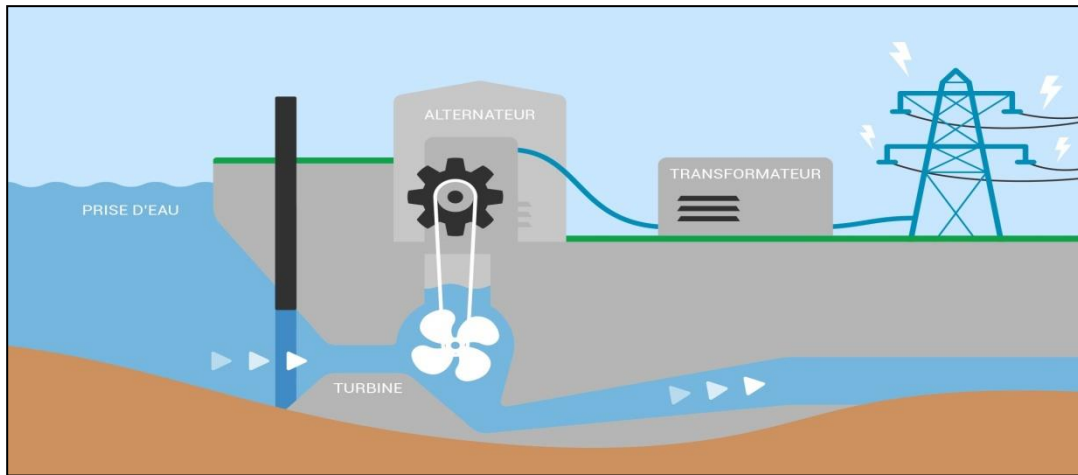


Figure I.7. Schéma de principe d'une centrale hydroélectrique.

I.3.4. Centrales photovoltaïque

Les rayons du soleil sont utilisés comme énergie pour les centrales solaires. La concentration du rayonnement solaire est collectée à l'aide de plusieurs dispositifs appropriés tels que des capteurs solaires et des panneaux photovoltaïques. L'avantage de la technologie solaire est qu'elle peut réduire les prix de l'électricité. Des installations de centrales électriques sont déployées sur plusieurs hectares de terrain pour produire une quantité d'électricité suffisante pour alimenter une région donnée.

Il existe trois types de centrales solaires : les centrales solaires thermiques, les centrales photovoltaïques et les centrales thermodynamiques.

- ✚ Les centrales solaires thermiques se concentrent davantage sur le fonctionnement des chauffe-eau solaires (seuls ou en combinaison) et des systèmes solaires collectifs.
- ✚ Les centrales solaires photovoltaïques utilisent des panneaux solaires pour produire de l'électricité.

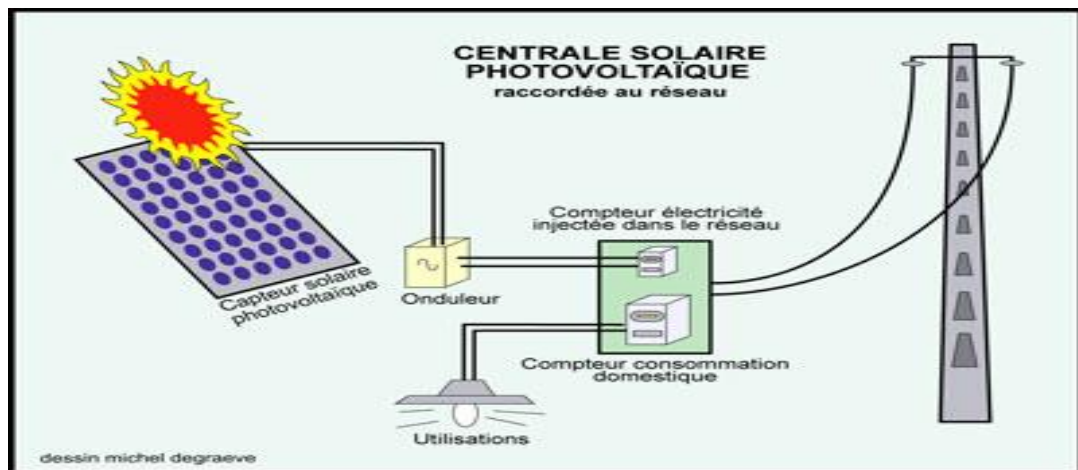


Figure I.8. Centrale photovoltaïque.

- ✚ L'énergie photovoltaïque ne fonctionne que pendant la journée. En hiver, cette production peut être encore réduite, ce qui la rend éligible comme source d'énergie alternative.
- ✚ Les centrales thermodynamiques reposent sur l'utilisation de récepteurs solaires et de turbines à gaz.

I.3.5. Centrale d'énergie éolienne

La centrale éolienne s'appuie sur l'énergie cinétique du vent. Les éoliennes s'associent à de très hauts piliers munis de pales que le vent fait tourner et qui alimentent des turbines reliées à un alternateur. Une centrale électrique exploite des centaines d'éoliennes afin de fournir suffisamment d'électricité renouvelable pour une localité.

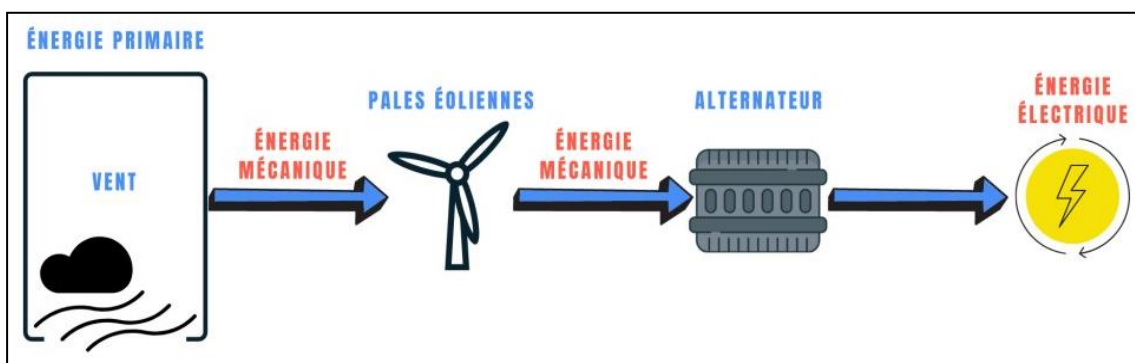


Figure I.9. Centrale éolienne.

I.4. Gestion des systèmes de production électrique

La gestion d'une manière économique des systèmes de production d'énergie électrique permet la réduction du coût du kWh et la réduction des pertes d'énergie électrique dans le réseau de transport. Ce qui contribuera à la réduction de la pollution et l'augmentation de la réserve en puissance électrique disponible.

Les centrales électriques ont pour rôle d'assurer sans interruption un service fiable. Au siège central, leurs organes directeurs sont assistés par des équipes d'ingénieurs et de techniciens et par un personnel administratif.

Au niveau de l'exploitation, on trouve des chefs de centrale, des surveillants, des répartiteurs, des opérateurs et des équipes chargées d'assurer la maintenance des installations et d'effectuer les réparations qui peuvent être entreprises sur place. La maintenance des installations de production comprend deux grandes catégories, la maintenance électrique et la maintenance mécanique, dont les risques peuvent être présents simultanément. Toutes deux peuvent être effectuées en parallèle, bien que les compétences et les précautions qu'elles appellent soient totalement différentes.

I.5. Services système

Les services système sont des services auxiliaires nécessaires au fonctionnement normal du système, qui sont fournis au client par les gestionnaires de réseau et qui déterminent la qualité de l'approvisionnement en électricité, en plus du transport et la distribution d'électricité:

+ Réserve de réglage de la puissance active

La puissance produite dans les centrales doit satisfaire exactement la demande de consommation parce que l'énergie électrique ne peut pas être stockée en grands quantités. Les fournisseurs de la réserve réglage augmentent ou diminuent temporairement la puissance des centrales pour compenser les balancements inattendus d'énergie électrique sur le réseau. Un équilibre doit être assuré à une fréquence de 50Hz.

+ Maintien de la tension

La régulation de l'échange de la puissance réactive permet de ramener la tension au point d'injection à la tension de consigne prescrite.

+ Compensation des pertes du réseau de transport

Les pertes des énergies active et réactive génère dans le réseau de transport doit être compensé par une augmentation de production d'énergie supplémentaire en plus d'énergie livrée aux consommateurs finaux et injecter dans le réseau.

+ Aptitude au démarrage autonome

Il faut mettre en gardes des centrales capables à démarrer de manière autonome assurent le rétablissement du réseau après de grandes perturbations. Des processus spécifiques permettent de remettre le réseau sous tension de manière coordonnée.

+ Coordination du système

Ensemble de prestation mis en disposition du réseau transport pour assure l'exploitation sûre et stable à titre d'exemple on cite la surveillance globale et la conduite du réseau.

+ Mesure d'exploitation

Ce service contient l'installation, l'exploitation et l'entretien des compteurs et appareils de mesure.

I.5.1. Salle de contrôle-commande

Salle de contrôle-commande est une salle regroupant les dispositifs permettant de surveiller les activités d'une installation industrielle et de réguler son fonctionnement.

La conception de salles de contrôle-commande pour les centrales électriques est très important car l'industrie de la production d'énergie comporte des risques alors il est essentiel

de concepts une salle de contrôle-commande pourrait réduire ces accidents. Il y a deux principes qui doivent être intégrés pour la sécurité dans l'aménagement de la salle:

- ✚ Sa structure doit résister à des événements dangereux importants tels que des explosions, des incendies, des réactions exothermiques (chaleur), des expositions à des produits chimiques agressifs, etc.
- ✚ Elle doit être conçue en tenant compte de l'ergonomie afin d'améliorer les processus et d'assurer la sécurité dans la salle de commande et un fonctionnement efficace et ergonomique à l'intérieur de la centrale dans des circonstances normales et d'urgence.

Remarque : Chaque centrale a sa propre salle de contrôle-commande.



Figure I.10. Les salles contrôle-commande

La salle de contrôle-commande des centrales électriques joue un rôle essentiel dans le fonctionnement et les performances du système. Elle est chargée de contrôler, surveiller et analyser tous les paramètres associés à la centrale, d'assurer la sécurité du personnel, des équipements et des processus, et de maintenir un niveau optimal d'efficacité et de fiabilité dans la production d'énergie. Le bon fonctionnement d'une salle de contrôle peut contribuer à maintenir une production d'énergie efficace et à minimiser tout risque potentiel.

I.5.2. Les composants d'une centrale électrique

Il existe deux types de composants :

✚ **Les composants de fonctionnement**

Une centrale électrique (thermique, nucléaire, hydraulique, éolienne) est constituée d'une turbine, d'un alternateur et d'un transformateur de puissance.

- La turbine capte une énergie primaire pour la convertir en énergie mécanique.
- L'alternateur va convertir cette énergie mécanique en énergie électrique.

- Transformateur qui permet d'augmenter la tension électrique (voltage) du courant alternatif produit par l'alternateur. Le transformateur se compose de deux bobines, une appelée primaire où le courant électrique entre à bas voltage et une autre, appelée secondaire, où est produit le courant à très haut voltage qui est acheminé vers les lignes de transmission. L'électricité à plus haut voltage est plus facile à transporter et subit moins de pertes lors de sa transmission sur de longues distances. Il existe aussi des transformateurs abaisseurs qui ont pour fonction de réduire la tension électrique qui provient soit du réseau de transport ou de distribution. Pour ce type de transformateur la bobine primaire reçoit le courant électrique à haut voltage et la bobine secondaire le réduit à un bas voltage.

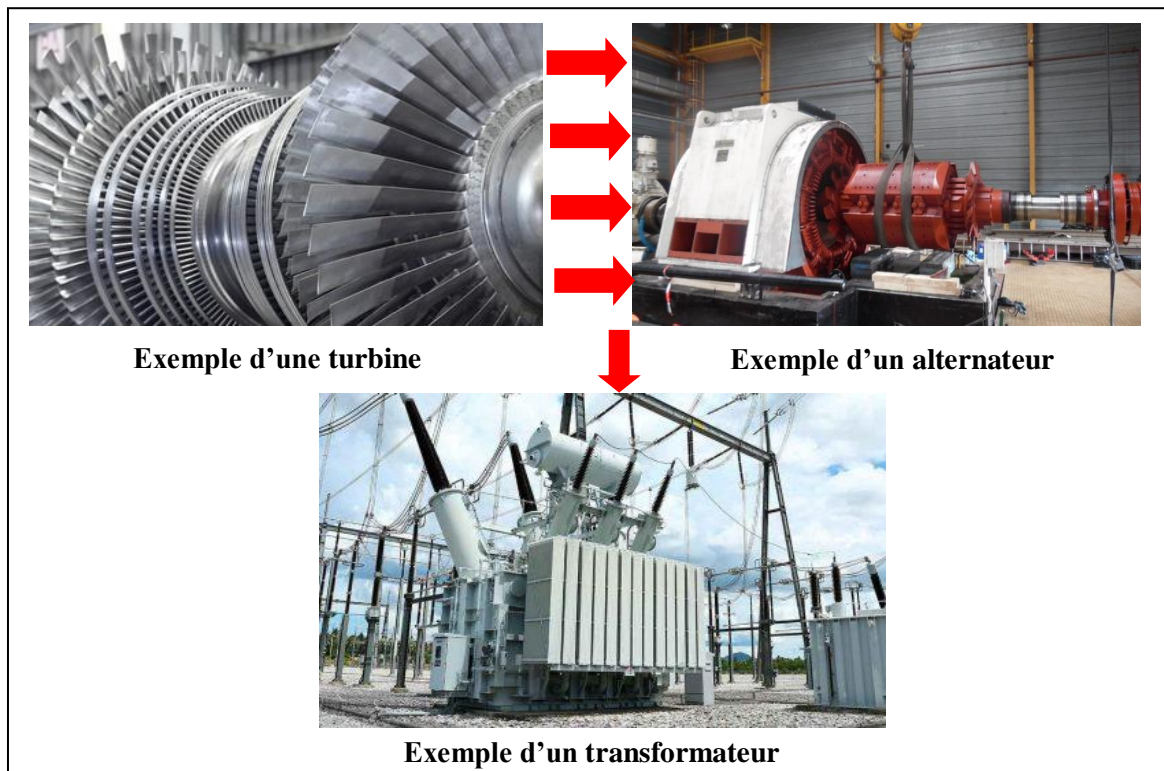


Figure I.11. Les composants de fonctionnement d'une centrale électrique.

+ Les composants de surveillance

- Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège). De par ses caractéristiques, il est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

La tension assignée est « la tension maximale du système pour laquelle le matériel est conçu », selon la définition donnée par la Commission électrotechnique internationale (CEI).



Figure I.12. Disjoncteur à haute tension

- Le sectionneur est un dispositif électromécanique servant à la séparation mécanique d'un circuit et son alimentation. Il est un appareil mécanique de connexion, capable d'ouvrir et de fermer un circuit électrique lorsque le courant est nul et de protéger les composants de réseau et assurer la sécurité des personnes travaillant dans le réseau électrique.

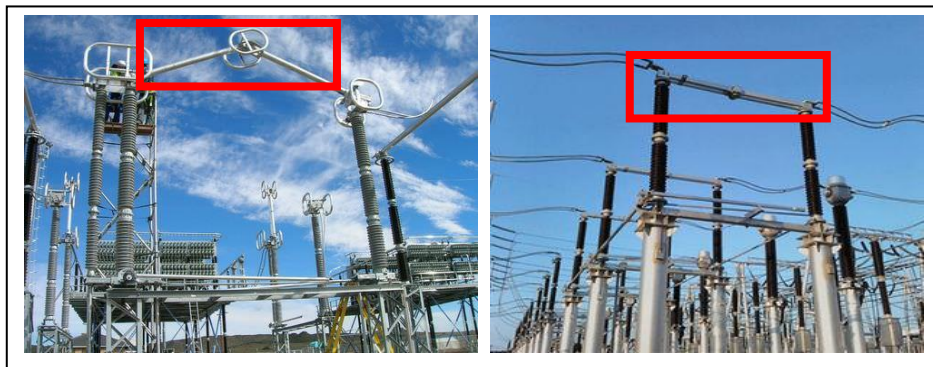


Figure I.13. Sectionneur à haute tension.

- Le parafoudre est un composant du système de protection de l'installation électrique. Cet appareil est raccordé en parallèle sur le circuit d'alimentation des récepteurs qu'il doit protéger (cf. Fig. J17). Il peut aussi être utilisé à tous les niveaux du réseau d'alimentation. C'est le type de protection contre les surtensions le plus utilisé et le plus efficace.

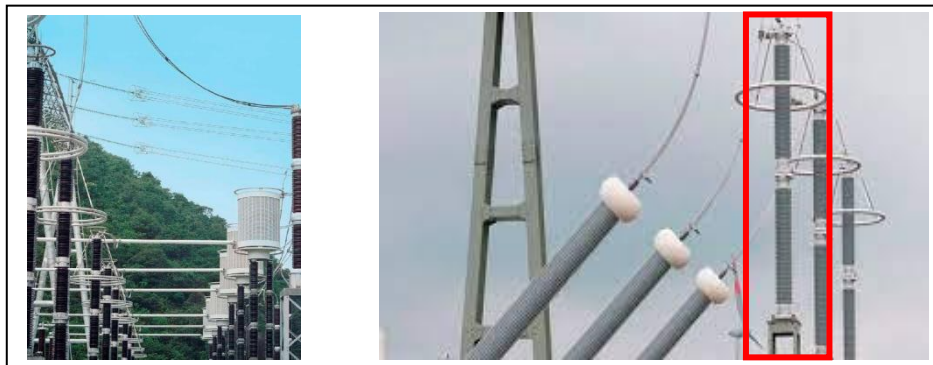


Figure I.14. Parafoudre.

I.6. Rendement énergétique de production l'électricité

Le principe du rendement énergétique repose sur une définition technique que l'on peut résumer ainsi qu'il s'agit du rapport entre l'efficacité réelle d'un appareil et l'efficacité maximale qu'il peut atteindre.

Le rendement énergétique d'un système représente le pourcentage de l'énergie consommée (ou énergie absorbée) et transformée en énergie utile.

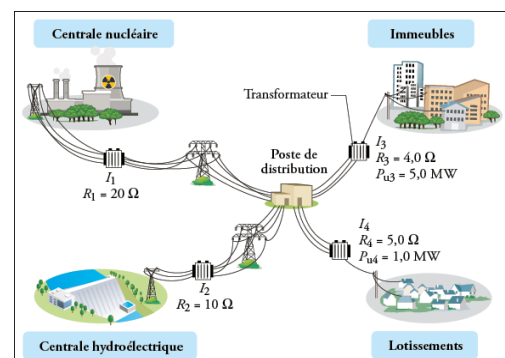
Le rendement permet de rendre compte des différentes pertes à chaque étape du processus de transformation. Ce terme s'utilise dans différents cas de figure et à différentes étapes du processus de transformation d'une énergie primaire en énergie finale. On parle ainsi par exemple du rendement énergétique de la production l'électricité est 39%.

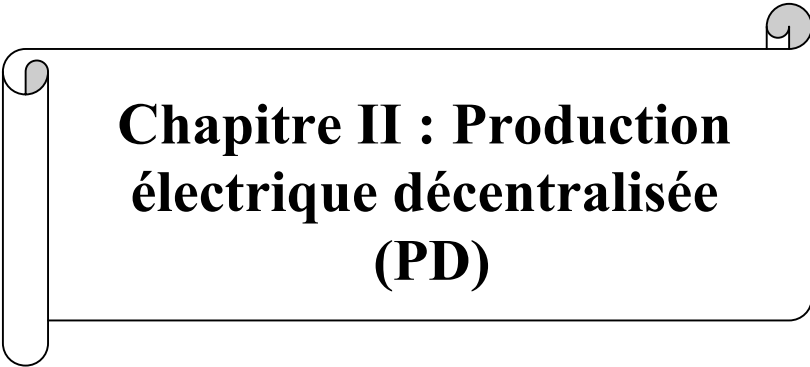
Les rendements des différentes méthodes de production d'énergie finale sont déterminés par l'Agence Internationale de l'Energie. Par exemple, le rendement d'une centrale nucléaire pour produire de l'électricité est de 33 %. Le rendement d'une centrale thermique fossile est de 60 %, et celui des énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique est de 28 %.

L'exemple de la production de chaleur permet de comprendre facilement pourquoi toutes les méthodes de génération d'énergie finale n'ont pas le même rendement.

I.7. Conclusion

En conclusion, le chapitre I met en évidence l'importance cruciale de la production d'électricité dans notre société moderne, soulignant son rôle essentiel dans notre quotidien et dans le développement économique. En explorant les différentes techniques de production, des centrales traditionnelles aux sources d'énergie renouvelables en plein essor, ce chapitre souligne la diversité et la complexité des processus impliqués dans la fourniture d'électricité à grande échelle. Tout en abordant les défis environnementaux et les impératifs de durabilité, il invite à réfléchir à l'avenir de la production d'électricité et à l'importance de promouvoir des solutions innovantes et respectueuses de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs.





**Chapitre II : Production
électrique décentralisée
(PD)**

II.1. Introduction

La production et le transport de l'énergie électrique sont en pleine évolution partout dans le monde. Les systèmes centralisés évoluent dans des réseaux plus intégrés.

Les technologies décentralisées, dans lesquelles l'énergie est produite au lieu d'utilisation, ou à proximité, jouent un rôle de plus en plus important au sein de ces réseaux. Ces technologies comprennent des sources d'énergies classiques (conventionnelles), des sources d'énergies renouvelables et des technologies complémentaires, telles que les contrôleurs de micro-réseaux et les systèmes de stockage d'énergie.

II.2. Définition

L'énergie décentralisée représente l'énergie produit au lieu d'utilisation ou à proximité. Les technologies d'énergie décentralisées peuvent être mobiles ou fixes et inclure des technologies qui alimentent non seulement l'énergie électrique et mécanique, mais aussi le torque pour déplacer les liquides et les objets. La production potentielle d'un système d'énergie décentralisé est généralement exprimée en termes de capacité électrique (Kilo- watts (kW) ou Mégawatts (MW)), ou Chevaux-Vapeur (CV). Bien qu'il n'existe pas de définition standard, la taille des systèmes d'énergie décentralisés est souvent inférieure à 100 MW et généralement sous 50 MW.

II.3. Les technologies de la production décentralisée

Les technologies d'énergie décentralisées comprennent, les sources classiques (conventionnelles) tel que les énergies fossiles, les sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, hydraulique et géothermie), la cogénération, des technologies complémentaires, telles que les contrôleurs de micro-réseaux (pour optimiser la distribution et la transmission d'énergie hors réseau `a distance) et les systèmes de stockage d'énergie (pour l'équilibrage de la charge des énergies renouvelables) prennent en charge l'intégration des actifs de production à l'intérieur du système d'énergie décentralisé.

II.3.1. Les sources conventionnelles

Sont des énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole), les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:

 Le thermique à flamme

Une centrale thermique à flamme produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz, de charbon ou de fioul, qui met en mouvement une turbine ou micro turbine reliée à un alternateur.

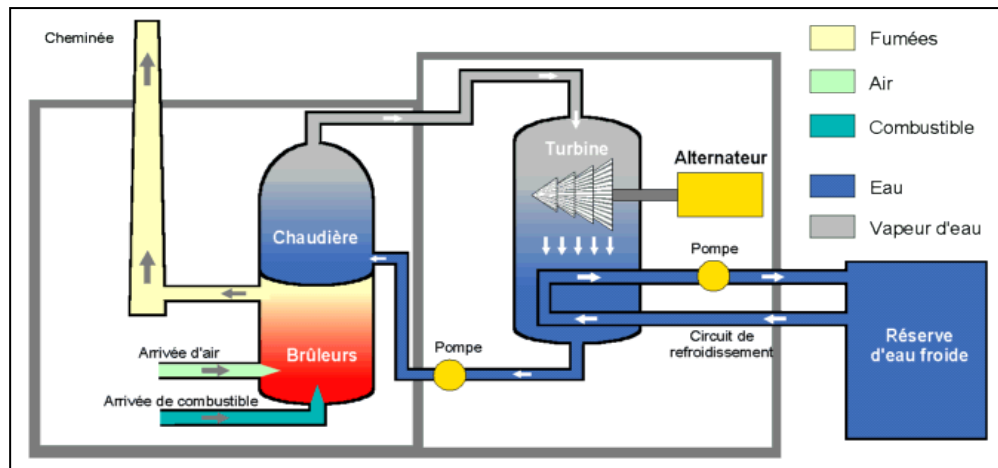


Figure II.1. Chaîne d'énergie d'une centrale thermique à flamme.

Les moteurs à combustibles fossiles

Les turbines à gaz et les groupes diesel sont des moyens de productions utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique développée par celles-ci en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent envisagé pour des cogénérations de quelques mégawatts.

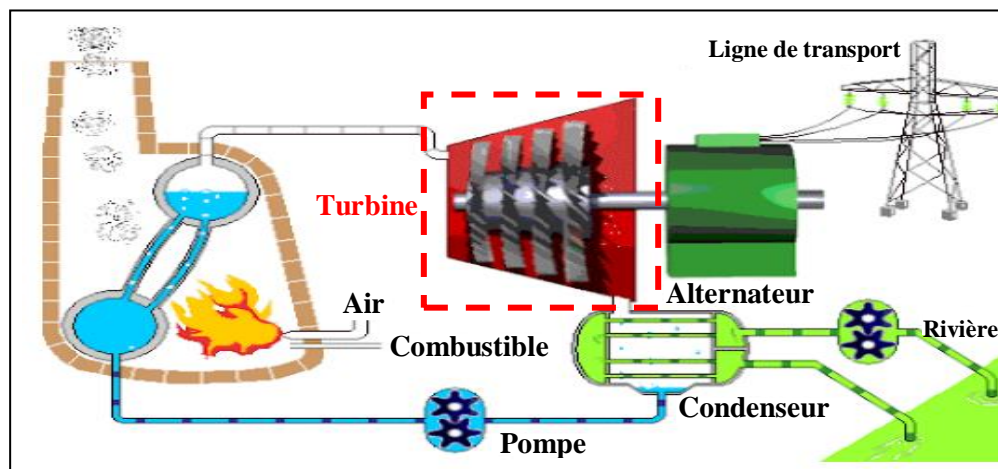


Figure II.2. Turbine à gaz pour centrale électrique.

Hydrogène

Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie sur laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature ; il faut en effet de l'énergie pour le produire. Les puissances disponibles de ce type de source varient en fonction de la technologie d'électrolyte considéré, de quelques kilowatts à quelque mégawatt.

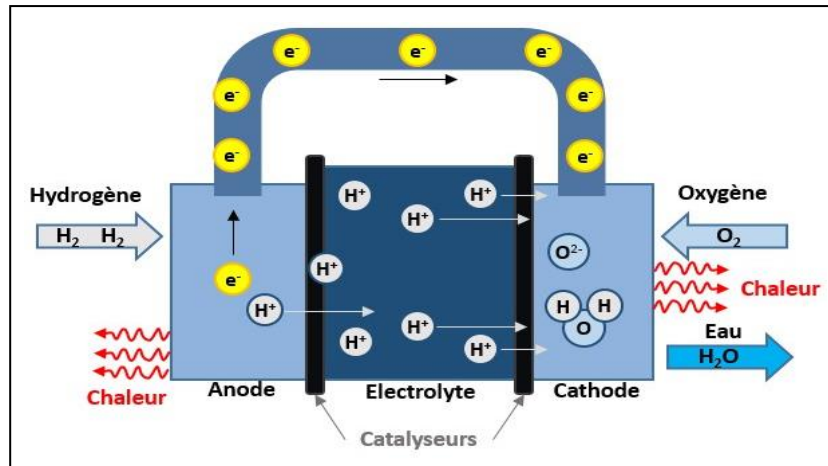


Figure II.3. Fonctionnement d'une pile à combustible.

II.3.2. Les sources nouvelles et renouvelables

L'énergie hydraulique, éolienne, solaire, biomasse et géothermique, respectivement issues de l'eau, du vent, du soleil, de la biomasse ou encore de la terre sont des énergies propres et inépuisables. En tant qu'énergies renouvelables, elles jouent un rôle prédominant dans la transition énergétique.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), l'eau (hydraulique), la Terre (géothermique) et le vent (éolienne).

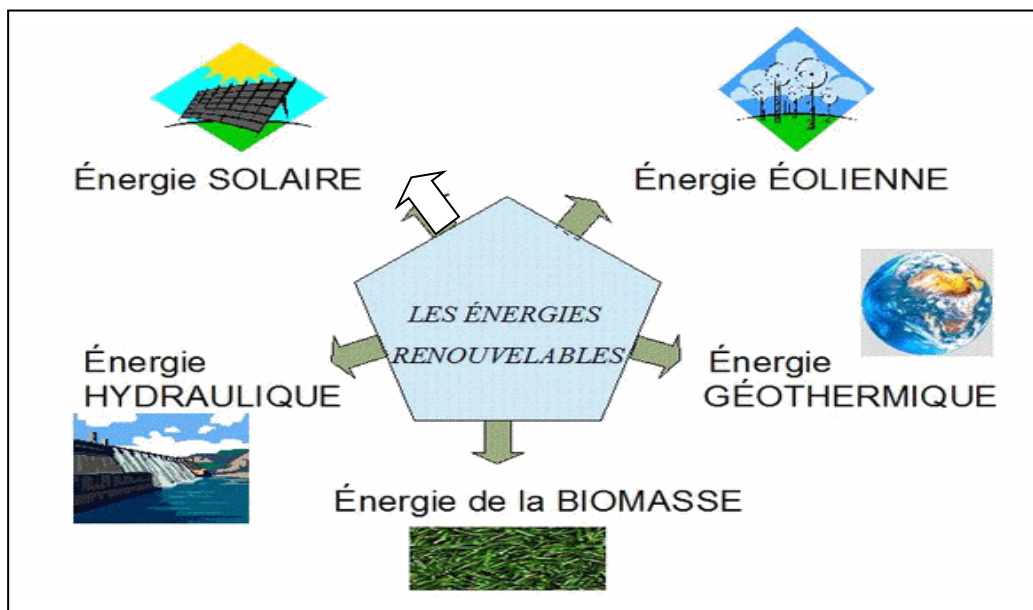


Figure II.4. Les sources nouvelles et renouvelables

L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photo sensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée).

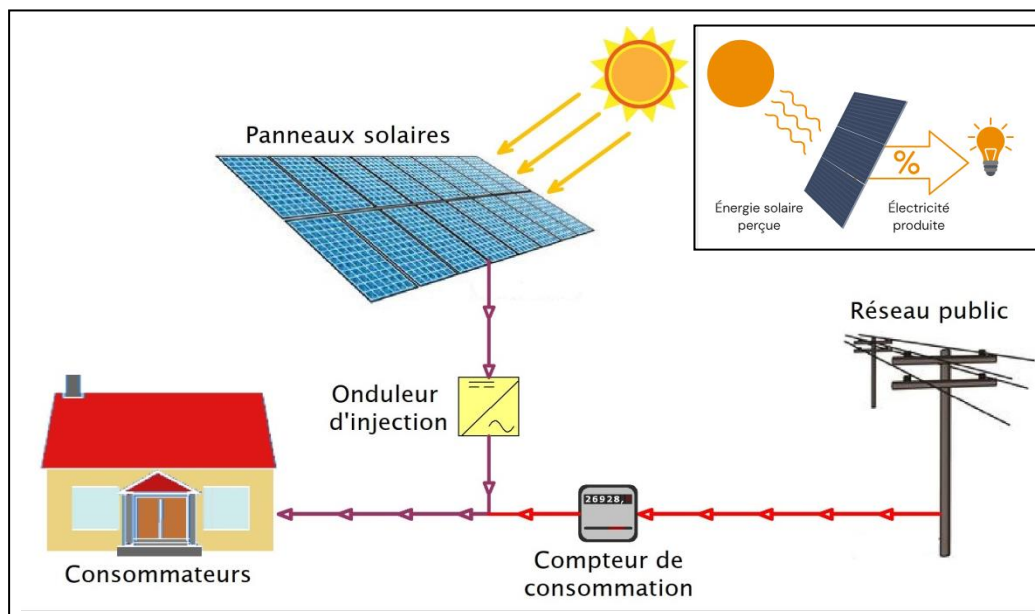


Figure II.5. Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.)

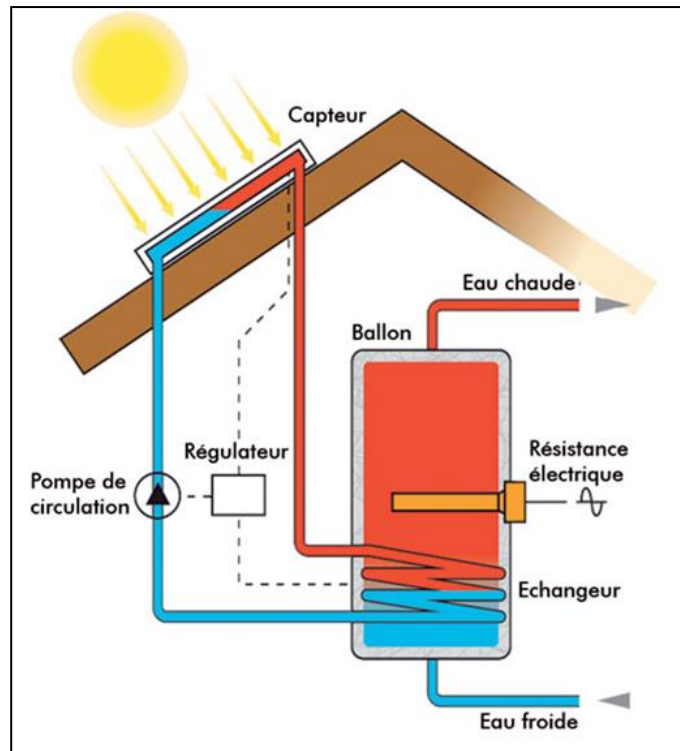


Figure II.6. Fonctionnement d'une source d'énergie solaire thermique.

✚ L'énergie éolienne

Une éolienne est une machine permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même convertie en électricité.

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelable, l'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entrainer l'arbre de son rotor, celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne.

Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.

Il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite, soit elle :

- ✚ Est stockée dans des accumulateurs.
- ✚ Est distribuée par le biais d'un réseau électrique.
- ✚ Alimente des charges isolées.

❖ Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes.







Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de cinq éléments principaux :

a. Le Mât (Tour)

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

b. La Nacelle

La nacelle est la couverture qui protège et regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique, elle offre également une protection contre les conditions météorologiques sévères. il est contient :

-  Arbres lent et rapide.
-  Roulements.
-  Multiplicateur.
-  Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
-  Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone.
-  Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique).

c. Le Rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées.

Actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.

L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales.

d. Le système d'interconnexion

Qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur.

e. Le système de contrôle

Il Utilise généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance, comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice,..... etc), le système arrête automatiquement l'éolienne.

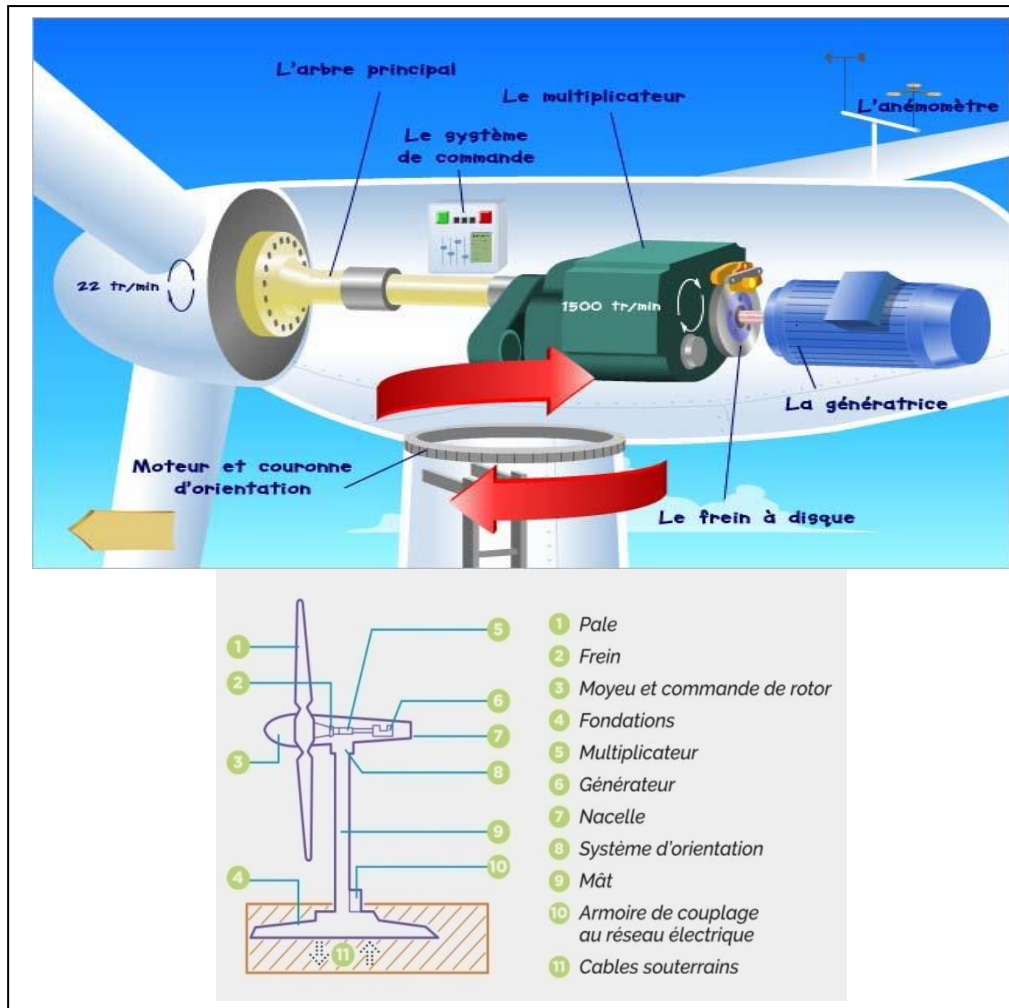


Figure II.7. Principaux parties d'une éolienne.

❖ Les types des turbines éoliennes

Suivant l'arrangement géométrique de l'arbre sur lequel est fixée l'hélice, deux principales catégories d'éoliennes sont à distinguer.

a. Les turbines éoliennes à axe horizontal

Il existe plusieurs types d'éoliennes à axe horizontal en fonction de la taille, de la **puissance** et de la conception des pales. Les éoliennes à trois pales sont les plus courantes, car elles offrent un bon équilibre entre performance, stabilité et coût. Les turbines à deux pales, bien que moins courantes, présentent l'avantage d'une masse réduite et d'une installation plus rapide. Les turbines à pales multiples, quant à elles, sont utilisées principalement pour des applications spécifiques ou dans des conditions de vent particulières.

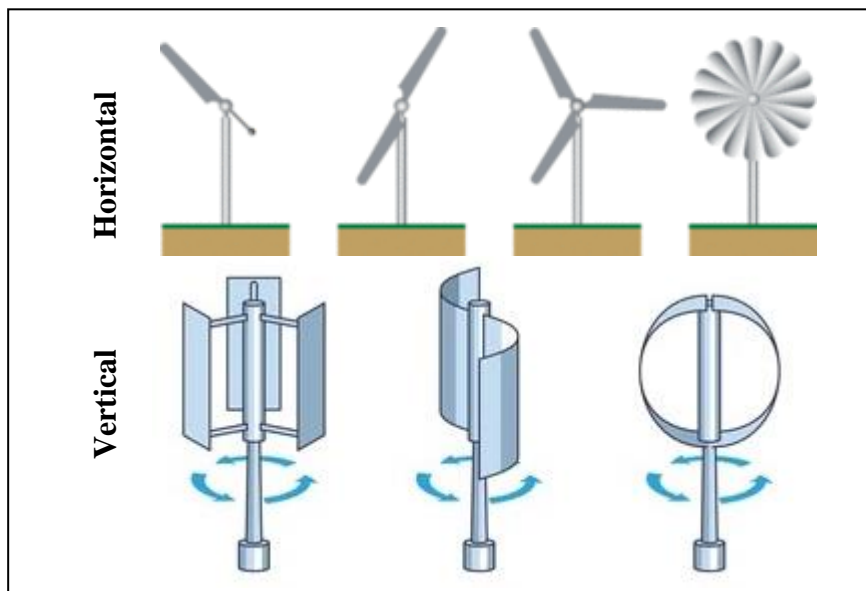
La majorité des installations éoliennes qui existent aujourd'hui sont de type à axe horizontal. Elles peuvent être classées en trois catégories selon la puissance qu'elles délivrent et la longueur de la pale comme le montre le tableau 1.

Table II.1. Les catégories des éoliennes à axe horizontales.

L'échelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivré
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40kW
Moyenne	12m à 45m	40 kW à 1 MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

b. Les turbines éoliennes à axe vertical

Elles sont peu installées, destinées généralement aux sites urbains. Elles n'ont pas besoin de girouette et capable de bénéficier de tous les vents quelque soit leurs directions. Elles sont caractérisées par une conception habituellement simple avec machinerie au sol. Vue leurs vitesse de rotation faible, ces éoliennes sont peu bruyantes.

**Figure II.8.** Les types des turbines éoliennes.

Les petites hydrauliques

La production de courant dans les petites centrales hydroélectriques présente un intérêt tant économique qu'écologique. La petite hydraulique offre encore des possibilités de développement allant jusqu'à 2200 GWh par an, si elle peut bénéficier de mesures écologiques.

Grâce à des innovations sur le plan technique ainsi qu'à des mesures visant à réduire leur impact écologique, les petites centrales hydroélectriques sont des sources d'énergie peu onéreuses, qui permettent de produire de l'électricité renouvelable de manière décentralisée et en respectant l'environnement.

L'énergie hydroélectrique est l'énergie électrique produite à partir de l'énergie cinétique de l'eau. L'énergie résultant de la chute d'une masse d'eau est en premier lieu transformée en énergie mécanique dans une turbine hydraulique. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité à l'aide d'un alternateur.

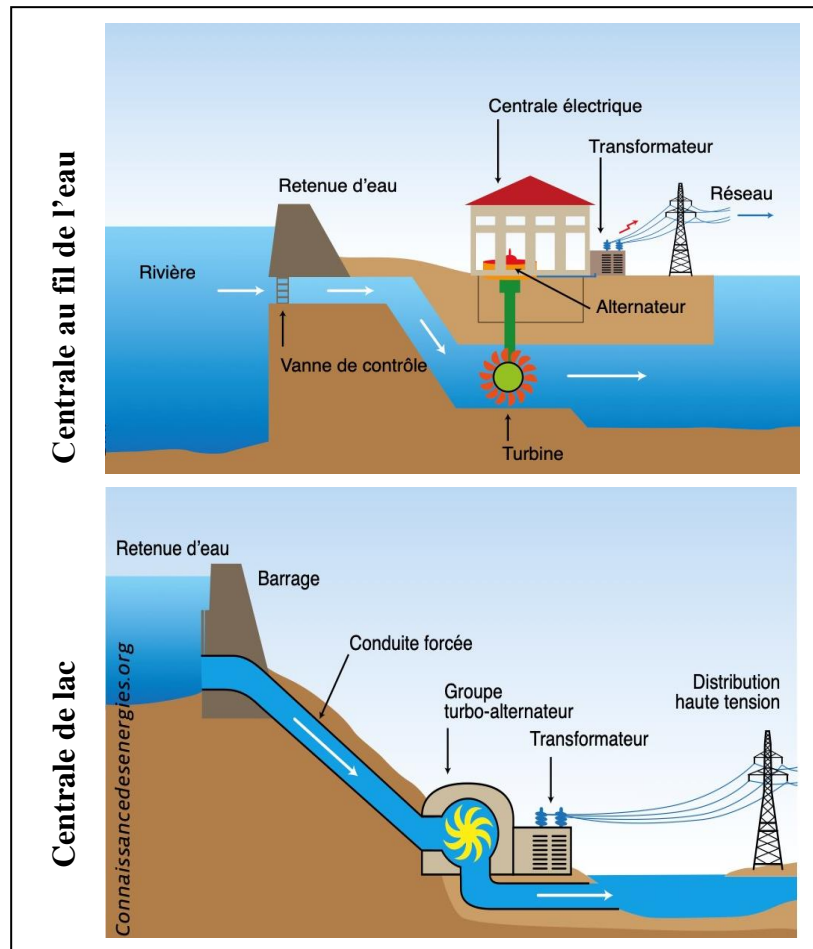


Figure II.9. Source d'énergie hydraulique.

Biomasse

La biomasse désigne toute matière organique d'origine végétale ou animale comme le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz.

Le bois-énergie est l'énergie dégagée par la combustion du bois en présence de l'oxygène de l'air, est une ressource très abondante. Elle est destinée pour le chauffage et aussi pour produire de l'électricité.

Les biocarburants sont deux familles, l'éthanol produit à partir de betterave et de blé, incorporable dans le super sans plomb, et le biodiesel qui consiste en des huiles végétales brutes comme le colza et le tournesol, présentent des avantages écologiques remarquables dans le cadre du combat contre l'effet de serre.

Le biogaz est un gaz combustible, composé en moyenne de 65% de méthane (CH_4) et de 35% de CO_2 , s'obtient par la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges et les stations d'épuration, sa combustion produit de l'électricité. Le biogaz peut servir à la production de la chaleur et à la génération de l'électricité.

En conclusion, une centrale biomasse produit en premier lieu de la vapeur d'eau grâce à la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine couplée à un alternateur pour générer de l'électricité.

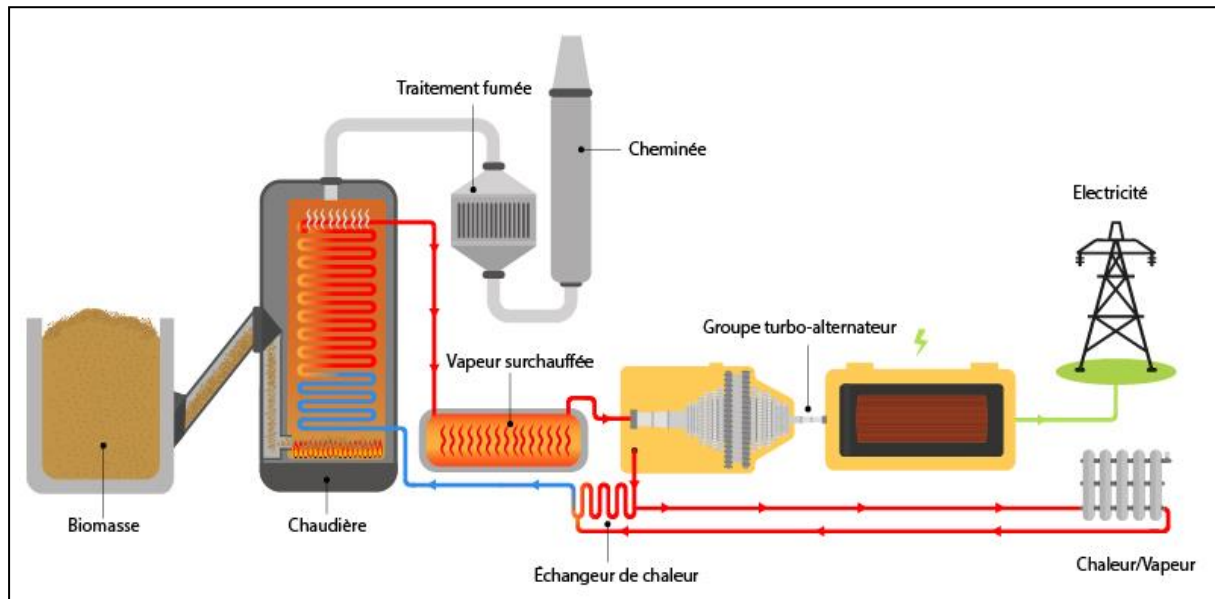


Figure II.10. Fonctionnement d'une centrale biomasse.

✚ Géothermie

La géothermie est un mot composé d'origine Grec : géo (la terre) et thermos (la chaleur). Technologiquement, veut dire l'extraction de l'énergie contenue dans le sol.

Le principe est de faire circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre, eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude ou de faire monter de l'eau chaude d'une nappe naturelle.

Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte pour être exploité directement pour chauffer ou convertie partiellement en électricité.

La température de la croûte terrestre croît en profondeur depuis le sol jusqu'au centre de la Terre de $3\text{ }^\circ\text{C}$ chaque 100 m en moyenne. Il faut distinguer plusieurs types de géothermie selon la température de gisement.

a. La géothermie de surface à basse température (<30°C)

La géothermie de surface à basse température (<30°C) est utilisée pour le chauffage et la climatisation individuelle.

b. La géothermie profonde avec des températures situées entre 30 et 100 °C

Jusqu'à 2 000 m de profondeur, sa principale application est le chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels etc.

c. La géothermie très profonde à haute température (>100°C)

La géothermie très profonde à très haute température (>180°C), jusqu'à 10 000 m de profondeur, favorisent la conversion en énergie électrique.

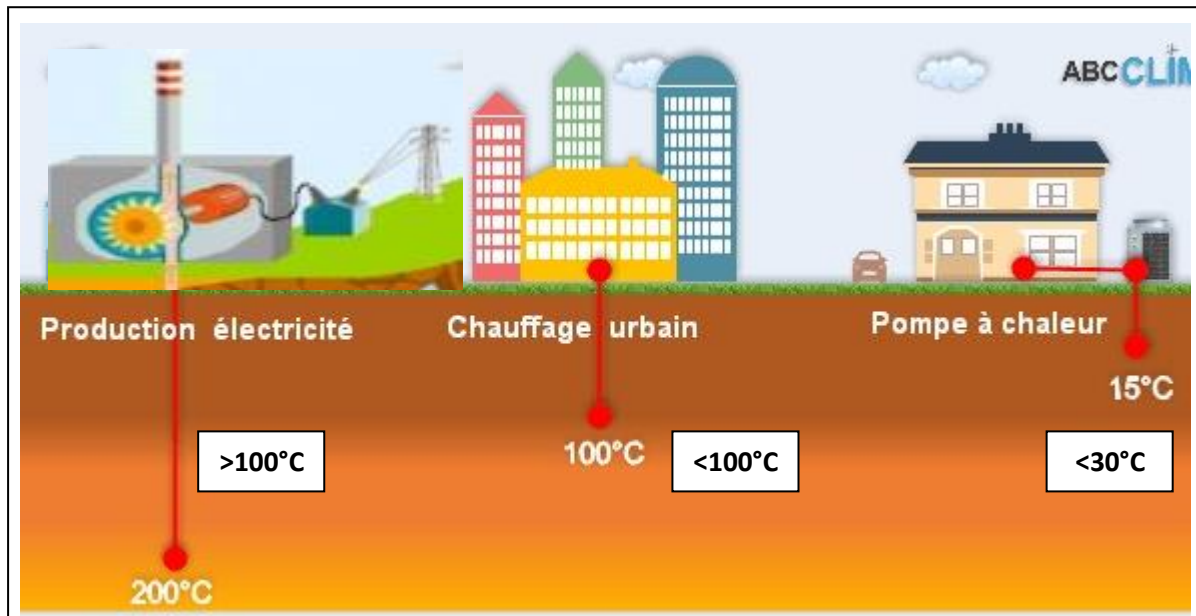


Figure II.11. Fonctionnement d'une centrale géothermique.

II. 3.3 La cogénération

La cogénération électricité - chaleur est une technique permettant de récupérer la chaleur produite par toute microcentrale électrique proche de bâtiments et fonctionnant à haute température, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou de certains types de piles à combustible. Le rendement énergétique global d'une telle installation peut atteindre 90% et l'utilisation locale de la chaleur produite permet d'éviter une consommation supplémentaire d'énergie pour le chauffage des bâtiments.

Le **principal avantage** de la cogénération est son efficacité. Néanmoins, cette technique présente également d'autres avantages, surtout environnementaux. En effet, chaque tonne de combustible fossile que nous évitons de brûler, empêche le dioxyde de carbone de se propager dans l'atmosphère; ce qui contribue à réduire, proportionnellement, le problème du réchauffement climatique.

La cogénération présente également peu **d'inconvénients** évidents. L'un des problèmes les plus importants, est que cette technologie est actuellement plus coûteuse et plus complexe. En outre, la construction des centrales de cogénération nécessite souvent un investissement initial plus élevé. Les coûts de maintenance peuvent également être plus élevés pour la cogénération. Un autre problème est que les centrales de cogénération à petite échelle produisent de l'électricité plus chère que les centrales à plus grande échelle.

Bien plus grave encore, et dans les conditions actuelles, les centrales de cogénération à combustibles fossiles renforcent notre dépendance aux mêmes combustibles. Même s'il est possible d'utiliser des combustibles plus verts comme la biomasse, cela est encore compliqué.

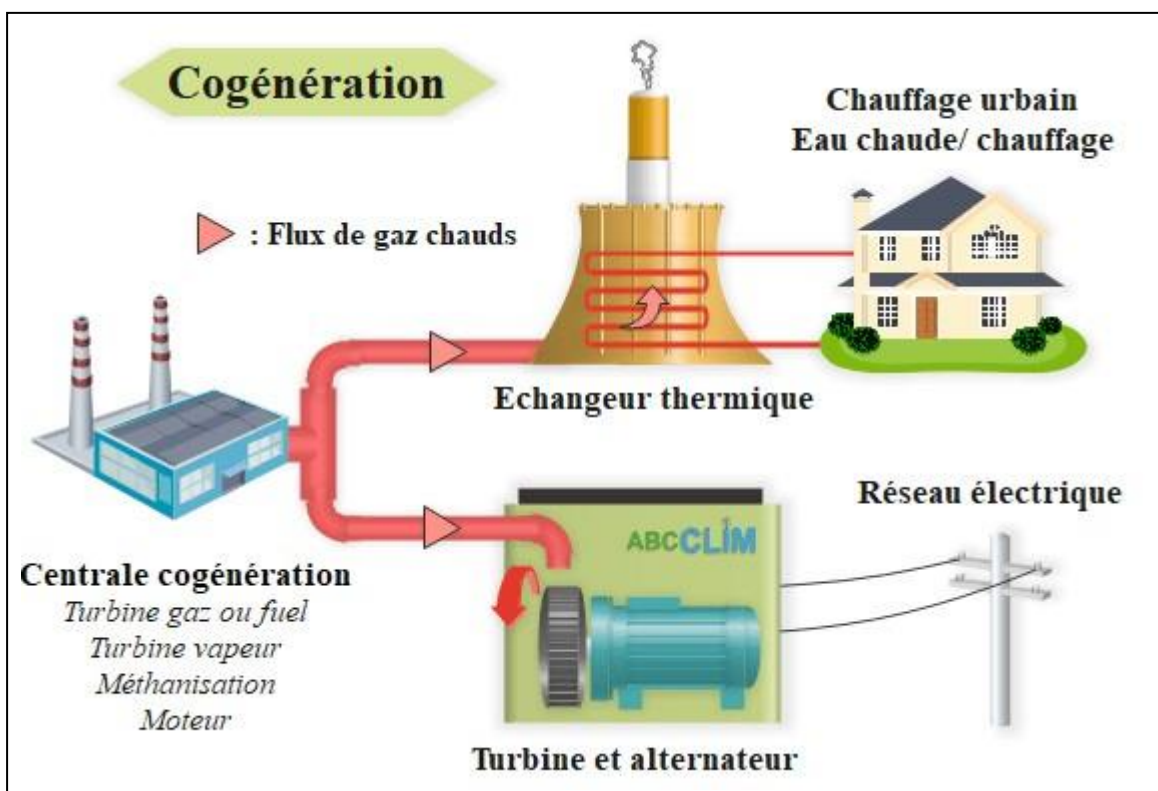


Figure II.11. Schéma de fonctionnement de la cogénération.

II.4. Les avantages de la production décentralisée

Les avancées en matière de système ont mené à des technologies d'énergie décentralisées de plus en plus compactes, plus accessibles, efficaces et à des prix plus abordables aujourd'hui qu'ils étaient il y a tout juste une dizaine d'années.

On peut résumer ces avantages comme suit :

II.4.1. Efficacité

La production décentralisée est plus éco-énergétique étant donné que l'utilisation sur place réduit les déchets provenant des pertes de ligne et permet à l'électricité et à l'énergie

thermique d'être utilisées dans la production de cogénération dans les applications de chauffage centralisé.

II.4.2. Efficience

Même à petite échelle, les technologies d'énergie décentralisées se traduisent par une diminution des contraintes en matière d'investissement et par une réduction des coûts de construction et de fonctionnement globaux, minimisant ainsi le risque et les besoins en capital pour le financement de projets. L'agence internationale de l'énergie (AIE) a estimé que ces économies de coûts, combinées à une réduction des pertes de ligne, se traduiront en dizaines de milliards de dollars pour le Canada seulement. Dans les régions éloignées qui sont complètement tributaires de carburant diesel pour la production d'électricité, l'important coût énergétique crée une occasion favorable pour les énergies renouvelables et le gaz naturel, à condition que les défis logistiques et technologiques puissent être surmontés.

II.4.3. Rapidité

Les systèmes d'énergie décentralisés s'installent rapidement et dans certains cas, ne nécessitent pas les longues procédures de recherche d'emplacement, d'autorisation, de révision rencontrées lors des grands projets d'infrastructure. La mise en route du système et le délai de réponse est aussi plus rapide, permettant aux systèmes de combler l'écart d'énergie plus rapidement lors de pénurie, de catastrophes naturelles ou d'évènements à grande échelle.

II.4.4. Flexibilité

La petite taille des technologies d'énergie décentralisées permet aux fournisseurs d'énergie de gérer plus efficacement l'offre et la demande grâce à des ajustements progressifs.

En outre, les systèmes décentralisés peuvent fonctionner de façon autonome ou de pair au sein d'un réseau de technologies intégrées pour répondre aux besoins des petits et grands consommateurs d'énergie

II.4.5. Localisation

La production de localisation décentralisée vers les consommateurs ou à proximité permet la surveillance, l'exploitation et l'entretien de ces systèmes qui peuvent être personnalisés pour répondre aux besoins locaux spécifiques. Des plus petits systèmes d'énergie régionaux favorisent aussi la création d'emplois locaux, une bonne compréhension des choix en matière de système énergétique et encouragent une plus grande participation collective.

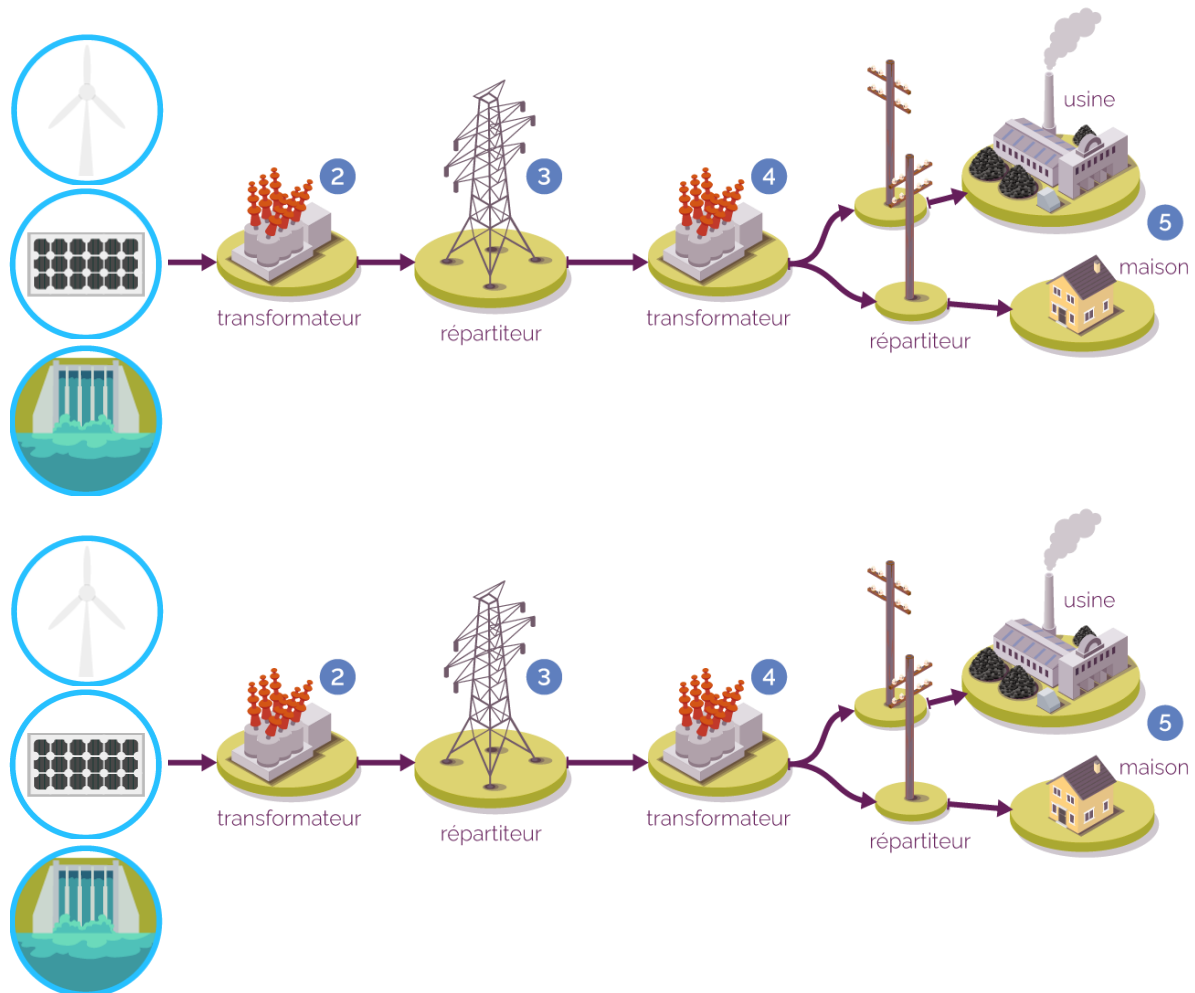
II.4.6. Fiabilité

Les éléments décentralisés au sein d'un réseau central faible ou peu fiable permettent un délestage régional plus rapide à la suite d'un arrêt ou d'une catastrophe naturelle. La production décentralisée contribue également à distribuer une source d'énergie fiable aux

collectivités rurales et éloignées grâce à la production indépendante ou d'appoint aux opérateurs industriels et commerciaux.

II.5. Conclusion

Le deuxième chapitre souligne l'importance croissante de la production électrique décentralisée dans le paysage énergétique mondial. Les avancées technologiques dans les sources d'énergie renouvelables offrent des solutions innovantes pour répondre aux défis de la transition énergétique. En adoptant des approches décentralisées, nous pouvons non seulement améliorer l'efficacité énergétique, mais aussi réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et promouvoir un avenir plus durable pour les générations futures.





**Chapitre III :
Raccordement de la PD
au réseau électrique**

III.1. Introduction

L'évolution des technologies de production d'énergie a entraîné un changement significatif dans le paysage énergétique mondial, favorisant l'émergence de la production électrique décentralisée. Cette approche décentralisée vise à intégrer diverses sources d'énergie renouvelable et de cogénération dans le réseau électrique existant.

L'électricité aujourd'hui c'est la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant de la consommer il faut la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer au consommateur.

L'augmentation massive de la production et de la consommation d'énergie dans le monde au cours de ces dernières années a entraîné des déséquilibres économiques, des conflits et des atteintes à l'environnement, ces préoccupations imposent le développement et la maîtrise de système énergétique moins polluants, plus économiques et disponible tels que les systèmes de production de l'énergie électrique utilisant les énergies renouvelables, qui s'adaptent bien à une production décentralisée mais leur raccordement au réseau de distribution introduit des impacts notables.

Ce chapitre explore les différentes facettes du raccordement de la production électrique décentralisée au réseau électrique, mettant en lumière les conditions, les aspects réglementaires, organisationnels, techniques, les interactions avec le réseau et les normes en vigueur.

III.2. Qu'est-ce que la production décentralisée (PD) ?

La production décentralisée est la production d'énergie électrique à l'aide d'installations de petite capacité raccordées au réseau électrique à des niveaux de tension peu élevées : basse ou moyenne tension.

III.3. Le raccordement de la PD sur les réseaux de distribution

Le raccordement de la production électrique décentralisée dépend de divers facteurs tels que la capacité du réseau électrique, la stabilité du système, les contraintes de tension et de fréquence, et les politiques énergétiques en vigueur. Les conditions incluent également des considérations financières telles que les tarifs de raccordement et les incitations à l'intégration d'énergies renouvelables.

Le raccordement aux réseaux HTA d'unités de production décentralisées doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct de ce dernier, en particulier dans les réseaux de

distribution qui n'ont pas été à l'origine conçus et développés pour accueillir des unités de production. Des précautions quant à l'insertion de PD sur les départs de réseaux de distribution sont ainsi à prévoir par des règles de raccordement afin de conserver le bon déroulement du fonctionnement du réseau. Ces règles sont des prescriptions techniques de conception et de fonctionnement : la protection, la puissance d'installation, la perturbation et la fréquence, tension...etc.

Ces règles, actuellement en vigueur, sont prévues pour garantir le bon fonctionnement du réseau de distribution tel qu'il est actuellement. Si les réseaux de distribution évoluent vers d'autres architectures et d'autres modes d'exploitation, ces règles sont susceptibles d'être modifiées.

Le concept actuel des réseaux de distribution n'étant pas adapté à la production décentralisée, l'augmentation, dans l'avenir, de ce type de production laisse penser que des modifications de l'architecture de la distribution pourraient être avantageuses dans la mesure où une structure plus adaptée pourrait permettre une meilleure exploitation de ces unités de production pour le fonctionnement du réseau :

- ✚ Une topologie comportant des boucles fermées.
- ✚ L'utilisation des PD en tant que secours ou soutien du poste source.

Ces mesures pourraient améliorer la fiabilité du réseau de distribution, mais il faut considérer les coûts de ces innovations et la rentabilité d'un tel système.

Le raccordement d'un utilisateur doit être étudié de façon à identifier une solution répondant strictement au besoin de raccordement du demandeur tout en garantissant que ce raccordement n'aura pas de conséquence sur le fonctionnement du réseau et sur la qualité de l'énergie fournie aux autres utilisateurs déjà raccordés.

L'instruction des demandes de raccordement suppose la collecte de différentes caractéristiques de l'installation permettant de conduire les études techniques de raccordement, ces fiches de collecte, et la procédure d'instruction des demandes de raccordement sont publiées.

La solution de raccordement s'inscrit dans la structure de réseau existante ou décidée pour la zone concernée et utilise les ouvrages de distribution existants ou à créer présentant la capacité d'accueil suffisante.

III.3.1. Étude de raccordement d'une installation

Les différentes étapes de l'étude de raccordement ont pour objet de concourir à la détermination des ouvrages à établir ou à modifier pour assurer une desserte dans des conditions techniques et économiques optimales, chacun des domaines d'interaction du site

avec le réseau ou les autres utilisateurs est exploré et le dimensionnement du raccordement projeté doit assurer le maintien du réseau existant et futur dans un domaine de fonctionnement acceptable.

Les vérifications à mener pour vérifier l'impact du raccordement et déterminer les solutions de raccordement de tous les utilisateurs producteur ou consommateur sont les suivantes:

- + Tenue thermique des éléments du réseau,
- + Vérification des conséquences sur les plans de tension des réseaux HTA et BT,

Pour les utilisateurs producteurs, les vérifications complémentaires suivantes sont à effectuer :

- + Vérification de la tenue de la tension au poste source,
- + Modification des comptages au poste source,
- + Vérification de la tenue des matériels aux courants de court-circuit,
- + Vérification du fonctionnement du plan de protection contre les défauts entre phases du réseau HTA et du poste de livraison,
- + Choix de la protection de découplage,
- + Évaluation de la nécessité d'installation d'un dispositif d'échange d'informations d'exploitation.

Certaines installations de consommation ou de production particulières peuvent nécessiter des études complémentaires compte tenu de leur impact possible sur la qualité, ces études ne sont pas systématiques et sont engagées selon la nature et les caractéristiques de l'installation (en soutirage ou en injection) envisagée et les caractéristiques du réseau d'accueil :

- + Évaluation des niveaux de courants harmoniques injectés,
- + Évaluation du niveau de variations rapides de tension,
- + Évaluation du déséquilibre des charges.

III.3.2. Aspects réglementaires et organisationnels du développement de la production électrique décentralisée

Le développement de la production électrique décentralisée est encadré par des réglementations spécifiques visant à garantir la sécurité, la fiabilité et la durabilité du système électrique. Cela implique des processus d'autorisation, de certification et de surveillance. Les aspects organisationnels comprennent la coordination entre les acteurs du secteur énergétique, la gestion des flux d'énergie et la planification du réseau.

Le raccordement de la production électrique décentralisée aux réseaux Haute Tension (HTA) implique l'intégration physique des installations de production au réseau existant. Cela nécessite une conception soignée des équipements de connexion, des dispositifs de protection et de contrôle, ainsi qu'une évaluation approfondie de l'impact sur la stabilité et la qualité de l'énergie du réseau.

III.4. Impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution

Les interactions entre la production électrique décentralisée et le réseau électrique sont de plus en plus importantes à mesure que les technologies de production d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, se développent.

Les études montrent qu'un taux de pénétration croissant de production décentralisée n'est pas sans impacts prévisibles sur l'exploitation future des réseaux de distribution, en particulier, le plan de tension peut être grandement modifié par la présence de PD, au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure en certains nœuds du réseau alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source, le plan de protection risque également d'être affecté par un fort taux de pénétration des PD du fait de la puissance de court-circuit qu'elles apportent en aval des protections, et de l'inversion possible des flux de puissance active sur certaines lignes, ainsi que de la diminution du temps d'élimination critique de défauts.

Des PD peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché, d'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchables par les gestionnaires de réseaux de distribution et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système, cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. Cela peut contraindre par exemple les gestionnaires de réseaux à engager des investissements non prévus initialement.

Une partie de ces PD produisant par construction du courant continu (pile à combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée.

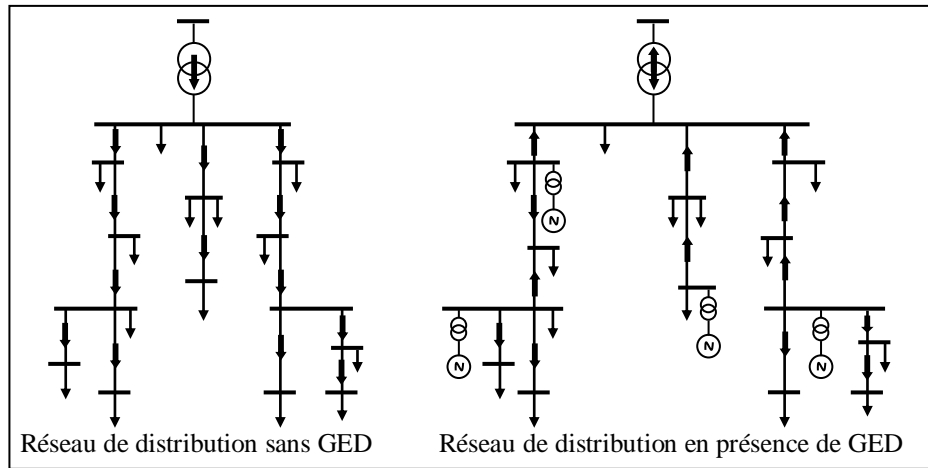


Figure III.1. Réseau de distribution sans et avec une présence de GED.

III.4.1. Impacts sur le sens de transit de puissance

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution, l'insertion des PD dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport, les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles, ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de PD augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales.

III.4.2. Impacts sur la stabilité du système

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone l'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le système peut résister sans perte de stabilité), ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système.

III.4.3. Impacts sur la qualité de service

Les PD de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique lors de la connexion au réseau elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension. D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie.

III.4.4. Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système

Les PD notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires, cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs donc la puissance fournie du système par conséquent.

III.4.5. Impacts sur la continuité de service

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des PD lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance.

III.4.6. Impacts sur le plan de protection

Lorsqu'un défaut apparaît sur un départ HTA , le distributeur doit pour des raisons de sécurité éliminer ce défaut en ouvrant le disjoncteur du départ, assurant ainsi la mise hors tension du défaut, dans le cas de défauts fugitifs sur un réseau aérien une mise hors tension très courte (0.3s) est suffisante pour éliminer le défaut et permettre le succès d'un cycle de réenclenchement rapide, la présence d'une installation de production ne doit pas perturber le fonctionnement du plan de protection du distributeur en sensibilité et en sélectivité lors d'un défaut sur le départ auquel elle est raccordée, l'installation de production doit se découpler pour ne pas maintenir sous tension le défaut : c'est le rôle de la protection de découplage Cette protection "de découplage" devant supprimer la parallèle entre générateurs et réseau de distribution, lors d'un défaut ou d'une autre anomalie sur celui-ci. Le découplage doit répondre à des conditions strictes lorsqu'il est effectué des ré enclenchements automatiques rapides, ce qui est le cas le plus général des réseaux HTA aériens.

En résumé, les interactions entre la production électrique décentralisée et le réseau électrique présentent à la fois des défis et des opportunités pour la transition vers un système énergétique plus durable et résilient. Une gestion efficace de ces interactions est essentielle pour maximiser les avantages de l'énergie renouvelable décentralisée tout en assurant la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.

III.5. Normes et textes réglementaires

Les installations et les matériels fournis seront conformes aux normes nationales et internationales, décrets, DTU, codes règlements, prescriptions administratives et règles département a les en vigueur à la date de passation des commandes, les installations seront

exécutées selon les règles de l'art, les prescriptions des documents ci-dessous sont appliquées et n'ont en aucun cas un caractère limitatif.

Principaux normes et règlements :

- ✚ Norme NFC 13-100 : « Poste de livraison alimenté par un réseau de distribution publique HTA ».
- ✚ Norme NFC 14-100 : « Installation de branchement à basse tension ».
- ✚ Norme NFC 15-100 : « Règles d'installations électriques à basse tension ».
- ✚ Guide UTEC 15-400 : « Raccordement des générateurs d'énergie électriques dans les installations alimentées par un réseau public de distribution ».

Les normes techniques et de sécurité jouent un rôle crucial pour garantir l'interopérabilité des équipements et la cohérence du système électrique dans son ensemble.

III.5.1. Récapitulatifs des normes ont respecté pour une installation solaire photovoltaïque

L'ensemble des matériels installés sera conforme aux normes et textes suivants :

- ✚ CEI 62116 Procédure d'essai des mesures de prévention contre l'îlotage pour onduleurs photovoltaïques interconnectés au réseau public.
- ✚ La norme NFC 15-100 réglementant les installations électriques à basse tension
- ✚ La norme UTE C 57-300 sur les paramètres descriptifs d'un système photovoltaïque
- ✚ La norme UTE C 57-310 sur la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique.
- ✚ CEI 61727 concernant l'interface de raccordement réseau des systèmes photovoltaïques.
- ✚ NFEN 61173 sur la protection contre les surtensions des systèmes photovoltaïques.
- ✚ NFC 17- 100 protection contre la foudre.
- ✚ NFC 17-102 protection contre la foudre- protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par para tonnerre a dispositif d'amorçage tension.
- ✚ DIN VDE 0126 spécifications de fonctionnement de l'onduleur (îlotage, intervalles de tension et de fréquence, injection de courant continu) condition de coupure de l'onduleur.
- ✚ CEI 61000-3-2 sur la compatibilité électromagnétique CEM et la limitation des courants harmonique.
- ✚ Ces installations peuvent être aussi soumises à d'autres décrets et législation du pays ou du réseau publique.

III.5.2. Exemple sur La norme : UTEC 15-712

Cette norme a été amendée en août 2008 pour que les installations photovoltaïques fassent partie des installations électriques rentrant dans son champ d'application et précise que "Les installations photovoltaïques sont traitées dans le guide UTE C 15-712". Ce guide, dont la version initiale date de février 2008, a été rédigé par la Commission de l'Union Technique de l'Electricité (UTE) constituée d'experts en génie électrique. Depuis le 1er janvier 2011, une nouvelle version de ce guide est entrée en vigueur : le guide UTE C15-712-1 datant de juillet 2010. Une nouvelle version de ce guide vient d'être publiée au 1^{er} juillet 2013.

Que traite cette norme?

Ce guide traite tous les composants des installations photovoltaïques : soit en courant continu, soit en courant alternatif et le raccordement au réseau. Il fournit les prescriptions suivantes :

- ✚ La classe d'isolation du circuit à courant continu,
- ✚ La mise à la terre des masses métalliques de modules photovoltaïques,
- ✚ La mise à la terre fonctionnelle d'une des polarités du circuit à courant continu,
- ✚ La présence de dispositif anti-foudre sur le circuit à courant continu et le circuit à courant Alternatif,
- ✚ La nature et le dimensionnement des dispositifs de protection du circuit à courant continu,
- ✚ Les caractéristiques des câbles à utiliser,
- ✚ Les coefficients à prendre en compte pour les calculs réglementaires de la tenue en courant des câbles,
- ✚ Les chutes de tension maximales admissibles et recommandées des circuits à courant continu et à courant alternatif,
- ✚ La mise en place du dispositif de coupure d'urgence du circuit à courant continu situé à proximité des onduleurs,
- ✚ La mise en place d'un dispositif différentiel.

III.5.3. Exemple d'installation normalisée

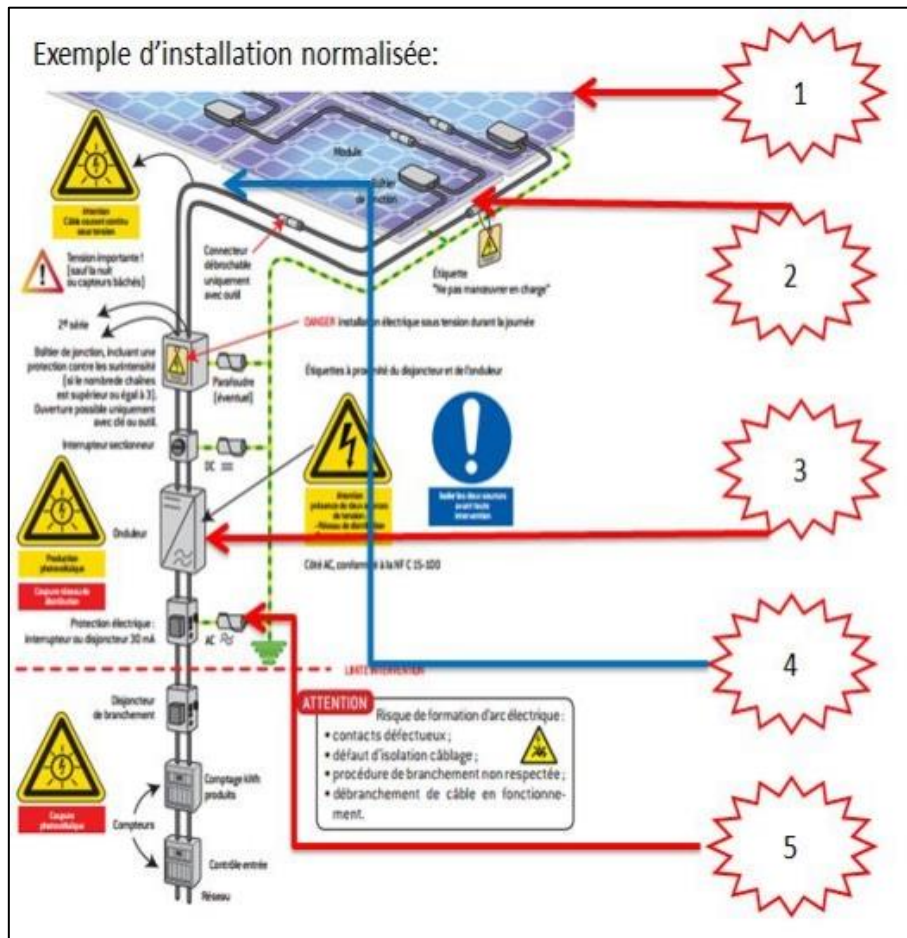


Figure III.2. Exemple d'installation normalisée

1. Module:

Les modules doivent être conformes aux normes de la série NFEN 61730,61215 (cristallin), 61646 (couches minces).

2. Câble et connecteur:

Choisir des câbles unipolaires double isolation, résistant aux UV et non propagateurs de flamme.

3. L'onduleur:

L'onduleur doit être conçu spécifiquement pour le raccordement au réseau, ils doivent être conformes aux normes:

- ✚ CEI61727 pour l'interface réseau,
- ✚ DIN VDE 012-1-1 pour la protection de découplage,
- ✚ EN 55014 (comptabilité électromagnétique),
- ✚ CEI 61000-3-2 (harmonique),
- ✚ EN 60950 (sécurité).

4. Chemin des câble:

Le cheminement des câbles doit être conçu de manière a:

- + Pouvoir séparer les câble AC et DC,
- + Ne pas créer une boucle électromagnétique,
- + Rendre accessible les boîte de jonction et les connecteurs.

5. Protection contre les chocs électriques par contact direct:

❖ Cotés DC:

utiliser les composants de classe II ou équivalent sur tout le matériel utilisé (module PV, câbles, boîte de jonction..)

❖ Cotés AC:

Prévoir des disjoncteurs différentiels.

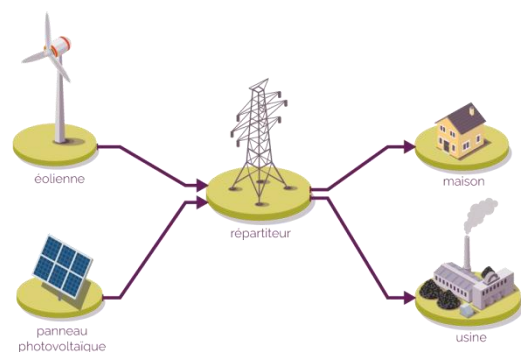
III.6. Conclusion

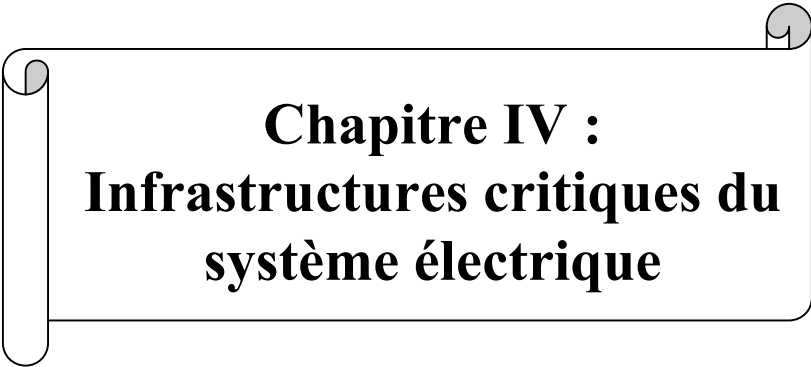
Le raccordement de la production électrique décentralisée au réseau électrique représente un défi multidimensionnel nécessitant une approche intégrée prenant en compte des considérations techniques, réglementaires, organisationnelles et normatives. Bien géré, ce processus peut contribuer à promouvoir la transition énergétique vers un système plus durable, résilient et diversifié.

Nous avons vu au cours de ce chapitre les différents impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques, les PD tant qu'elles restent des sources marginales, n'ont pas de grandes influences, ni sur le fonctionnement, ni sur la qualité de service du réseau. Si on prévoit une introduction massive des PD dans le réseau dans les années à venir, un des grands enjeux sera celui de la gestion des situations critiques.

La production décentralisée s'insère bien dans le système électrique mais il convient de respecter quelques précautions :

- + De bons échanges d'information avec le réseau de transport pour permettre l'ajustement de la production et de la consommation d'électricité,
- + Coordonner le plus en amont possible le développement de la production d'électricité avec celui du réseau.





**Chapitre IV :
Infrastructures critiques du
système électrique**

IV1. Introduction

Les infrastructures critiques du système électrique jouent un rôle vital dans la fourniture d'électricité fiable à travers les réseaux. Ce chapitre explore les défis liés à la gestion de ces infrastructures, en mettant particulièrement l'accent sur la présence croissante de la production électrique décentralisée (PD) et les solutions pour faire face aux situations critiques.

IV.2. Gestion en présence de fort taux d'insertion des productions électrique décentralisée PD

L'augmentation du taux d'insertion de la production électrique décentralisée (PD) présente des défis de gestion pour les infrastructures critiques du système électrique. Cela inclut la nécessité d'adapter les réseaux pour gérer les flux d'énergie bidirectionnels, d'équilibrer l'offre et la demande en temps réel, et de garantir la stabilité et la sécurité du réseau face aux variations de charge.

La gestion en présence d'un fort taux d'insertion des productions électriques décentralisées est un défi majeur pour les opérateurs de réseaux électriques et les planificateurs énergétiques.

RQ: Les différentes sources d'énergies sont appelée a participera la satisfaction de la demande par ordre croissant de cout (ou du prix). La plupart des énergies renouvelables sont très chères en cout de capital mais leurs coûts de fonctionnement et de maintenance (éolien, PV, hydro principalement) sont faible. Le déploiement de ces énergies change la structure de la courbe d'approvisionnement « power supply » et réduit le prix marginal de l'électricité grâce a l'augmentation de la production a faible coûts d'exploitation.

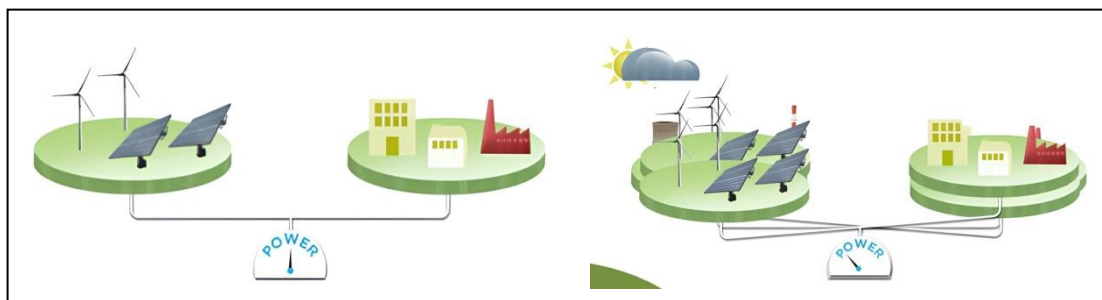


Figure IV.1. L'équilibre entre production / consommation.

Il faut maintenir à tout instant l'équilibre production / consommation...

... quelles que soient les variations :

- + De la production,
- + De la consommation.

Voici quelques aspects clés à prendre en compte dans cette gestion :

IV.2.1. Prévission de la production décentralisée

Avec une production décentralisée fluctuante, il est essentiel de disposer de systèmes de prévision précis pour estimer la quantité d'électricité qui sera injectée sur le réseau à partir de sources telles que le solaire et l'éolien.

Cela permet de planifier la production conventionnelle et les besoins de stockage d'énergie pour compenser les fluctuations.

IV.2.2. Intégration des ressources distribuées

Les réseaux électriques doivent être conçus pour intégrer efficacement les ressources distribuées, y compris les systèmes solaires photovoltaïques, les éoliennes et les systèmes de stockage d'énergie, tout en maintenant la stabilité et la fiabilité du réseau.

IV.2.3. Flexibilité et réactivité du réseau

Des mécanismes de flexibilité doivent être mis en place pour faire face aux variations rapides de la production décentralisée.

Cela peut inclure des systèmes de stockage d'énergie, des centrales électriques flexibles, des dispositifs de régulation de tension et de fréquence, ainsi que des mécanismes de gestion de la demande.

IV.2.4. Contrôle et gestion avancés du réseau

Les réseaux intelligents (smart-grids) peuvent jouer un rôle crucial dans la gestion des productions électriques décentralisées.

Les technologies de contrôle avancées, telles que l'automatisation des réseaux, les systèmes de gestion de l'énergie et les réseaux de communication bidirectionnels, peuvent aider à optimiser l'utilisation des ressources distribuées et à améliorer l'efficacité opérationnelle du réseau.

IV.2.5. Tarification et incitations

Des mécanismes tarifaires appropriés doivent être mis en place pour refléter la valeur temporelle et spatiale de la production décentralisée.

Cela peut encourager les comportements qui favorisent l'intégration efficace des ressources distribuées et la réduction des pointes de demande.

IV.2.6. Réglementation et politiques publiques

Les réglementations et les politiques publiques doivent être adaptées pour encourager le déploiement des productions électriques décentralisées tout en assurant la sécurité, la fiabilité et l'équité du système électrique dans son ensemble.

Globalement, la gestion en présence d'un fort taux d'insertion des productions électriques décentralisées nécessite une approche intégrée qui combine la planification efficace du réseau, les technologies avancées de contrôle et de gestion, ainsi que des incitations économiques appropriées. Ce défi peut être surmonté avec une collaboration étroite entre les opérateurs de réseaux, les gouvernements, l'industrie et d'autres parties prenantes du secteur de l'énergie.

IV.3. Les surcoûts techniques liés l'intermittence

L'intermittence des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, peut entraîner des surcoûts techniques dans la gestion du système électrique.

Cela comprend les coûts associés à l'intégration de moyens de stockage, à la mise en œuvre de solutions de gestion de la charge, et à l'adaptation des infrastructures pour gérer les fluctuations rapides de la production.

Les surcoûts techniques liés à l'intermittence des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, peuvent être un défi pour les opérateurs de réseaux électriques et les planificateurs énergétiques.

Voici quelques-uns des surcoûts techniques associés à l'intermittence :

IV.3.1. Renforcement du réseau électrique

L'intermittence de la production d'énergie renouvelable peut nécessiter des investissements supplémentaires dans le renforcement et l'extension du réseau électrique pour transporter l'électricité des zones de production vers les zones de consommation. Par exemple, des lignes de transmission plus robustes ou de nouvelles infrastructures peuvent être nécessaires pour intégrer les parcs éoliens offshore ou les centrales solaires situées dans des zones éloignées.

IV.3.2. Stockage d'énergie

Pour lisser les variations de la production d'énergie renouvelable et fournir de l'électricité lors des périodes de faible production, des systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries, peuvent être nécessaires. Ces systèmes de stockage ajoutent des coûts

supplémentaires au système électrique en termes d'investissement initial, de maintenance et d'exploitation.

IV.3.3. Mécanismes de flexibilité

Les sources d'énergie intermittente nécessitent des mécanismes de flexibilité pour s'adapter aux variations rapides de la production. Cela peut inclure des centrales électriques flexibles capables de démarrer rapidement ou de modifier leur puissance de sortie en réponse aux fluctuations de la production renouvelable. Ces mécanismes de flexibilité peuvent également entraîner des coûts supplémentaires.

IV.3.4. Systèmes de contrôle avancés

Pour gérer efficacement l'intermittence des sources d'énergie renouvelable, des systèmes de contrôle avancés et des technologies de gestion de l'énergie peuvent être nécessaires. Cela inclut des investissements dans des réseaux intelligents, des systèmes de prévision météorologique améliorés et des algorithmes de gestion de l'énergie sophistiqués.

IV.3.5. Pertes d'énergie et inefficacités de fonctionnement

L'intermittence peut également entraîner des pertes d'énergie et des inefficacités de fonctionnement dans le réseau électrique. Par exemple, lorsque des sources d'énergie renouvelable sont coupées en raison de conditions météorologiques défavorables, cela peut entraîner des pertes d'énergie non produite et des inefficacités opérationnelles dans les centrales électriques conventionnelles qui doivent compenser ces variations.

Comme conclusion, on peut dire que les surcoûts techniques liés à l'intermittence des sources d'énergie renouvelable peuvent être significatifs et doivent être pris en compte lors de la planification et de l'exploitation des systèmes électriques. Une approche intégrée, combinant des investissements dans le réseau, le stockage d'énergie, la flexibilité du système et les technologies de contrôle, est essentielle pour atténuer ces surcoûts et assurer une transition efficace vers un système énergétique plus durable et résilient.

IV.4. Méthodologie de gestion des situations critiques

✚ La gestion des situations critiques dans les infrastructures électriques implique l'identification précoce des risques potentiels, la mise en place de stratégies de prévention et de mitigation, ainsi que des plans d'intervention d'urgence. Des outils de surveillance avancés, des algorithmes de prévision et des protocoles de communication efficaces sont essentiels pour une gestion efficace des crises.

✚ La gestion des situations critiques dans le contexte de la production et de la distribution d'énergie électrique implique une approche méthodique et proactive pour identifier, évaluer et répondre aux menaces potentielles pour la sécurité, la fiabilité et la disponibilité du réseau électrique. Voici une méthodologie générale pour la gestion des situations critiques dans ce domaine :

IV.4.1. Identification des risques potentiels

✚ Identifier les risques potentiels pour le réseau électrique, y compris les pannes d'équipement, les conditions météorologiques extrêmes, les cyber-attaques, les pannes de communication, etc.

✚ Évaluer l'impact de ces risques sur la sécurité et la fiabilité du réseau, ainsi que sur la satisfaction des besoins en électricité des clients.

IV.4.2. Évaluation de la criticité des scénarios :

✚ Évaluer la probabilité d'occurrence de chaque scénario critique identifié.

✚ Estimer les conséquences potentielles de chaque scénario sur le fonctionnement du réseau, y compris les perturbations pour les clients, les pertes économiques, les impacts environnementaux, etc.

IV.4.3. Développement de plans d'intervention d'urgence :

✚ Développer des plans d'intervention d'urgence détaillés pour répondre à chaque scénario critique identifié.

✚ Définir les responsabilités, les actions à entreprendre, les ressources nécessaires et les protocoles de communication pour chaque plan d'intervention.

IV.4.4. Mise en œuvre de mesures préventives :

✚ Mettre en œuvre des mesures préventives pour réduire les risques de survenue des scénarios critiques, telles que la maintenance préventive de l'équipement, les tests de sécurité, les mesures de cyber sécurité, etc.

IV.4.5. Déploiement de systèmes de surveillance et de contrôle :

✚ Déployer des systèmes de surveillance avancés pour détecter les signes précoces de situations critiques et prendre des mesures préventives avant que les problèmes ne s'aggravent.

✚ Mettre en place des systèmes de contrôle automatisés pour réagir rapidement aux incidents et limiter leur propagation.

IV.4.6. Formation et exercices d'urgence

- ✚ Former le personnel aux procédures d'intervention d'urgence et aux meilleures pratiques en matière de gestion des situations critiques.
- ✚ Organiser régulièrement des exercices d'urgence pour tester les plans d'intervention, identifier les lacunes et améliorer la préparation du personnel.

IV.4.7. Analyse post-incident et amélioration continue

- ✚ Effectuer des analyses post-incidentes pour évaluer l'efficacité des plans d'intervention d'urgence et identifier les opportunités d'amélioration.
- ✚ Mettre en œuvre des mesures correctives et des actions d'amélioration continue pour renforcer la résilience et la fiabilité du réseau électrique.

En suivant cette méthodologie, les opérateurs de réseaux électriques peuvent mieux prévenir, détecter et gérer les situations critiques, réduisant ainsi les risques pour la sécurité et la fiabilité du réseau électrique tout en assurant la satisfaction des besoins en électricité des clients.

IV.5. Intérêt du stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie (voir figure IV.2) joue un rôle crucial dans la gestion des infrastructures critiques du système électrique, en permettant de lisser les fluctuations de la production et de la demande, de fournir des services de régulation de fréquence et de contribuer à la résilience du réseau en cas de défaillance. Les technologies de stockage telles que les batteries, les super-condensateurs et les systèmes de stockage thermique gagnent en importance pour répondre aux besoins croissants du réseau. Il est l'énergie présente plusieurs avantages significatifs dans le contexte de la transition vers des systèmes énergétiques plus durables et résilients.

Voici quelques-uns des principaux intérêts du stockage de l'énergie :

IV.5.1. Gestion des intermittences des sources d'énergie renouvelable

Le stockage de l'énergie permet de lisser les variations de la production des sources d'énergie renouvelable intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne.

En stockant l'énergie produite pendant les périodes de forte production et en la libérant pendant les périodes de faible production, le stockage contribue à stabiliser le réseau électrique et à garantir un approvisionnement constant en électricité.

IV.5.2. Optimisation de l'utilisation des ressources renouvelables

En permettant de stocker l'énergie produite par les sources renouvelables lorsqu'elle est abondante et bon marché, le stockage permet d'optimiser l'utilisation de ces ressources.

Cela contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à promouvoir une transition vers une énergie plus propre et plus durable.

IV.5.3. Réduction des pointes de demande

Le stockage de l'énergie peut être utilisé pour répondre aux pointes de demande d'électricité, ce qui permet d'éviter la construction de nouvelles infrastructures coûteuses pour répondre à ces pointes temporaires.

Cela peut également contribuer à réduire les coûts d'exploitation du système électrique en évitant l'utilisation de centrales électriques moins efficaces et plus polluantes pendant les périodes de pointe.

IV.5.4. Amélioration de la stabilité et de la fiabilité du réseau

En fournissant des capacités de réserve et de régulation rapides, le stockage de l'énergie peut contribuer à améliorer la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.

Il peut également fournir des services auxiliaires tels que la régulation de la fréquence et de la tension, ce qui est essentiel pour maintenir un fonctionnement sûr et stable du réseau.

IV.5.5. Flexibilité et adaptation aux besoins changeants

Le stockage de l'énergie offre une grande flexibilité et peut être utilisé dans une variété d'applications et de configurations, allant des petites installations domestiques aux grands systèmes de stockage à l'échelle du réseau.

Cela permet de répondre aux besoins changeants du système électrique et de s'adapter aux évolutions technologiques et aux conditions du marché.

En résumé, le stockage de l'énergie joue un rôle crucial dans la transition vers un système énergétique plus durable, résilient et efficient.

En combinant les avantages du stockage avec le déploiement croissant des sources d'énergie renouvelable, il offre des solutions pour relever les défis de l'intermittence, des pointes de demande et de la stabilité du réseau électrique, tout en favorisant une utilisation plus efficace et plus propre de l'énergie.

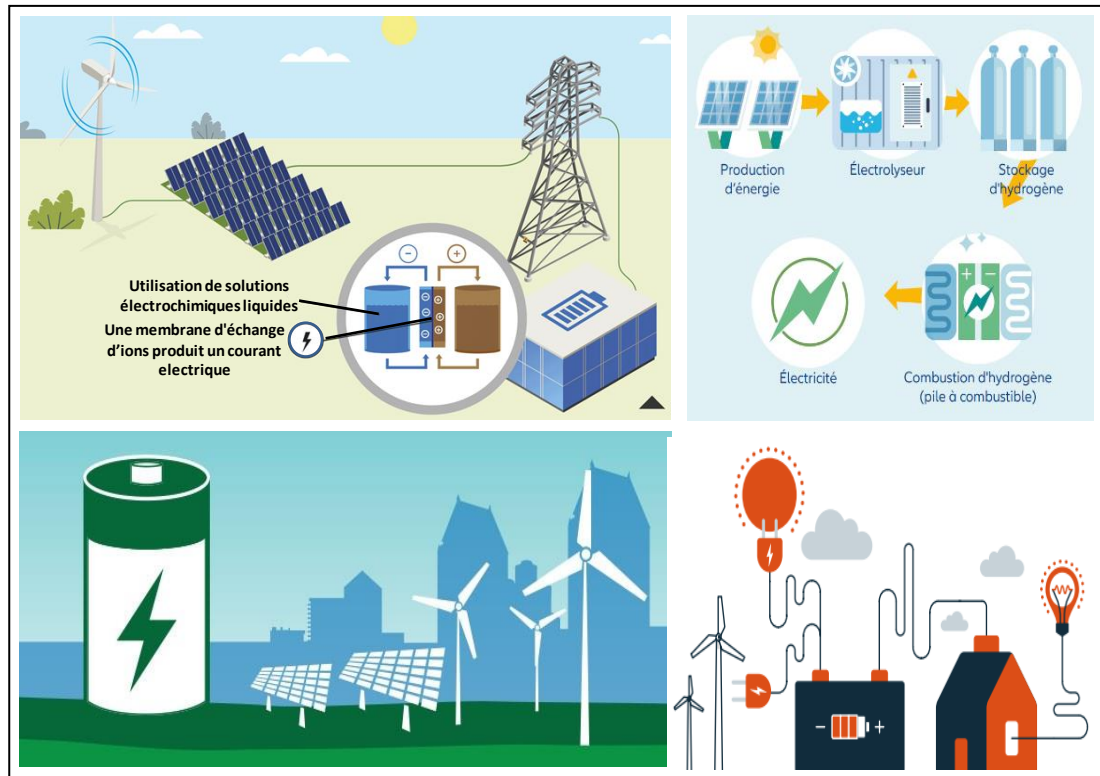


Figure IV.2. Stockage d'énergie.

IV.6. Ilotage

L'ilotage des infrastructures électriques permet de maintenir la fourniture d'électricité dans des zones isolées en cas de déconnexion du réseau principal. Cette technique est particulièrement utile dans les situations d'urgence ou lors de travaux de maintenance, assurant ainsi la continuité de service pour les utilisateurs finaux.

L'ilotage est une stratégie utilisée dans la gestion des réseaux électriques qui consiste à isoler une partie du réseau en cas de panne ou de perturbation, afin de maintenir l'alimentation électrique dans cette zone spécifique.

Cette technique est souvent utilisée dans les réseaux électriques pour garantir la continuité de l'alimentation dans les zones critiques ou sensibles, même en cas de problème sur le réseau principal.

Voici comment fonctionne généralement le processus d'ilotage :

IV.6.1. Détection de la perturbation

Lorsqu'une perturbation, telle qu'une panne d'équipement ou une coupure de ligne, est détectée sur le réseau électrique, les dispositifs de surveillance et de contrôle automatiques peuvent identifier la zone affectée.

IV.6.2. Isolation de la zone

Les dispositifs de commutation automatique ou les relais de protection sont utilisés pour isoler la zone touchée du reste du réseau. Cela peut impliquer la fermeture de disjoncteurs ou de sectionneurs pour empêcher la propagation de la perturbation vers d'autres parties du réseau.

IV.6.3. Fourniture d'électricité locale

Une fois que la zone a été isolée, des sources d'énergie alternatives, telles que des groupes électrogènes locaux, des systèmes de stockage d'énergie ou des micro-réseaux, peuvent être activées pour fournir de l'électricité aux clients dans cette zone.

IV.6.4. Surveillance et rétablissement du réseau principal

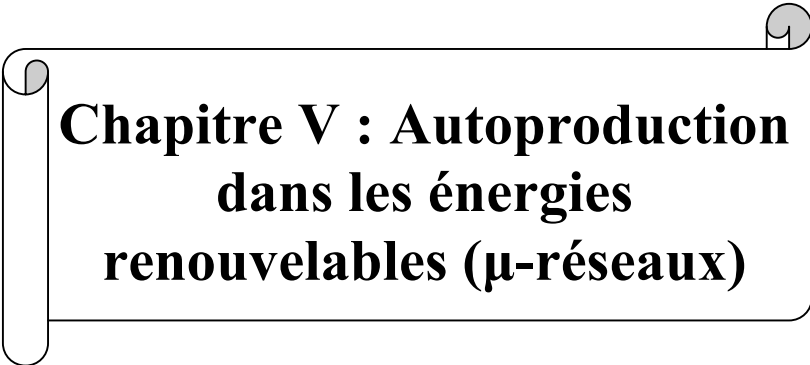
Pendant que la zone isolée est alimentée localement, les opérateurs du réseau travaillent pour identifier et réparer la cause de la perturbation sur le réseau principal. Une fois que la situation est résolue, la zone isolée peut être réintégrée dans le réseau principal.

L'îlotage est souvent utilisé dans les situations d'urgence, telles que les tempêtes, les pannes d'équipement ou les catastrophes naturelles, où il est important de maintenir l'alimentation électrique dans des zones critiques, telles que les hôpitaux, les centres de données ou les infrastructures vitales. Cela permet de minimiser les interruptions de service et d'assurer la sécurité et le bien-être des personnes affectées.

IV.7. Conclusion

Les infrastructures critiques du système électrique font face à des défis complexes liés à l'insertion croissante de la production électrique décentralisée et à l'intermittence des sources d'énergie renouvelables. La mise en œuvre de stratégies de gestion efficaces, l'utilisation de technologies de stockage avancées et le développement de protocoles d'intervention d'urgence sont essentiels pour assurer la fiabilité, la stabilité et la résilience du réseau électrique dans un environnement en évolution constante.





**Chapitre V : Autoproduction
dans les énergies
renouvelables (μ -réseaux)**

V.1. Introduction

Un micro-réseau est un réseau électrique autonome qui vous permet de générer votre propre électricité sur site et un système autonome composé d'une charge, d'une production distribuée et d'un système de stockage d'énergie.

Les systèmes modernes sont devenus de plus en plus complexes, en particulier les systèmes d'alimentation électrique.

Au niveau de la structure physique de base et de l'équipement, tous les types de Système

D'interconnexion Énergétique (SIE) sont fondamentalement les mêmes, couvrant généralement l'alimentation électrique intégrée, le chauffage, le refroidissement, l'approvisionnement en gaz, l'approvisionnement en hydrogène et d'autres systèmes énergétiques ainsi que les infrastructures de communication et d'information connexes. Une structure de micro-réseau typique est illustrée à la figure V.1.

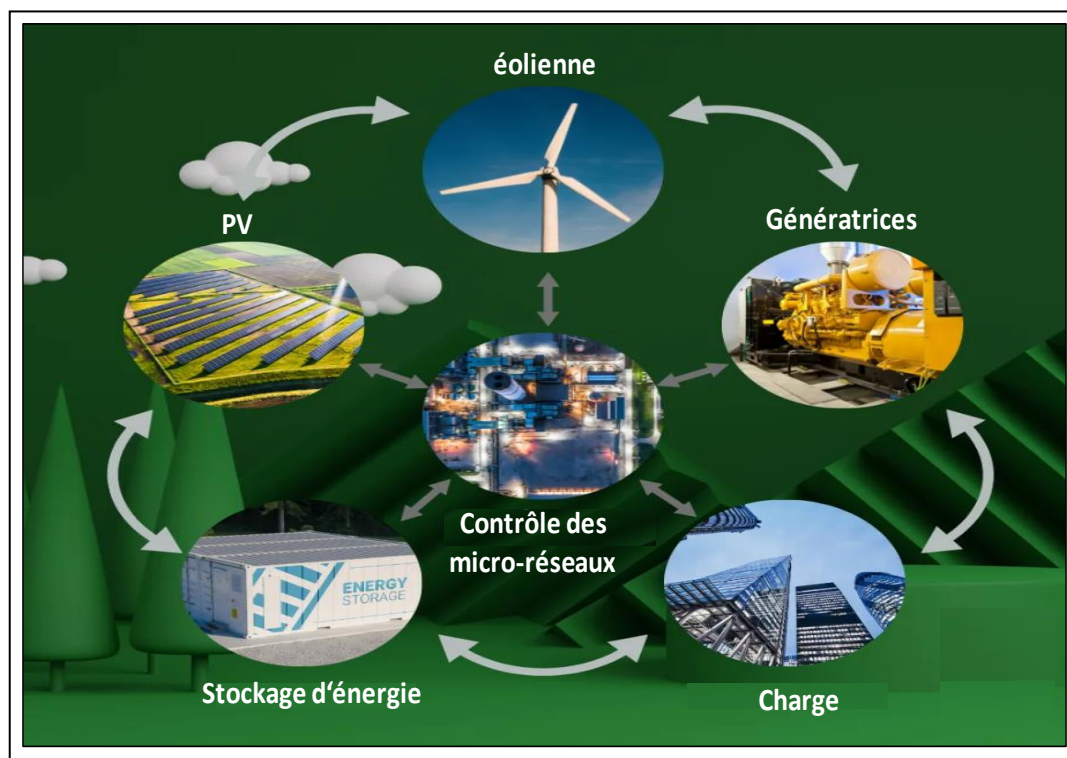


Figure V.1. Illustration d'un micro-réseau.

Les micro-réseaux sont des systèmes énergétiques localisés qui peuvent fonctionner indépendamment ou en conjonction avec le réseau principal, intégrant diverses sources de production d'énergie, des dispositifs de stockage et des charges locales. Dans la partie suivante un aperçu du concept et du fonctionnement des micro-réseaux.

V.2. Concept de Micro-réseaux

Les micro-réseaux sont conçus pour fournir de l'électricité de manière autonome à un groupe spécifique de consommateurs, tels que des bâtiments, des zones résidentielles, des installations industrielles ou des régions éloignées.

Ils peuvent fonctionner en mode îloté lorsqu'ils sont déconnectés du réseau principal, ou en mode connecté au réseau pour échanger de l'électricité avec celui-ci. Les micro-réseaux offrent une flexibilité opérationnelle et une résilience accrue en cas de panne de réseau.

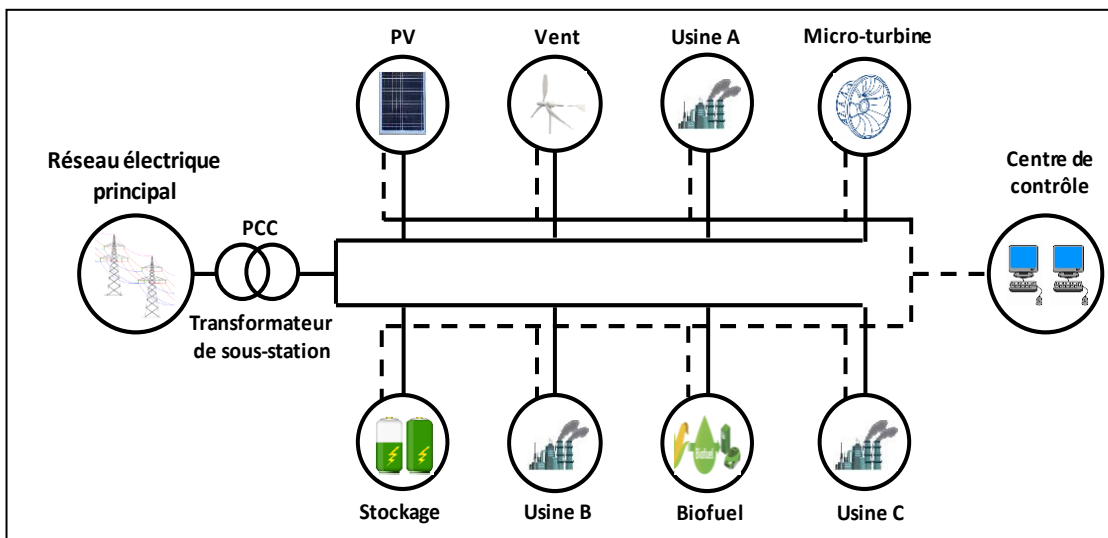


Figure V.2. Structure d'un système micro-grid.

V.3. Composants des micro-réseaux

V.3.1. Sources de production

Les micro-réseaux intègrent diverses sources de production d'énergie, telles que des panneaux solaires, des éoliennes, des générateurs diesel, des piles à combustible, des micro-turbines, etc. Ces sources peuvent être renouvelables ou conventionnelles.

V.3.2. Stockage d'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries, les volants d'inertie, les super condensateurs, jouent un rôle clé dans les micro-réseaux en stockant l'excès d'énergie pour une utilisation ultérieure en cas de besoin.

V.3.3. Charges locales

Les charges locales représentent les équipements et les utilisateurs finaux qui consomment l'électricité produite localement. Il peut s'agir de bâtiments, d'appareils électroménagers, d'éclairage, etc.

V.4. Mode de fonctionnement des Micro-réseaux

✚ Les micro-réseaux sont gérés par des systèmes de contrôle avancés qui supervisent et coordonnent la production, le stockage et la distribution d'énergie. Ces systèmes utilisent des algorithmes intelligents pour optimiser les flux d'énergie en fonction des besoins et des conditions du réseau.

✚ En cas de déconnexion du réseau principal, les micro-réseaux peuvent passer en mode îloté et continuer à fournir de l'électricité aux charges critiques en utilisant des sources de production locales et des dispositifs de stockage. (Les Micro-réseaux en mode îlot, sont des Micro-réseaux isolés des autres réseaux de production d'électricité capables d'alimenter une seule installation ou plusieurs utilisateurs).

✚ Lorsqu'ils sont connectés au réseau principal, les micro-réseaux peuvent participer à des programmes de réponse à la demande, fournir des services auxiliaires au réseau ou même vendre l'électricité excédentaire produite localement.

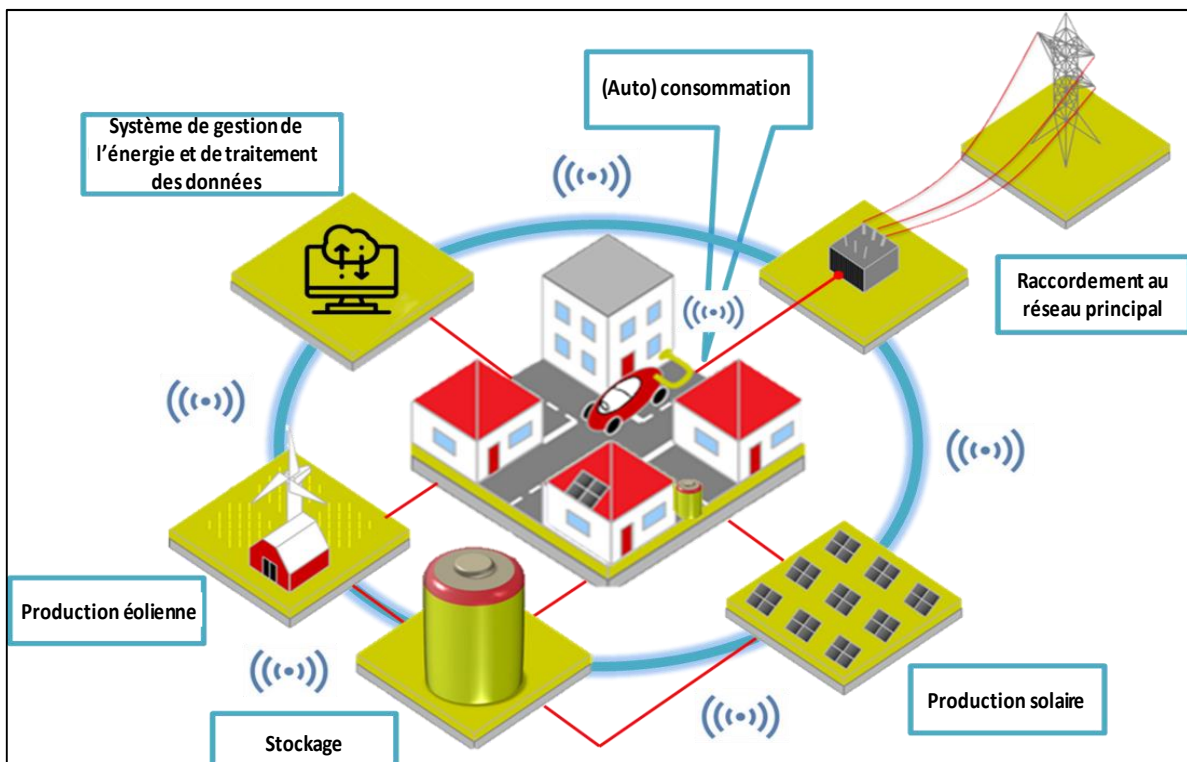


Figure V.3. Fonctionnement d'un système micro-réseau.

V.5. Technologies de génération

Il regroupe plusieurs sites de production locaux et dispersés (piles à combustible, micro-turbines, panneaux photovoltaïques, petits générateurs diesel, petite hydraulique, éoliennes), Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution.

V.5.1. Micro-turbines

Les micro-turbines sont des turbines à combustion compactes qui peuvent générer de l'énergie efficacement et conviennent aux zones soumises à des contrôles stricts de la pollution. Ils peuvent être utilisés pour la production d'électricité sur site, en particulier lorsqu'ils sont combinés avec des systèmes de chauffage et d'alimentation.

Le fonctionnement des micro-turbines dans un système de micro-réseau implique les principes suivants :

+ Production d'électricité

Les micro-turbines fonctionnent sur le cycle de Brayton, où l'air atmosphérique est comprimé, chauffé en brûlant du carburant (comme du gaz naturel), puis utilisé pour entraîner une turbine de détente connectée à un générateur électrique. Ce processus convertit l'énergie de la combustion du carburant en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique par le générateur.

+ Récupération de chaleur

Dans un système de micro-réseau, la chaleur d'échappement produite par la micro-turbine peut être utilisée à diverses fins telles que la production de vapeur, d'eau chaude ou d'eau glacée grâce à des systèmes de récupération de chaleur. Cela permet une utilisation efficace de la chaleur perdue générée pendant le processus de production d'électricité.

❖ **Fonctionnement de la cogénération** : Les micro-turbines sont bien adaptées aux applications de cogénération dans les systèmes de micro-réseaux car elles peuvent utiliser efficacement la chaleur générée lors de la production d'électricité à des fins de chauffage ou de refroidissement. Cette production combinée d'électricité et d'énergie thermique utile augmente l'efficacité globale du système.

❖ **Intégration avec le stockage d'énergie** : Dans un système de micro-réseau, les micro-turbines peuvent être intégrées à des systèmes de stockage d'énergie pour améliorer la stabilité et la fiabilité du réseau. Les technologies de stockage d'énergie telles que les batteries peuvent stocker l'électricité excédentaire générée par les micro-turbines pour une utilisation ultérieure lorsque la demande est élevée ou lorsque les micro-turbines ne fonctionnent pas à pleine capacité.

❖ **Interconnexion du réseau et capacité d'ilotage** : Les micro-turbines d'un système de micro-réseau peuvent être interconnectées avec le réseau principal pour échanger de l'électricité en fonction des conditions de la demande et de l'offre. De plus, les systèmes de

micro-réseaux avec micro-turbines ont la capacité de fonctionner en mode îloté, fournissant de l'énergie de manière indépendante en cas de panne de réseau ou d'urgence.

❖ **Contrôle et surveillance** : Des systèmes de contrôle avancés sont utilisés pour surveiller et gérer le fonctionnement des micro-turbines dans un système de micro-réseau. Ces systèmes de contrôle optimisent les performances des micro-turbines, gèrent le flux d'énergie au sein du micro-réseau et garantissent la stabilité et la fiabilité du réseau.

Dans l'ensemble, l'exploitation de micro-turbines dans un système de micro-réseau implique une production d'électricité efficace, une récupération de chaleur, un fonctionnement combiné de chaleur et d'électricité, une intégration avec le stockage d'énergie, une interconnexion au réseau, une capacité d'îlotage et des systèmes avancés de contrôle et de surveillance pour assurer une alimentation électrique fiable et durable.

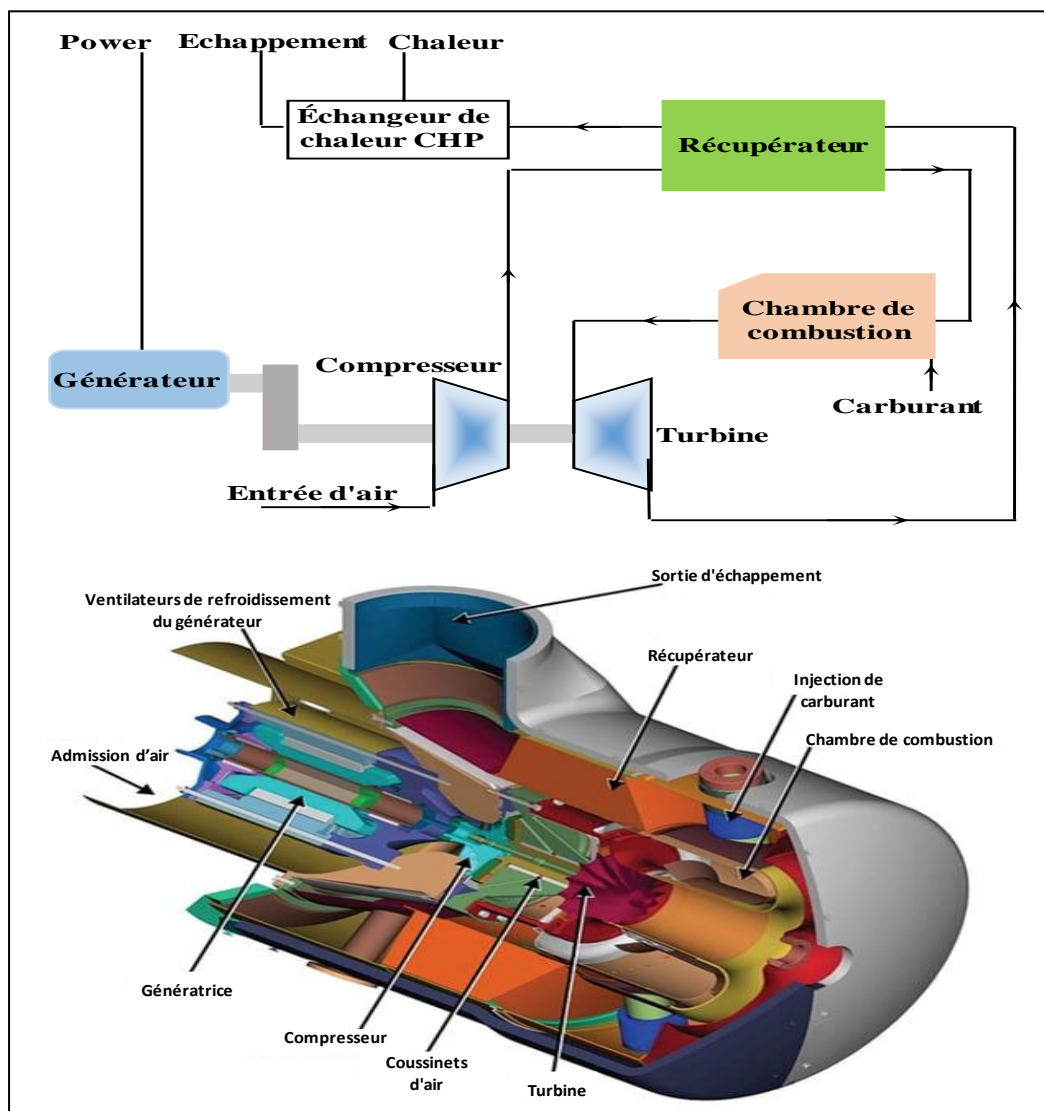


Figure V.4. Système d'une micro-turbine.

V.5.2. Les piles à combustible

Les piles à combustible dans un système de micro-réseau fonctionnent en convertissant l'énergie chimique des combustibles riches en hydrogène, tels que le gaz naturel propre ou le biogaz renouvelable, en énergie électrique et en chaleur de haute qualité grâce à un processus électrochimique. Semblable à une batterie, une pile à combustible se compose de nombreuses cellules individuelles qui forment une pile. Lorsque le carburant riche en hydrogène pénètre dans la pile à combustible, il réagit électro-chimiquement avec l'oxygène pour produire du courant électrique, de la chaleur et de l'eau.

Ce processus est pratiquement exempt de polluants et n'implique pas de combustion, ce qui permet une production d'énergie propre et efficace. La pile à combustible peut fonctionner en continu tant que l'alimentation en carburant est maintenue, ce qui en fait une source fiable d'alimentation continue pour le micro-réseau.

Le logiciel de contrôle intelligent micro-grids gère le fonctionnement de la pile à combustible et sa relation avec d'autres ressources énergétiques, garantissant que le client reçoit l'énergie la plus efficace et la plus économique à tout moment.



Figure V.5. Application pour un système pile à combustible

V.5.3. Petits générateurs diesel

Les petits générateurs diesel sont couramment utilisés pour la production d'électricité de secours, les applications hors réseau et dans les endroits éloignés où l'accès au réseau principal est limité.

Voici un aperçu du fonctionnement des petits générateurs diesel:

+ Composants de Base

- Un petit générateur diesel se compose généralement d'un moteur diesel et d'un alternateur (générateur) montés sur une base commune.
- Le moteur diesel est chargé de convertir l'énergie chimique du carburant diesel en énergie mécanique.
- L'alternateur convertit l'énergie mécanique du moteur en énergie électrique.

+ Combustion de carburant

Le fonctionnement d'un générateur diesel commence par l'injection de carburant diesel dans la chambre de combustion du moteur diesel.

- Le carburant est enflammé par la chaleur générée lors de la compression dans le cylindre, car les moteurs diesel fonctionnent selon le principe de l'allumage par compression (cycle diesel).
- La combustion du carburant diesel produit des gaz à haute pression qui entraînent le piston vers le bas, convertissant l'énergie chimique en énergie mécanique pour faire tourner le vilebrequin.

+ Production d'électricité

- Lorsque le vilebrequin tourne, il entraîne l'alternateur qui lui est connecté, ce qui génère de l'électricité grâce au principe de l'induction électromagnétique.
- L'alternateur produit un courant alternatif (AC), qui peut être utilisé directement ou converti en courant continu (DC) à l'aide d'un redresseur pour des applications spécifiques.

+ Régulation et contrôle de tension

- Les petits générateurs diesel sont équipés de régulateurs de tension pour maintenir une tension de sortie stable dans des limites acceptables.
- Les systèmes de contrôle des générateurs diesel modernes surveillent les paramètres tels que la tension, la fréquence et la charge pour assurer un fonctionnement efficace et fiable.

+ Refroidissement et lubrification

- Les moteurs diesel nécessitent des systèmes de refroidissement pour dissiper la chaleur générée pendant la combustion et le fonctionnement.
- Les systèmes de lubrification sont essentiels pour réduire les frottements entre les pièces mobiles et assurer la longévité et l'efficacité du moteur.

+ Entretien et approvisionnement en carburant

- Un entretien régulier, y compris des vidanges d'huile, des remplacements de filtres et des inspections périodiques, est crucial pour assurer le bon fonctionnement d'un petit générateur diesel.
- L'alimentation en carburant diesel est essentielle au fonctionnement continu du générateur, et la qualité du carburant peut avoir un impact sur les performances et la longévité.

V.5.4. Les cellules photovoltaïques (PV)

Communément appelées cellules solaires, convertissent directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Voici un aperçu du fonctionnement des cellules photovoltaïques:

+ Principe de base

- Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, qui peuvent absorber les photons (particules lumineuses) de la lumière du soleil.
- Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule **Photovoltaïque**, les photons transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, ce qui les rend excités et crée des paires électron-trou.

+ Production d'électricité

- Les électrons sous tension traversent le matériau, créant un courant électrique. Ce flux d'électrons est l'électricité à courant continu (DC) générée par la cellule photovoltaïque.
- L'électricité à DC produite par la cellule photovoltaïque peut être utilisée pour alimenter directement des appareils électriques ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

+ Conversion à l'électricité alternative

- Dans la plupart des applications, l'électricité DC générée par les cellules photovoltaïques doit être convertie en courant alternatif (AC) pour une utilisation dans les systèmes électriques domestiques ou commerciaux.
- Cette conversion est généralement effectuée à l'aide d'onduleurs, qui convertissent l'électricité DC des cellules photovoltaïques en électricité AC qui correspond à la fréquence standard du réseau électrique (généralement 60 Hz).

✚ Intégration du Système

- Les cellules photovoltaïques sont souvent connectées en série ou en parallèle pour former des modules ou des panneaux photovoltaïques. Plusieurs panneaux peuvent être connectés pour former un tableau PV, augmentant ainsi la puissance de sortie totale.
- Les panneaux photovoltaïques sont généralement installés sur les toits, les structures montées au sol ou intégrés dans les matériaux de construction pour capter efficacement la lumière du soleil.

✚ Fonctionnement dans des systèmes autonomes

- Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, tels que les installations hors réseau ou les applications à distance, des dispositifs de stockage d'énergie tels que des batteries sont utilisés pour stocker l'électricité excédentaire générée pendant les périodes ensoleillées pour une utilisation lorsque la lumière du soleil n'est pas disponible.
- Les contrôleurs de charge sont utilisés pour réguler la charge des batteries et éviter les surcharges ou les décharges profondes.

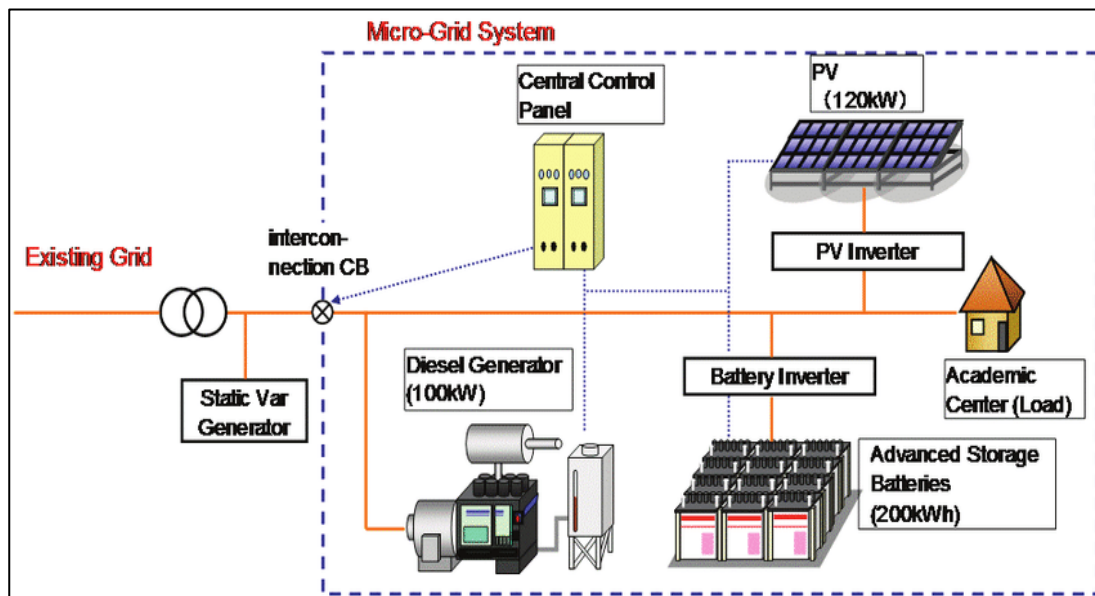


Figure V.6. Structure d'un système micro-PV.

✚ Avantages environnementaux

- Les cellules Photovoltaïques génèrent de l'électricité sans produire d'émissions de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques, ce qui en fait une source d'énergie propre et durable.
- L'énergie solaire est abondante et renouvelable, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à un mix énergétique plus vert.

V.5.5. Éoliennes

Les éoliennes dans un système de micro-réseau fonctionnent en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il fonctionne la nuit, pendant les saisons des pluies et en hiver, complétant l'énergie solaire disponible dans les systèmes de micro-réseaux hors réseau avec des fonctions ci-dessous :

✚ Conversion de l'Énergie Éolienne

- Les éoliennes sont constituées de pales de rotor attachées à un moyeu, qui est connecté à un générateur. Lorsque le vent souffle, il fait tourner les pales du rotor.
- La rotation des pales entraîne le générateur, qui convertit l'énergie mécanique des pales rotatives en énergie électrique.

✚ Production d'électricité

- Le générateur à l'intérieur de l'éolienne produit de l'électricité à courant alternatif (AC). Cette électricité se présente généralement sous la forme d'une alimentation alternative à fréquence variable.
- L'électricité alternative générée par l'éolienne est ensuite introduite dans le système électrique du micro-réseau pour la distribution et l'utilisation.

✚ Intégration avec le micro-réseau

- Dans un système de micro-réseau, l'électricité générée par l'éolienne peut être utilisée pour alimenter des charges locales au sein du micro-réseau.
- L'électricité excédentaire générée par l'éolienne peut être stockée dans des systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries ou des super-condensateurs, pour une utilisation lorsque la vitesse du vent est faible ou lorsque la demande dépasse la production.

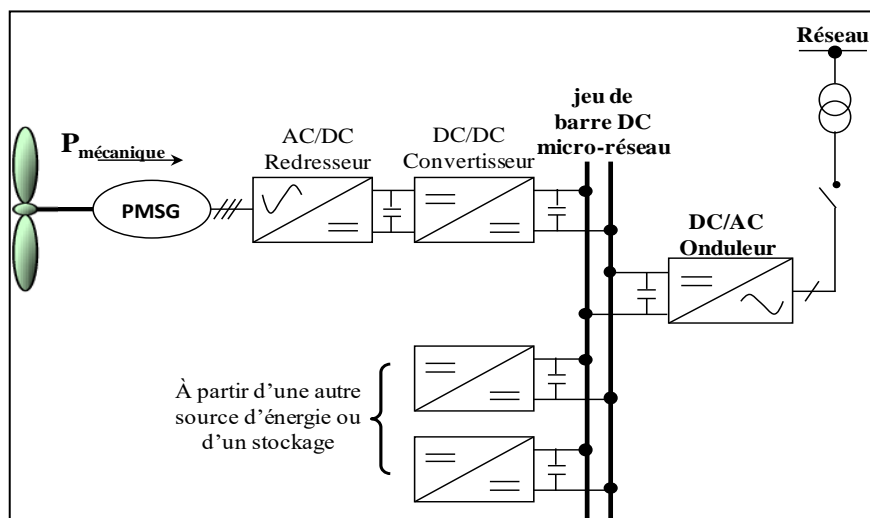


Figure V.7. Principe d'un système éolien.

✚ Gestion et contrôle de l'alimentation

- Les éoliennes dans un système de micro-réseau sont généralement équipées de systèmes de contrôle qui surveillent la vitesse du vent, la vitesse de la turbine et la puissance de sortie.
- Les systèmes de gestion de l'énergie optimisent le fonctionnement de l'éolienne pour maximiser la production d'énergie tout en assurant la stabilité et la fiabilité du réseau.

✚ Interaction avec la Grille

- Dans certains systèmes de micro-réseaux, les éoliennes peuvent être connectées au réseau principal pour exporter l'électricité excédentaire lorsque la demande locale est faible et pour importer de l'électricité lorsque la production est insuffisante.
- Les éoliennes reliées au réseau peuvent contribuer à la stabilité du réseau et soutenir le réseau principal pendant les périodes de pointe de la demande.

✚ Génération d'énergie de Secours

- Les éoliennes peuvent servir de source fiable d'alimentation de secours dans les systèmes de micro-réseaux, en particulier dans les endroits éloignés ou hors réseau où l'accès au réseau principal est limité.
- Pendant les pannes de réseau ou lorsque les sources d'énergie renouvelables telles que les panneaux solaires ne génèrent pas suffisamment d'énergie, les éoliennes peuvent fournir un approvisionnement continu en électricité.

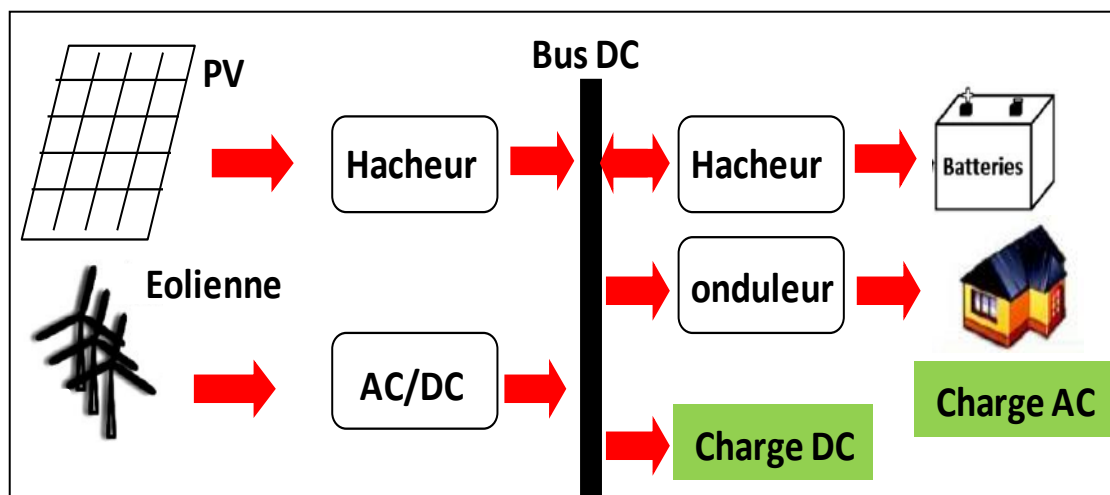


Figure V.8. Système éolienne-PV.

V.6. Exploitation et contrôle des micro-réseaux

V.6.1. Stratégies d'Exploitation

Les micro-réseaux utilisent diverses stratégies d'exploitation pour assurer un fonctionnement efficace et fiable.

Certaines stratégies d'exploitation courantes comprennent:

+ Fonctionnement en îlotage

Les micro-réseaux peuvent fonctionner en mode îloté, où ils se déconnectent du réseau principal et fonctionnent de manière autonome. Cela leur permet de continuer à alimenter les charges locales pendant les pannes de réseau.

+ Fonctionnement connecté au réseau

En mode connecté au réseau, les micro-réseaux peuvent interagir avec le réseau principal pour échanger de l'énergie en fonction des conditions de la demande et de l'offre. Ce mode permet l'optimisation des ressources énergétiques et facilite les services de support au réseau.

+ Réponse à la demande

Les micro-réseaux peuvent mettre en œuvre des stratégies de réponse à la demande pour gérer la consommation d'électricité en fonction de la tarification en temps réel ou des conditions du réseau. Cela aide à équilibrer l'offre et la demande au sein du micro-réseau.

V.6.2. Systèmes de Contrôle

Les systèmes de contrôle jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des micro-réseaux en gérant les ressources de production, de stockage et de charge. Les composants clés des systèmes de contrôle dans les micro-réseaux comprennent:

+ Système de gestion de l'énergie (EMS)

EMS contrôle l'envoi des sources de production, des systèmes de stockage et des charges pour assurer un fonctionnement optimal et une utilisation efficace des ressources.

+ Électronique de puissance

Des dispositifs électroniques de puissance sont utilisés pour convertir et contrôler le flux d'électricité entre les différents composants du micro-réseau, tels que des onduleurs pour intégrer des sources d'énergie renouvelables.

+ Systèmes de communication

Les réseaux de communication permettent la surveillance et le contrôle en temps réel des composants du micro-réseau, facilitant la coordination et la prise de décision pour un fonctionnement efficace.

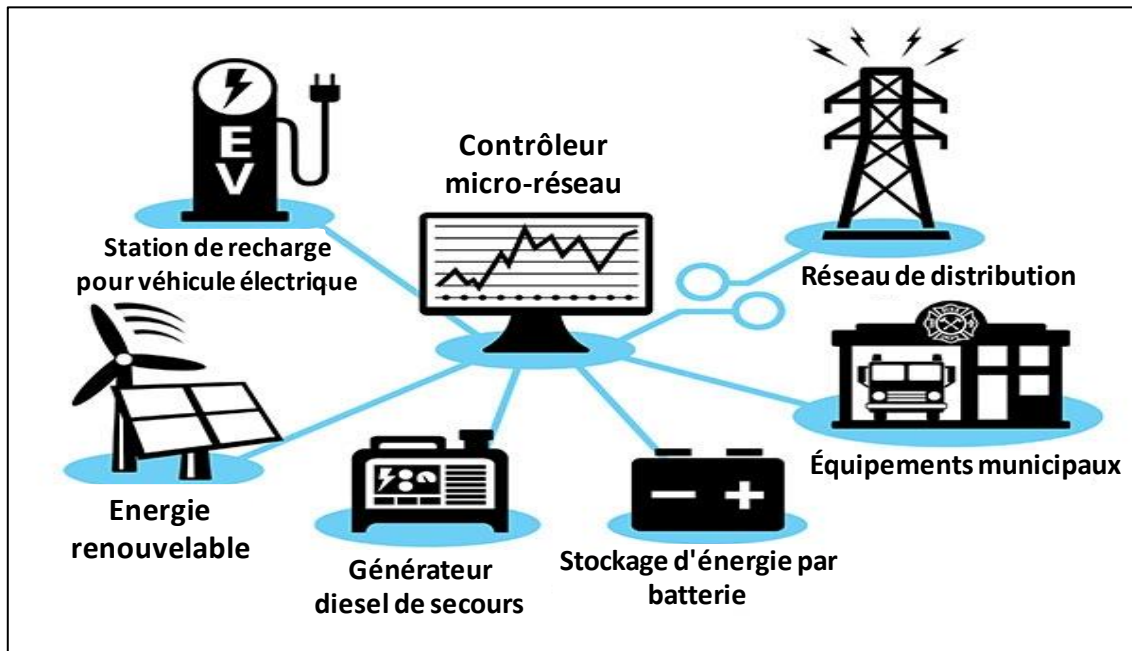


Figure V. 9. Contrôle d'un micro-réseau.

V.6.3. Défis de Fonctionnement et de Contrôle

L'exploitation et le contrôle des micro-réseaux présentent plusieurs défis qui doivent être relevés pour une mise en œuvre réussie. Certains défis communs incluent:

✚ Stabilité du réseau

Le maintien de la stabilité du réseau en mode îloté et la coordination avec le réseau principal pendant le fonctionnement connecté au réseau peuvent être difficiles en raison de la nature dynamique des sources d'énergie renouvelables.

✚ Cyber sécurité

La protection des systèmes de contrôle des micro-réseaux contre les cybers menaces est essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité du système électrique.

✚ Intégration des ressources énergétiques distribuées

La coordination du fonctionnement de diverses ressources énergétiques distribuées, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, les éoliennes et le stockage d'énergie, nécessite des stratégies de contrôle avancées pour optimiser les performances et la fiabilité.

Relever ces défis grâce à des stratégies de contrôle avancées, des systèmes de communication robustes et une coordination efficace peut améliorer le fonctionnement et le contrôle des micro-réseaux, conduisant à une efficacité, une fiabilité et une résilience accrues du système électrique.

V.7. Types de micro-réseaux

Il existe plusieurs types de micro-réseaux en fonction de leur configuration, de leurs sources d'énergie et de leurs caractéristiques opérationnelles. Certains types courants de micro-réseaux comprennent :

V.7. 1. Micro-réseaux Connectés au Réseau

Les micro-réseaux connectés au réseau sont connectés au réseau principal de distribution et peuvent échanger de l'électricité avec le réseau en fonction des conditions de la demande et de l'offre. Ils peuvent fonctionner en parallèle avec le réseau principal, offrant des avantages tels que des économies d'énergie, des services de support réseau et une fiabilité améliorée.

V.7. 2. Micro-réseaux en Îlots

Les micro-réseaux insulaires fonctionnent indépendamment du réseau principal et dépendent uniquement des ressources énergétiques locales pour la production d'électricité. Ils sont conçus pour fonctionner de manière autonome pendant les pannes de réseau ou les urgences, fournissant une alimentation continue aux charges critiques au sein du micro-réseau.

V.7. 3. Micro-réseaux hybrides

Les micro-réseaux hybrides combinent plusieurs sources de production d'énergie, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, les éoliennes, les générateurs diesel et les systèmes de stockage d'énergie. En intégrant diverses sources d'énergie, les micro-réseaux hybrides peuvent optimiser la production d'énergie, améliorer la fiabilité et réduire les émissions de carbone.

V.7. 4. Micro-réseaux AC

Les micro-réseaux AC fonctionnent en courant alternatif (AC) pour la distribution d'énergie et sont couramment utilisés dans les applications résidentielles, commerciales et industrielles. Ils utilisent des onduleurs pour convertir l'alimentation DC de sources telles que des panneaux solaires ou des batteries en courant alternatif pour une utilisation dans le réseau.

V.7. 5. Micro-réseaux DC

Les micro-réseaux DC distribuent l'énergie en utilisant le courant continu (DC) au lieu du courant alternatif. Les micro-réseaux DC sont efficaces pour certaines applications, telles que

les centres de données et les installations de télécommunications, où l'alimentation DC est directement compatible avec les charges et réduit les pertes de conversion.

V.7. 6. Micro-réseaux communautaires

Les micro-réseaux communautaires desservent un groupe de consommateurs interconnectés, tels que des quartiers résidentiels, des parcs industriels ou des campus universitaires. Ils permettent le partage des ressources énergétiques, le commerce entre pairs et la gestion localisée de l'énergie au sein de la communauté.

V.7. 7. Micro-réseaux distants

Les micro-réseaux distants sont déployés dans des endroits isolés ou hors réseau où l'accès au réseau principal est limité. Ils s'appuient sur des sources d'énergies renouvelables, un stockage d'énergie et des systèmes de contrôle avancés pour fournir une alimentation électrique fiable et durable aux communautés ou installations éloignées.

Ces différents types de micro-réseaux répondent à des besoins et des exigences spécifiques dans diverses applications, offrant des solutions personnalisées pour la production, la distribution et la gestion de l'énergie. Le choix du type de micro-réseau dépend de facteurs tels que l'emplacement, les ressources énergétiques, les caractéristiques de charge et les capacités opérationnelles souhaitées.

V.8. Micro-réseaux hybrides avec production et accumulation distribués

V.8.1. Intégration des sources d'énergie renouvelables

Les micro-réseaux hybrides combinent des sources d'énergie conventionnelles et renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique pour améliorer la durabilité et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

V.8.2. Systèmes de stockage d'énergie

L'incorporation de systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries et des volants d'inertie, dans des micro-réseaux hybrides permet une gestion efficace de la production fluctuante d'énergie renouvelable et améliore la stabilité du réseau.

V.8.3. Avantages des micro-grids hybrides

Les micro-grids hybrides offrent des avantages tels qu'une efficacité énergétique améliorée, une réduction des émissions de carbone, une résilience accrue du réseau et des économies de coûts grâce à une gestion optimisée de l'énergie.

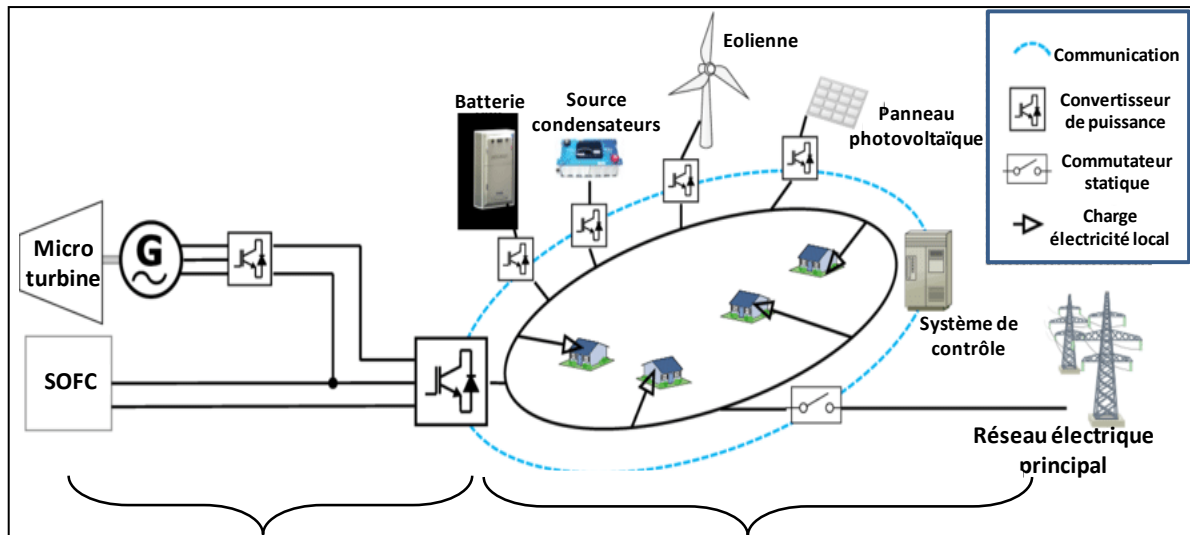


Figure V.10. Micro-réseau hybride.

V.9. Surveillance et Enregistrement des Données

Une surveillance et un enregistrement efficaces des données sont essentiels au fonctionnement et à la gestion efficace des micro-réseaux. Les aspects clés de la surveillance et de l'enregistrement des données dans les applications de micro-réseaux comprennent :

V.9.1. Importance du suivi des données

Le suivi des données fournit des informations en temps réel sur la production, la consommation et le stockage d'énergie au sein du micro-réseau, permettant aux opérateurs de prendre des décisions éclairées pour des performances optimales du système.

Les données de surveillance aident à identifier les tendances, à diagnostiquer les problèmes et à mettre en œuvre des mesures correctives pour améliorer la fiabilité et l'efficacité du micro-réseau.

V.9.2. Systèmes de Surveillance

Les systèmes de surveillance des micro-réseaux se composent de capteurs, de compteurs et d'appareils de communication qui collectent des données sur les flux d'énergie, l'état des équipements et les conditions du réseau.

Les systèmes de surveillance avancés utilisent des technologies intelligentes et des analyses de données pour surveiller et contrôler les composants du micro-réseau, prédire le comportement du système et optimiser les stratégies de gestion de l'énergie. En intégrant des sources d'énergie renouvelables, des systèmes de stockage d'énergie et des technologies de surveillance avancées, les micro-réseaux peuvent offrir des solutions durables, fiables et

efficaces pour la production et la distribution d'électricité. La combinaison de la production et de l'accumulation distribuées dans les micro-réseaux hybrides, ainsi que de systèmes robustes de surveillance et d'enregistrement des données, contribue à la résilience et à l'efficacité des applications de micro-réseaux dans divers contextes.

V.10. Applications de micro-réseaux

Les micro-réseaux trouvent diverses applications dans divers contextes, offrant flexibilité, fiabilité et durabilité dans la production et la distribution d'électricité. Certaines applications courantes des micro-réseaux comprennent :

V.10.1. Micro-réseaux communautaires et résidentiels

Les micro-réseaux communautaires et résidentiels permettent aux quartiers, aux villes et aux zones tribales de répondre localement à leurs besoins énergétiques. Certains rendent l'électricité d'une communauté plus fiable et durable tandis que d'autres desservent des infrastructures essentielles telles que les installations d'incendie, de police et de traitement de l'eau.

V.10.2. Micro-réseaux d'épicerie

Les épiceries sont des "installations critiques" qui doivent être maintenues opérationnelles pendant une catastrophe. De plus, il existe une forte motivation économique pour les magasins à éviter les pannes de courant. Même des pannes de courant relativement courtes peuvent coûter cher aux épiciers. La valeur des aliments périssables varie de 400000 \$ à 900000 \$ dans un seul magasin.

V.10.3. Mini-réseaux de soins de santé

Les établissements de soins de santé, tels que les hôpitaux, les établissements de soins de longue durée et les cliniques chirurgicales, sont une autre forme d'infrastructure essentielle qui doit disposer d'une alimentation électrique fiable. Les micro-réseaux de soins de santé peuvent remplacer ou réduire la dépendance aux générateurs de secours diesel, ce qui réduit les émissions de carbone des installations.

V.10.4. Mini-réseaux militaires

L'armée a fait la démonstration de micro-réseau sophistiqués et innovants qui servent de terrain d'apprentissage pour les micro-réseaux développés pour le secteur civil. Un micro-réseau peut répondre à tous les besoins en électricité de l'installation militaire en flottage.

Les micro-grids entrent également en jeu sur le champ de bataille, sous la forme d'unités mobiles qui peuvent être rapidement installées.

L'armée installe également des micro-réseaux pour améliorer la cybersécurité grâce à l'indépendance énergétique, tout comme les services publics. En plus des contrôles avancés, les micro-réseaux comprennent l'éolien, le solaire, le gaz naturel et le stockage d'énergie. L'architecture distribuée d'un micro-réseau le rend plus résistant aux cyberattaques. Si un générateur est attaqué, le micro-réseau dispose d'autres sources d'alimentation sur lesquelles s'appuyer.

V.10.5. Ports et aéroports de l'Espagne

Les ports et les aéroports construisent de plus en plus de micro-réseaux pour assurer la sécurité du passage des personnes et des marchandises. Un micro-réseau peut servir de source d'alimentation principale pour l'ensemble d'un aéroport ou fournir une alimentation de secours pour garantir que les terminaux, l'aérodrome et les stations-service restent en ligne pendant une panne.

V.10.6. Micro-réseaux utilitaires

Les micro-réseaux aident non seulement le réseau à gérer les énergies renouvelables, mais les services publics les intègrent également de plus en plus comme sources d'énergie primaires, en les couplant avec des générateurs de stockage d'énergie et de secours.

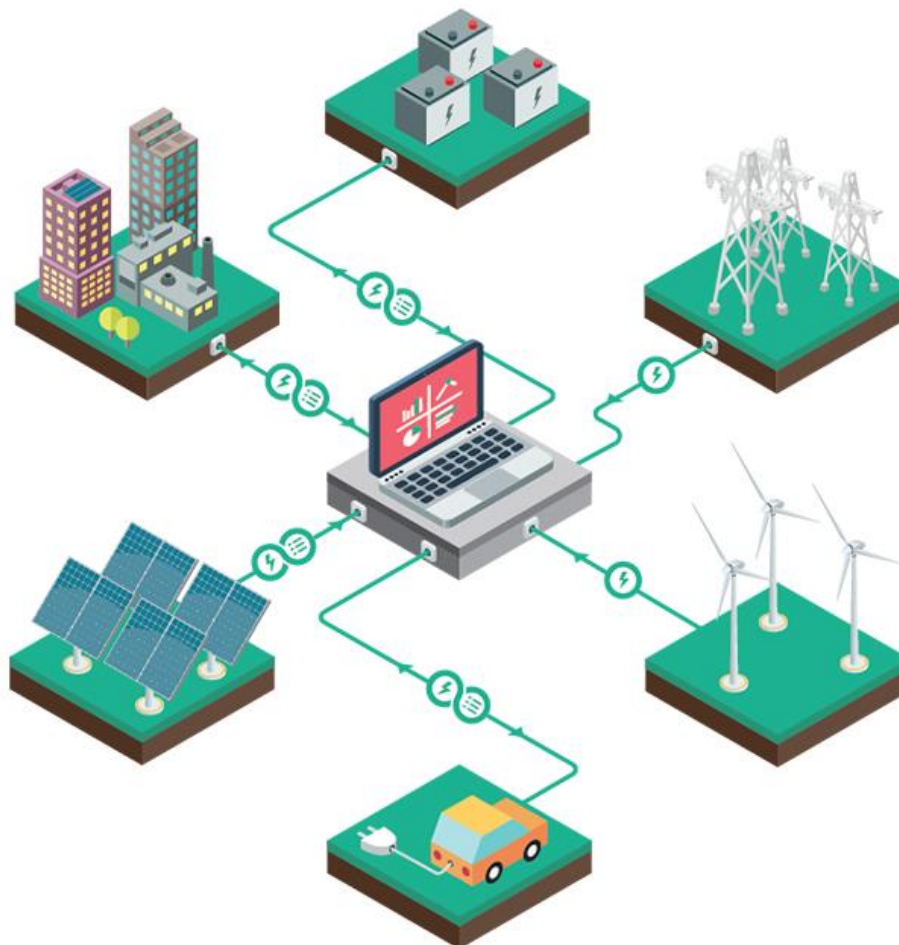
D'autres applications de micro-réseaux comprennent :

- ✚ Opérations agricoles,
- ✚ Centres de données et autres axés sur la qualité de l'alimentation,
- ✚ Services de télécommunications,
- ✚ Commerces de détail et de gros,
- ✚ Raffineries de pétrole et de gaz,
- ✚ Bornes de recharge pour véhicules électriques,
- ✚ Îles éloignées ou avant-postes.

V.11. Conclusion

L'augmentation de la consommation d'énergie, notamment de l'électricité, dans les pays, continuera de croître à mesure que la population mondiale augmentera, que l'urbanisation se poursuivra et que le réchauffement climatique s'intensifiera. Cette tendance exige non seulement une augmentation significative de l'utilisation des énergies renouvelables, mais elle

place également des exigences plus élevées sur les systèmes de gestion de l'énergie. Les technologies de l'Internet des objets (IOT), des communications et du contrôle permettent aux systèmes de gestion de l'énergie d'être plus puissants et de fournir des capacités améliorées d'acquisition, de transmission et de traitement de l'information pour les micro-réseaux. Dans cette étude, nous présentons les concepts et le fonctionnement des micro-réseaux dans différentes technologies telles que les micro-turbines, les piles à combustible, les petits générateurs diesel, les panneaux photovoltaïques, les mini-éoliennes et les petites centrales hydroélectriques, ainsi que le contrôle des micro-réseaux. Nous abordons également les micro-réseaux hybrides avec génération et stockage distribués, ainsi que la surveillance et l'enregistrement des données. L'autoproduction d'énergies renouvelables, en particulier sous la forme de micro-réseaux, offre une perspective prometteuse pour un avenir énergétique plus propre, plus résilient et durable. En adoptant l'autoproduction, nous pouvons réduire les impacts environnementaux, renforcer la sécurité énergétique, favoriser le développement économique local et permettre aux individus et aux communautés de participer activement à la transition vers une société à faible teneur en carbone.





Conclusion

Conclusion

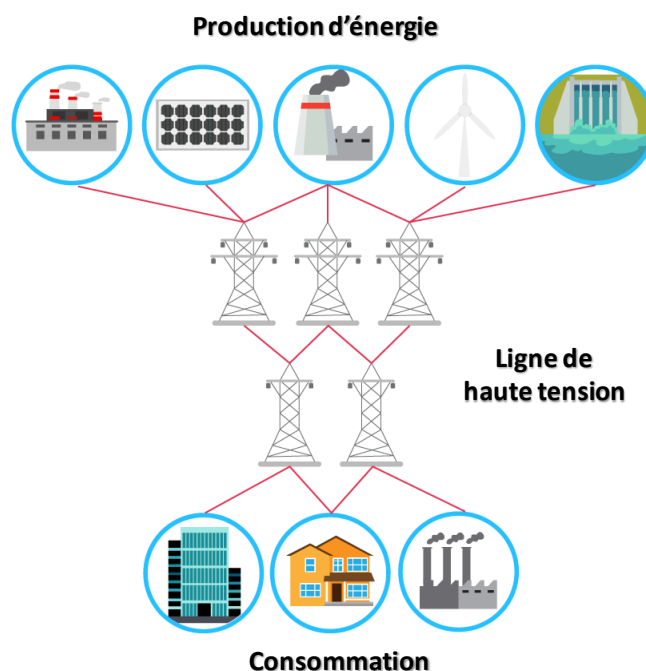
Ce document est structuré en cinq chapitres qui couvrent le programme officiel de la matière, "**Production centralisée et décentralisée**".

Chacune de ces approches (Production centralisée et décentralisée) présente des avantages distincts. La production centralisée offre une efficacité opérationnelle accrue grâce à l'utilisation d'équipements de grande taille et à une gestion centralisée, tandis que la production décentralisée offre une résilience accrue du réseau, une plus grande flexibilité et une réduction des émissions de gaz à effet de serre en évitant les pertes d'énergie associées au transport sur de longues distances.

En conclusion, le choix entre production centralisée et décentralisée dépend souvent de considérations telles que la disponibilité des ressources, les coûts, les préoccupations environnementales et la résilience du réseau. Dans de nombreux cas, une combinaison des deux approches peut offrir un système énergétique plus robuste, flexible et durable.

Ce support offre aux étudiants la possibilité d'obtenir une compétence et une maîtrise de plusieurs points importants dans le domaine d'électrotechnique.

A la fin, nous remercions tous les collègues pour les remarques qui ont permis à corriger et améliorer les polycopies.





**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- [1] N. Hadjsaïd, « Distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée », édition Hermès, 2010.
- [2] R. Caire, « Production Décentralisée et réseaux de distribution », Editions universitaires européennes EUE, 2010.
- [3] B. Multon, « Production d'Énergie Électrique par Sources Renouvelables », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, D4, 2003.
- [4] A. Maczulak, « Renewable Energy: Sources and Methods », Green technology, 2010.
- [5] N. Hatziaargyriou, « Microgrids: Architectures and Control », Wiley-IEEE Press, 2014.
- [6] <https://www.hydroelectricite.ca/fr/les-composantes-dune-centrale-et-leur-fonctionnement.php>
- [7] <https://www.choisir.com/energie/articles/121329/le-rendement-energetique>
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A9lectrique
- [9] <https://www.thinkmicrogrid.org/>
- [10] <https://core.ac.uk/download/pdf/51963566.pdf>
- [11] K. Gao, T. Wang, C. Han,; J. Xie, Y. Ma, R. Peng, « A Review of Optimization of Microgrid Operation », Energies, 2021, vol.14, 2842. <https://doi.org/10.3390/en14102842>
- [12] T. Benhacine, « Micro-réseaux pour la production d'électricité à partir des énergies renouvelables », Bulletin des Energies Renouvelables N° 53, pp.10-12.
https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber53_10_12.pdf
- [13] <https://www.nrel.gov/grid/microgrids.html>
- [14] S. Swetalina, K.S. Binod, K.R. Pravat, « Distributed generation hybrid AC/DC microgrid protection: A critical review on issues, strategies, and future directions », International journal of energy research, Vol.44 (5), pp.3347-3364. <https://doi.org/10.1002/er.5128>
- [15] <https://data.openei.org/submissions/151>
- [16] L. Robert, A. Abbas, M. Chris, S. John, D. Jeff, G. Ross, A.S. Meliopoulos, Y. Robert, and E. Joe, « Integration of Distributed Energy Resources The Micro Grid Concept », Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, LBNL-50829, April 2002.
<https://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SistGD/MicroGridCon.pdf>
- [17] « Small Wind Turbines for Microgrids », Bergey Windpower Co, 1980.
<https://bergey.com/wp-content/uploads/2019/06/small-wind-turbines-for-microgrids-faq.pdf>
- [18] D'autres internet et Chat GPT.