



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2025

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par

FITAS Bouchra Mansouria

Intitulé du sujet :

Le dispatching économique et environnemental de l'énergie électrique

Soutenu le 23 septembre 2025 devant le jury composé de :

Présidente :Mme GHOMRI Leila

MCA

Université de Mostaganem.

Examineur :Mr SOUAG Slimane

MCB

Université de Mostaganem

Encadrant :Mr BEKKOUCHE Benaissa

Pr

Université de Mostaganem

Année universitaire 2024/2025

Table des matières

Introduction générale :.....	10
Chapitre I : Généralités sur la production et le transport de l'énergie électrique.....	11
I.1 Introduction.....	12
I.2 La production de l'énergie électrique par les centrales fossiles	12
I.2.1 Les principaux constituants d'une centrale fossiles	13
I.2.1.1Groupe turbo-alternateur	13
I.3 réseau électrique.....	13
I.3.3 Les avantages des centrales fossiles	14
I.3.4 Les inconvénients des centrales fossiles	15
I.4 Production d'énergie en Algérie	15
I.4.1 Les émissions des gaz polluant	15
I.4.2 Comparaison des Émissions par Type de Centrale :	16
I.5 Transition énergétique vers les Energies renouvelables :.....	16
I.5.1 Stratégie nationale des énergies renouvelables	16
I.5.2 Les avantages et les inconvénients d'une centrale solaire photovoltaïque.....	17
I.6 Les architectures de réseaux	17
I.6.1 Structure générale d'un réseau de distribution	17
I.7 Topologie des réseaux électriques.....	21
I.8 Fonctionnement d'un réseau de transport.....	23
I.9 Dispatching économique-environnemental	25
I.11 Conclusion	26
Chapitre II : Étude et modélisation du dispatching économique et environnemental.....	27
II .1. Introduction.....	28
II.2. Calcul de l'écoulement de puissance	28
II.2.1 Modélisation des éléments du réseau électrique :.....	28
II.2.2 Formulation mathématique de l'écoulement de puissance.....	32
II.2.3 Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance	33
II.2.4 Méthode de résolution : Méthode de Newton-Raphson.....	34
II.4 Dispatching économique	35
Importance des contraintes d'inégalités	38
II.5 Dispatching environnemental	38
II.7 Formulation classique du problème du Dispatching économique.....	39
II.10 Conclusion	40
Chapitre III : Simulations et interprétation des résultats.....	41
III.1 Introduction	42

Table des matières

III.2 Structure et données du réseau étudié	42
III.3 Algorithme et Organigramme du programme de simulation et d'optimisation	45
III.4 Calcul de l'écoulement de puissance	47
III.5 Le dispatching économique et environnemental avec optimisation	49
III.5.1 Optimisation économique	50
III.5.2 Optimisation environnementale.....	53
III.5.3 Comparaison des configurations optimisées	56
III.6 Conclusion	59
Conclusion générale.....	62

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : L'alternateur.....	14
Figure I.2 : schéma unifilaire simplifié d'un poste HT/MT de centrale avec ligne de secours.....	15
Figure I.3 : Structure générale d'un réseau électrique	20
Figure I.4 : Alimentation double antenne double jeux de barre d'un poste de livraison HTB.20	
Figure I.5 : Alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT.21	
Figure I.6 : Alimentation en coupure d'entrée d'un poste de livraison HTA à comptage BT..	22
Figure I.7 : Alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT.22	
Figure I.8 : Schéma de poste de livraison HTA à comptage BT.....	23
Figure I.9 : Réseau structure radiale	24
Figure I.10 : Réseau structure maillée	24
Figure I.11 : Réseau structure bouclée.....	25
Figure I.12 : Stratégie de gestion d'énergie centralisée	26
Figure I.13 : stratégie de gestion d'énergie distribuée	27
Figure I.14 : stratégie de gestion d'énergie hybride centralisée et distribuée	27

Chapitre II :

Figure II.1 : Modélisation d'un générateur	33
Figure II.2 : Représentation d'une charge par la puissance consommée et fournie	33
Figure II.3 : Modélisation d'une ligne de transport	34
Figure II.4 : Modèle des transformateurs	35
Figure II.5 : Schéma d'une branche	36

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma unifilaire d'un réseau de teste à 9 nœuds.....	42
Figure III.2 : Organigramme globale du programme MATLAB.....	50
Figure III.3 : Profils de tension des bus.....	52
Figure III.4 : Distribution des pertes actives par ligne	52
Figure III.5 : Répartition du flux actif (MW) dans chaque ligne	53
Figure III.6 : profils de tension des bus après optimisation économique.....	56
Figure III.7 : Pertes actives par ligne après optimisation économique	56
Figure III.8 : Répartition du flux actif par ligne après optimisation environnementale.....	56
Figure III.9 : Profils de tension des bus après optimisation environnementale.....	59
Figure III.10 : Pertes actives par ligne après optimisation environnementale.....	59
Figure III.11 : Répartition du flux actif par ligne après optimisation environnementale.....	59
Figure III.12 : Comparaison des coûts de génération avant et après optimisation.....	60
Figure III.13 : comparaison des émissions de NOx avant et après optimisation.....	6

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 :Présente la comparaison des émissions par types de centrale fossile.....17

Chapitre II :

Tableau II.1 : Classification des jeux de barre32

Tableau II.2 : Comparaison des principales méthodes de calcul de l'écoulement de puissance.....38

Chapitre III :

Tableau III.1 : Coefficients de coûts et limites de puissances générées47

Tableau III.2 : Coefficients caractéristiques des émissions Nox..... 47

Tableau III.3 : Les données de lignes.....48

Tableau III.4 : Valeurs planifiées des tensions et des puissances48

Tableau III.5 : Les données des transformateurs48

Tableau III.6 : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds50

Tableau III.7 : Flux de puissances et pertes dans les lignes du réseau50

Tableau III.8 : Bilan des performances du réseau à l'état initial52

Tableau III.9 : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds après optimisation54

Tableau III.10:Flux de puissance et pertes dans les lignes après optimisation économique ..55

Tableau III.11 :Synthèse des résultats du réseau après optimisation économique55

Tableau III.12 : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds après optimisation
environnementale57

Tableau III.13 : Flux de puissance et pertes dans les lignes après optimisation
environnementale58

Tableau III.14 : Synthèse des résultats du réseau après optimisation environnementale58

Tableau III.15 : Comparaison des résultats avant et après optimisation60

Remerciement

Au terme de ce projet de fin d'études, je souhaite exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et qu'ils m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury Mr SOUAG Slimane et Mme GHOMRI Leila qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Leurs remarques pertinentes et leur disponibilité témoignent de l'intérêt qu'ils portent à ce projet, et j'en suis profondément reconnaissant.

Je voudrais ensuite adresser mes remerciements les plus sincères à mon encadrant Mr BEKKOUCHE Benaissa pour son suivi attentif, ses conseils éclairés et sa patience. Son accompagnement m'a permis d'avancer avec confiance et de progresser tout au long de ce travail.

J'exprime également ma reconnaissance à mes camarades et amis, pour leur soutien constant, leur encouragement et les moments d'entraide et de partage qui ont rendu cette expérience plus riche et plus agréable.

Enfin, je ne saurais terminer sans remercier ma famille, qui a toujours été à mes côtés, m'offrant un appui moral inestimable, de la motivation et un soutien indéfectible à chaque étape de ce parcours.

À toutes ces personnes, je dis merci du fond du cœur pour leur contribution précieuse à la réussite de ce projet.

Résumé :

Ce mémoire traite de l'optimisation de la gestion de la production d'énergie électrique en intégrant à la fois les aspects économiques et environnementaux. Face à l'accroissement constant de la demande en électricité et aux défis environnementaux liés aux émissions polluantes, il est nécessaire de développer des stratégies permettant de concilier performance économique et durabilité.

L'étude s'appuie sur un réseau de test IEEE 9 et utilise un programme développé sous MATLAB, combinant le calcul d'écoulement de puissance via la méthode Newton-Raphson et l'optimisation par la méthode des itérations de lambda. Trois scénarios ont été étudiés : l'état initial du réseau, l'optimisation économique visant la réduction du coût global de production, et l'optimisation environnementale axée sur la diminution des émissions de NOx.

Les résultats obtenus montrent que l'optimisation économique permet une réduction notable du coût de production, tandis que l'optimisation environnementale réduit significativement les émissions, avec un léger compromis sur le coût. Cette approche démontre l'efficacité des outils mis en place et met en évidence l'importance d'intégrer progressivement les critères environnementaux dans la gestion des réseaux électriques modernes.

Mots clés : Dispatching économique, dispatching environnemental, méthode Newton-Raphson, itérations de lambda, optimisation, réseau électrique.

Abstract:

This thesis focuses on optimizing the management of electrical energy production by integrating both economic and environmental aspects. With the continuous increase in electricity demand and the environmental challenges associated with pollutant emissions, it is crucial to develop strategies that reconcile economic performance with sustainability.

The study is based on the IEEE 9 test network and relies on a program developed in MATLAB, combining Newton-Raphson power flow calculations and optimization using the lambda iteration method. Three scenarios were analyzed: the initial state of the network, economic optimization aimed at minimizing the total production cost, and environmental optimization focused on reducing NOx emissions.

The results show that economic optimization achieves a significant reduction in production cost, while environmental optimization substantially lowers emissions, with a slight trade-off in cost. This approach demonstrates the effectiveness of the proposed tools and highlights the importance of gradually integrating environmental criteria into the management of modern electrical networks.

Key words: Economic dispatch, environmental dispatch, Newton-Raphson method, lambda iterations, optimization, power network

ملخص:

المستمرة في الطلب على الكهرباء والتحديات البيئية الناتجة عن الانبعاثات الملوثة، أصبح من الضروري تطوير استراتيجيات توازن بين الأداء الاقتصادي والاستدامة البيئية

، يدمج بين حساب تدفق MATLAB في هذه الدراسة، باستخدام برنامج تم تطويره على IEEE 9 تم اعتماد شبكة الاختبار وقد تم دراسة ثلاثة (lambda) القدرة بطريقة نيوتن-رافسون ومرحلة التحسين باستعمال طريقة التكرارات لمعامل لاغرانج سيناريوهات: الحالة الأولية للشبكة، والتحسين الاقتصادي الذي يهدف إلى تقليل التكلفة الإجمالية للإنتاج، والتحسين البيئي الذي NOx. يركز على تقليل انبعاثات غازات

أظهرت النتائج أن التحسين الاقتصادي يحقق خفضاً واضحاً في تكلفة الإنتاج، بينما يساهم التحسين البيئي في تقليل الانبعاثات بشكل كبير، مع تأثير طفيف على التكلفة. وتؤكد هذه النتائج فعالية المنهجية المقترحة وأهمية إدماج المعايير البيئية تدريجياً في إدارة الشبكات الكهربائية الحديثة

الكلمات المفتاحية:

التدفق الاقتصادي، التدفق البيئي، طريقة نيوتن-رافسون، تكرارات لامبدا، التحسين، الشبكات الكهربائية

Introduction générale

Introduction générale :

La demande mondiale en énergie électrique connaît une croissance continue, portée par l'expansion démographique, le développement industriel et l'évolution des modes de vie. Cette augmentation constante de la consommation impose aux réseaux électriques modernes de répondre à des exigences toujours plus élevées en termes de fiabilité, de sécurité et de qualité de service. Dans ce contexte, la gestion optimale de la production et de la distribution de l'électricité devient un enjeu stratégique majeur, tant sur le plan technique qu'économique et environnemental.

L'objectif principal des systèmes électriques est d'assurer en permanence l'équilibre entre la production et la consommation tout en minimisant le coût d'exploitation. Cette problématique, connue sous le nom de dispatching économique, consiste à répartir la charge entre les différentes unités de production de manière optimale, tout en respectant les contraintes techniques des générateurs et du réseau. La méthode classique des itérations de λ , fondée sur le principe du Lagrangien, est largement utilisée pour résoudre ce problème.

Cependant, avec la prise de conscience croissante des impacts environnementaux liés à la production d'électricité, notamment les émissions de gaz polluants tels que les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde de carbone (CO₂), l'optimisation ne peut plus se limiter à la seule dimension économique. Il est désormais indispensable d'intégrer une dimension environnementale, visant à réduire les émissions tout en maintenant une exploitation économiquement viable et techniquement sûre. Cette évolution a conduit au développement du dispatching environnemental, qui cherche à minimiser les rejets polluants.

Dans ce travail, nous nous intéressons principalement au calcul de l'écoulement de puissance, l'optimisation économique, visant la réduction du coût global de production et l'optimisation environnementale, orientée vers la diminution des émissions polluantes. Pour ce faire, un programme sera développé sous MATLAB, intégrant le calcul de l'écoulement de puissance par la méthode Newton-Raphson, ainsi que le dispatching par la méthode des itérations du coefficient de Lagrange λ .

L'objectif principal est de comparer l'état initial du réseau avec les états optimisés, en termes de tensions, flux de puissance, pertes, coût global et émissions. Ce travail permet ainsi d'évaluer l'efficacité des stratégies d'optimisation économique et environnementale, tout en mettant en évidence les compromis nécessaires pour répondre simultanément aux exigences économiques, techniques et écologiques des systèmes électriques modernes.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre sera consacré à une présentation générale du système de production d'énergie électrique et des systèmes de transport et de distribution. La gestion d'énergie d'un réseau, le contrôle centralisé et le système de supervision seront décrits.

Le deuxième chapitre présentera une étude théorique de l'écoulement de puissance et du dispatching économique et environnemental, ainsi que les méthodes de calcul et d'optimisation utilisées.

Le troisième chapitre sera réservé à une simulation, d'un exemple de réseau. Une attention particulière sera accordée à l'interprétation des résultats obtenus.

Le travail sera accompli par une conclusion et des perspectives

Chapitre I :
**Généralités sur la production et le
transport de l'énergie électrique**

I.1 Introduction :

L'électricité est au cœur du développement économique et social d'un pays. Elle est indispensable pour l'industrie, les services et les usages domestiques, constituant ainsi un facteur clé de croissance et de modernisation. Avec l'augmentation constante de la population et l'expansion des activités industrielles, la demande en énergie électrique connaît une progression continue, ce qui impose une gestion rigoureuse et optimale des systèmes électriques pour garantir la continuité de service, assurer la qualité de l'énergie fournie et réduire les pertes. [1]

Dans ce cadre, il est essentiel de bien comprendre l'organisation d'un réseau électrique, qui repose sur trois étapes fondamentales : la production, le transport et la distribution. La production électrique est assurée par différents types de centrales, qu'elles soient classiques ou issues des énergies renouvelables, chacune présentant des avantages et des limites en termes de coûts, de rendement et d'impact sur l'environnement. En parallèle, la structure du réseau, définie par ses architectures, joue un rôle essentiel dans la stabilité et la fiabilité du système. Une architecture adaptée permet une meilleure répartition des flux d'énergie, une réduction des pertes et une résilience accrue face aux perturbations ou aux défaillances. Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les principes fondamentaux des systèmes électriques, en abordant successivement :

- Les différentes sources de production d'énergie et leurs spécificités.
- Le transport et la distribution de l'électricité.
- Les architectures de réseaux et leur influence sur la performance globale.
- Ainsi que les enjeux techniques, économiques et environnementaux liés au développement et à l'exploitation de ces réseaux. [1]

Cette base théorique est indispensable pour la suite de ce mémoire, qui se focalise sur l'optimisation de la gestion et du dispatching de la production électrique, en intégrant à la fois les objectifs de performance économique et les contraintes de durabilité.

I.2 La production de l'énergie électrique par les centrales fossiles :

Les centrales thermiques génèrent de l'électricité en utilisant des combustibles comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole. La combustion de ces matières produit de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour générer de la vapeur. Cette vapeur fait tourner une turbine, qui est reliée à un alternateur qui convertit le mouvement mécanique en énergie électrique. Les centrales thermiques qui brûlent des énergies fossiles émettent du CO₂. En 2022, la production d'électricité était responsable d'environ 40 % des émissions mondiales de CO₂. Dans ces émissions dues à l'électricité, 73 % proviennent des centrales à charbon et 22 % des centrales à gaz [2].

Il existe 3 types de centrales fossiles : [5]

- Les centrales à charbon.
- Les centrales à fioul.
- Les centrales à gaz naturel.

I.2.1 Les principaux constituants d'une centrale à énergie fossiles :

I.2.1.1 Groupe turbo-alternateur [3] :

a) Turbine :

La vapeur produite par la chaudière pénètre dans la turbine ou un appareil nommé tuyère va lui donner une vitesse réalisant la transformation de l'énergie calorifique en énergie cinétique.

Dans la turbine toujours, cette vapeur à grande vitesse fait tourner la turbine et transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique.

La turbine est composée de trois corps : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Elle comporte six (06) soutirages qui alimentent (03) réchauffeurs (BP), (02) réchauffeurs (HP), et la bâche alimentaire. Le rotor de la turbine est accouplé avec l'alternateur, et l'ensemble tourne à une vitesse constante réglée à 3000 tr/mn. Donc, l'alternateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

b) Alternateur :

La figure (I.1) présente les composantes d'une machine synchrone, le rotor (partie mobile) et le stator (partie fixe).

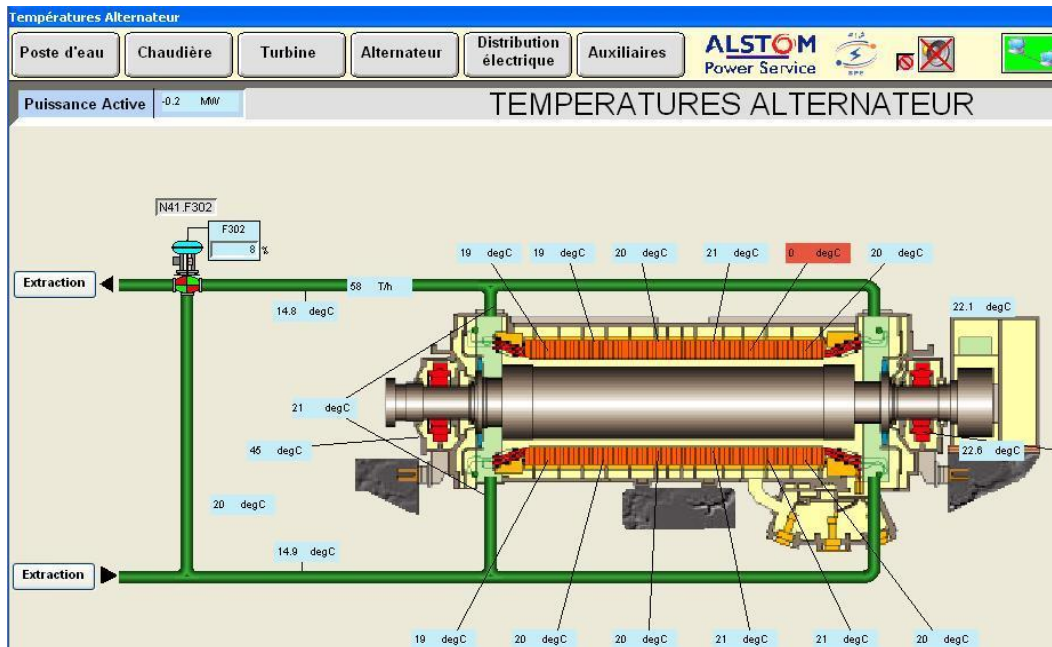


Figure (I.1) : L'alternateur.

I.3 réseau électrique :

I.3.1 Partie Haute Tension (225 KV) :

Le transport de la tension produite est réalisé à l'aide d'un transformateur élévateur HT installé et connecté à la sortie de l'alternateur par l'intermédiaire d'un disjoncteur appelé disjoncteur machine pour élever la tension de 13,8 KV au 225 KV avec une puissance nominale de 220 (MVA) pour le réseau national, une partie de cette puissance est utilisée pour l'alimentation des tableaux MT et BT des auxiliaires de central à travers un transformateur de soutirage. [3]

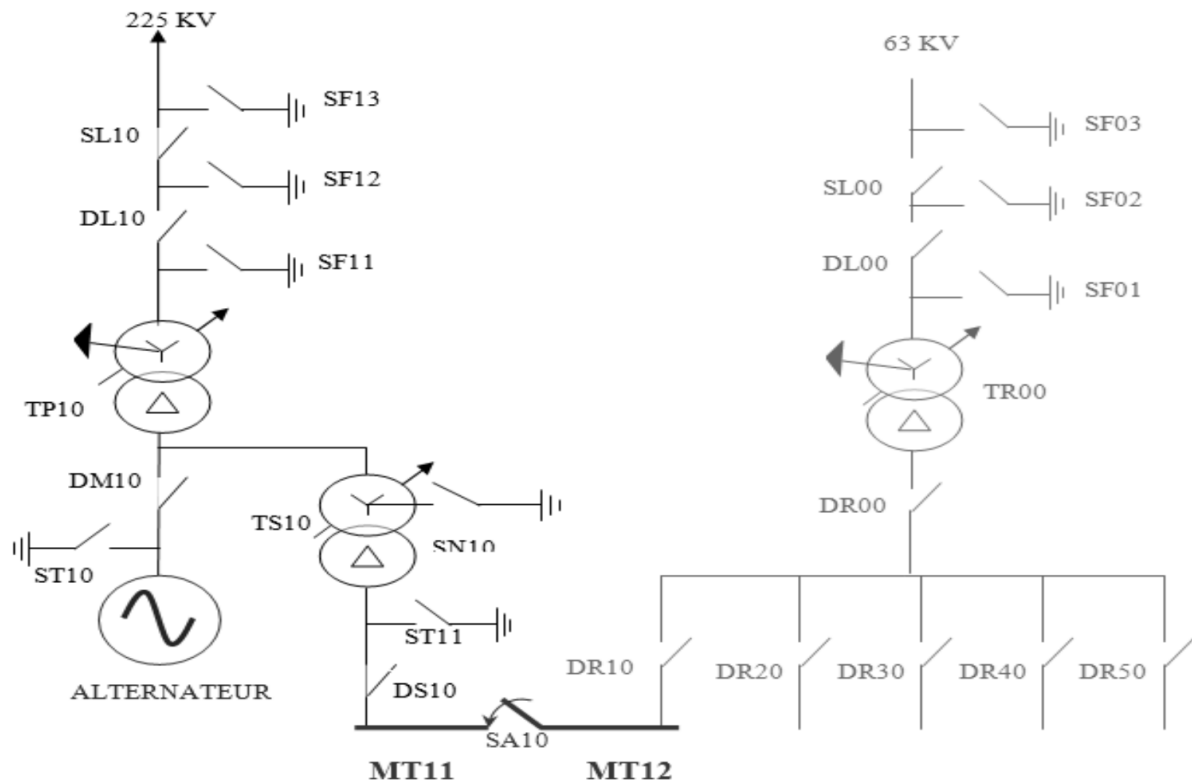


Figure (I.2) : schéma unifilaire simplifié d'un poste HT/MT de centrale électrique avec ligne de secours.

I.3.2 Ligne de Secours [3] :

La ligne de secours est alimentée par le réseau en cas de manque de courant dans la centrale, avec une tension de 63 kV qui alimente les jeux de barres moyen tension des tranches à travers un transformateur de réseau TR00 (63 KV/6,6 KV).

Cette même ligne assure l'interconnexions entre les trois tranches partie MT (6,6 KV).

Donc nous avons deux types de secours :

- Secours tranche réseau : avec fermeture des disjoncteurs DR00 et DR10, DR20 ou DR30 de la tranche à secourir.
- Secours tranche-tranche : ouverture de disjoncteur DR00 et fermeture des disjoncteurs de la ligne de secours de la tranche donneuse et réceptrice.

I.3.3 Les avantages des centrales à énergie fossiles [4] :

1) Réactivité rapide :

- Ces centrales peuvent être mises en service très rapidement grâce à la combustion des énergies fossiles.
- Elles sont donc particulièrement utiles pour répondre aux pics de consommation, notamment en hiver lorsque la demande en électricité augmente fortement.

2) Fiabilité et continuité de production :

- Contrairement aux énergies renouvelables qui dépendent des conditions météorologiques, une centrale thermique produit de l'électricité en continu tant qu'elle est alimentée en combustible.
- Elle offre ainsi une source d'énergie stable et prévisible.

3) Flexibilité et complémentarité avec d'autres sources d'énergie :

- Elle peut être activée ponctuellement en cas de forte demande, par exemple lorsque la production nucléaire ou renouvelable ne suffit pas.
- Son rôle est devenu plus secondaire en France, mais elle reste une solution d'appoint dans certaines situations.

I.3.4 Les inconvénients des centrales à énergie fossiles [4] :

1) Impact environnemental élevé :

- Ces centrales rejettent d'importantes quantités de gaz à effet de serre (CO₂), contribuant au réchauffement climatique.
- Elles émettent aussi des particules polluantes qui affectent la qualité de l'air et la santé humaine.

2) Dépendance aux énergies fossiles :

- Fonctionnant principalement au charbon, au fioul ou au gaz, elles utilisent des ressources non renouvelables.
- Cette dépendance expose les pays aux fluctuations des prix des combustibles fossiles et aux tensions géopolitiques.

3) Réduction progressive de leur utilisation :

- En France, la part de production d'électricité issue des centrales thermiques à flamme a fortement diminué (de 17,4 % dans les années 1980 à seulement 1,8 % aujourd'hui).
- Cette baisse s'explique par les politiques environnementales et la transition vers des énergies moins polluantes.

I.4 Production d'énergie en Algérie [5] :

L'énergie thermique demeure la forme dominante d'énergie produite en Algérie, représentant environ 62% de la production totale. Cependant, face aux enjeux environnementaux et à l'épuisement des ressources fossiles, le pays s'oriente progressivement vers un développement durable fondé sur l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie solaire thermique apparaît comme une technologie à fort potentiel, bénéficiant d'un ensoleillement exceptionnel sur le territoire algérien, particulièrement dans la région du Sahara. Ce potentiel solaire pourrait à terme contribuer significativement à la diversification du mix énergétique algérien et à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, favorisant ainsi une industrie renouvelable prometteuse

I.4.1 Les émissions des gaz polluant :

Les centrales électriques utilisant des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel émettent plusieurs types de gaz polluants pendant la production d'électricité. Cela inclut principalement le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x) et les oxydes de soufre (SO_x).

• Dioxyde de Carbone (CO₂) :

L'une des principales causes des émissions de CO₂ des centrales électriques est la combustion de combustibles fossiles. Environ 40 % des émissions mondiales de CO₂ en 2022 provenaient de la production d'électricité, dont 73 % des émissions provenant des centrales productrices de carbone. Le CO₂ est un gaz qui joue un rôle assez important et qui contribue de manière significative au changement climatique [6].

• Oxydes d'Azote (NO_x) :

Les NO_x sont libérés lors d'une combustion à haute température dans les centrales électriques, telles que celles qui utilisent du gaz naturel et du charbon. Ils peuvent nuire à la santé respiratoire et contribuer à la génération de smog photochimique [7].

- **Oxydes de Soufre (SO_x) :**

Les SO_x sont principalement émis par la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre, comme le charbon, Ils contribuent à l'acidification des pluies et peuvent nuire à la santé humaine et aux écosystèmes. Ce processus apparaît surtout à des températures de combustions élevées [7].

I.4.2 Comparaison des Émissions par Type de Centrale :

En résumé, les centrales au charbon sont les plus polluantes en termes d'émissions de CO₂, NO_x et SO_x, tandis que les centrales au gaz naturel sont moins polluantes mais toujours émettrices de ces gaz.

Tableau (I.1) :Présente la comparaison des émissions par type de centrale fossile. [6]

Type de Centrale	Émissions de CO ₂ (gCO _{2e} /kWh)	Émissions de NO _x et SO _x
Charbon	820	Élevées
Pétrole (fioul)	600	Modérées
Gaz naturel	490	Faibles

I.5 Transition énergétique vers les Energies renouvelables :

Les hydrocarbures dominent la situation énergétique en Algérie. La croissance démographique de la population s'accroît de manière significative, entraînant une augmentation de la consommation énergétique nationale totale, qui s'élève actuellement à une augmentation de 3 % par an. En 2019, la consommation totale s'élevait à environ 66,9 millions de tonnes métriques et, par conséquent, la valeur future estimée en 2030 des besoins en gaz naturel sur le marché national sera d'environ 55,4 milliards de mètres cubes. De même, la production d'électricité devrait atteindre 150 térawatt-heures d'ici 2030. Cela nécessite une intégration massive des énergies renouvelables dans le mix énergétique afin de préserver les combustibles fossiles. En plus de diversifier le secteur de la production d'électricité, de protéger l'environnement et de contribuer au développement durable. Toutes ces considérations justifient l'importance de l'inclusion vague par l'Algérie de centrales photovoltaïques sur son territoire national dans une stratégie d'approvisionnement énergétique à long terme. [1]

La transition énergétique occupe une place importante dans le plan d'action du gouvernement, le programme de transition énergétique vise, outre la diversification des sources énergétiques à travers le développement des énergies renouvelables, la promotion de l'efficacité énergétique en tant qu'action complémentaire de grande importance. Le pays ambitionne ainsi de s'affranchir de manière progressive de la dépendance vis-à-vis des ressources conventionnelles et amorcer une dynamique d'émergence d'une énergie verte et durable, disponible localement et en abondance comme le solaire. La démarche, s'articule en fait sur les considérations suivantes : [1]

- La préservation des ressources fossiles et leur valorisation.
- Le changement du modèle énergétique de production et de consommation.
- Le développement durable et la protection de l'environnement.
- La maîtrise des coûts de réalisation des installations des énergies renouvelables.

I.5.1 Stratégie nationale des énergies renouvelables :

A but de d'exploité le potentiel disponible en Algérie mentionné dans la partie précédente, le gouvernement algérien a lancé le programme national des énergie renouvelables et efficacité énergétique, ce dernier a était réactualisé plusieurs fois récemment en 2020. [1]

Le nouveau programme adopté en 2020 permettrait au pays de produire 15000 MW d'ici 2035, dont 4000 MW d'ici 2024. Dans le cadre de ce programme, plusieurs stations reliées au réseau (23 centrales

photovoltaïques, (01 parc éolien) basé sur l'énergie durable ont été installés de capacité d'une puissance de 354.3 MW. A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable. [1]

I.5.2 Les avantages et les inconvénients d'une centrale solaire photovoltaïque [9] :

Les avantages :

- Les centrales solaires photovoltaïques utilisent une source d'énergie gratuite et inépuisable.
- Elles réduisent ainsi les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique.
- Les panneaux solaires sont fiables, nécessitent peu d'entretien et sont conçus pour résister aux intempéries.
- Les centrales solaires peuvent être installées à de nombreux endroits, du moment que le taux
- D'enseillement est suffisant. Une fois installée au bon endroit il y aura une capacité de production très importante et pourra par conséquent bien alimenter le réseau en électricité.

Les inconvénients :

- Les centrales solaires nécessitent de vastes surfaces, ce qui peut être un inconvénient pour les terrains agricoles ou sensibles environnementale.
- Bien que les coûts diminuent, l'investissement initial pour construire une centrale solaire reste important.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie limitée. Ils doivent être changés en moyenne tous les 30 ans.
- Elles fonctionnent uniquement le jour et dépendent des conditions météorologiques.

I.6 Les architectures de réseaux [8] :

L'architecture d'un réseau de distribution électrique est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Il y a différents postes de livraison HTB et HTA.

I.6.1 Structure générale d'un réseau de distribution [8] :

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau de distribution comporte :

- Des postes de livraison HTB alimentés par une ou plusieurs sources, ils sont composés de plusieurs jeux de barres et des disjoncteurs de protection.
- Des sources de production interne.
- Des transformateurs HTB / HTA.
- Des tableaux principaux HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres.
- Des réseaux de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT.
- Des récepteurs HTA.
- Des transformateurs HTA / BT.
- Des tableaux et des réseaux de basse tension.

- Des récepteurs de basse tension.

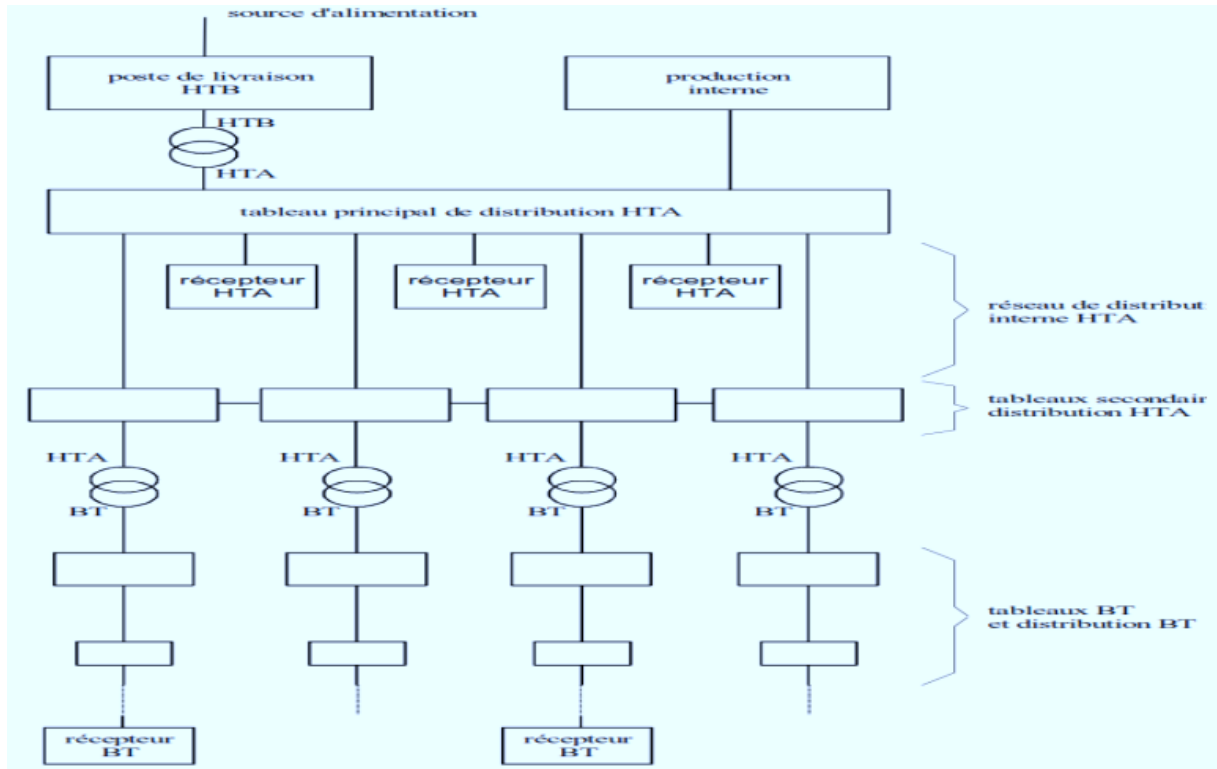


Figure (I.3) : Structure générale d'un réseau

I.6.2 Les postes de livraison HTB [8] :

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA. L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- d'une part, le point de raccordement au réseau de distribution HTB
- d'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les simples antennes, les doubles antennes, les doubles antennes avec double jeu de barres.

Les doubles antennes avec double jeu de barres :

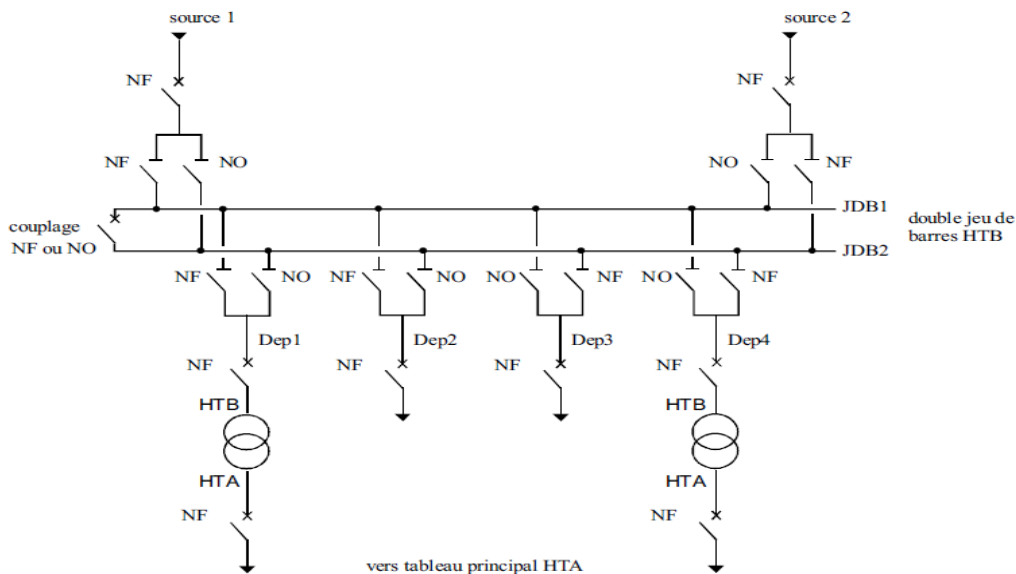


Figure (1.4) : Alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB.

Mode d'exploitation :**Normal :**

La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.

La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.

Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

Perturbé :

En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

Avantage :

- Bonne disponibilité d'alimentation
- Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- Possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

Inconvénient :

- Surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres

1.6.3 Les postes de livraison HTA [8] :

Ils concernent généralement les puissances comprises entre 250 kVA et 10 MVA.

Il existe deux types de postes de livraison HTA, selon que le comptage est effectué en BT ou en HTA.

1.6.4 Les postes de livraison HTA à comptage BT [8] :

Ils sont régis par la norme NF C 13-100, ils ne comportent qu'un seul transformateur dont le courant secondaire est inférieur ou égal à 2000 A, soit une puissance inférieure ou égale à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V.

Structure simple dérivation : (voir fig. 1.5)

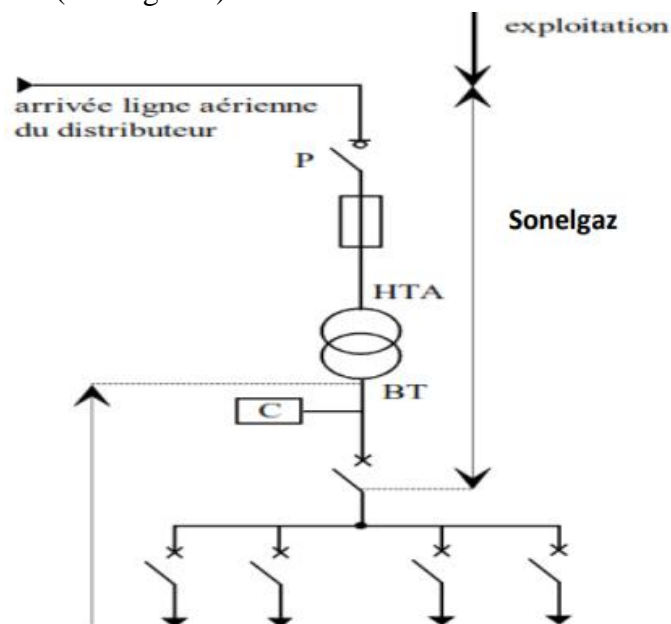


Figure (1.5) : Alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT.

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1). Ce type de poste est utilisé en général pour la distribution publique HTA en lignes aériennes, il comporte une seule source d'alimentation possible par le distributeur.

Structure en coupure d'artère : (voir fig. 1.6)

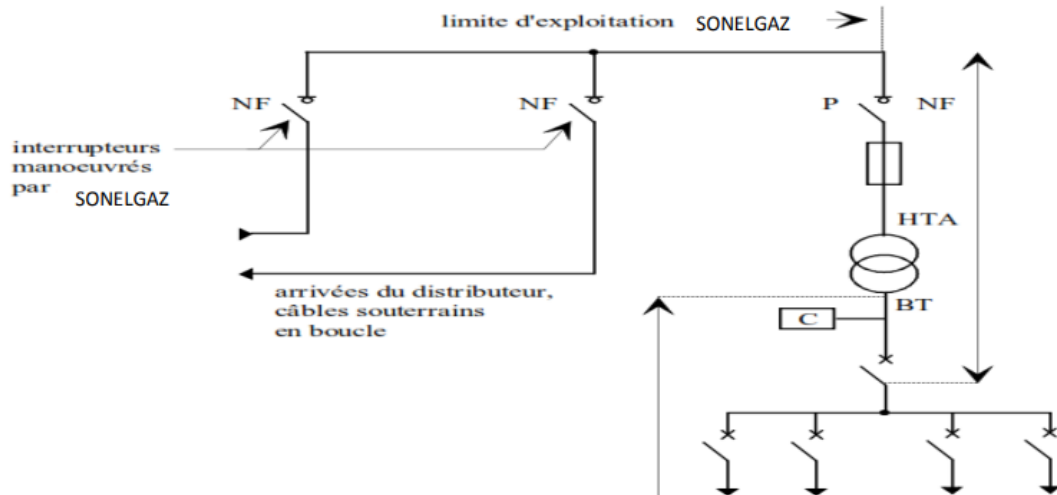


Figure (1.6) : Alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT.

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1). Ce type de poste est utilisé pour la distribution publique HTA urbaine en réseaux souterrains, il permet à l'utilisateur de bénéficier d'une source d'alimentation fiable à partir de deux postes sources ou 2 départs HTA, ce qui limite les interruptions pour travaux ou en cas de panne.

Structure double dérivation : (voir fig. 1.7)

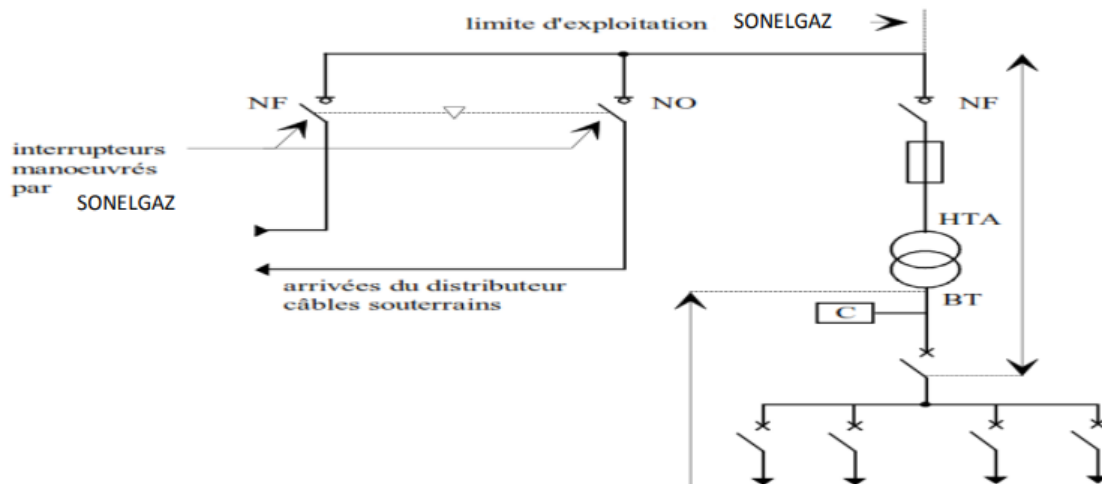


Figure (1.7) : Alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT.

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NFC 13-100 § 433.1). Lorsque le réseau public HTA comporte deux câbles souterrains distincts en parallèle, le poste peut être alimenté par l'une ou l'autre de ces deux dérivation. La permutation d'une alimentation sur l'autre s'effectue lors de la disparition de la tension sur le câble alimentant le poste. Elle est réalisée soit automatiquement, soit manuellement. Ce schéma, très coûteux pour le distributeur, est

utilisé lorsque les exigences de disponibilité sont importantes (le surcoût est généralement payé par l'utilisateur).

I.6.5 Les postes de livraison HTA à comptage HT [8] :

Ils comportent plusieurs transformateurs ou un seul si son courant secondaire est supérieur à 2 000 A (puissance supérieure à 1250 KVA pour une tension composée de 400 V) et peuvent comporter des départs HTA. La partie de l'installation allant du point de raccordement au réseau HTA jusqu'au sectionneur d'isolement situé en aval du disjoncteur général est régie par la norme NF C 13-100 ; les jeux de barres, le réseau HTA et les transformateurs sont régis par la norme NF C 13-200. De façon identique aux postes de livraison à comptage BT, l'alimentation par le distributeur peut être en simple dérivation, coupure d'artère ou double dérivation.

Exemple de schéma (voir fig. 1.8)

Poste de livraison avec une alimentation en coupure d'artère comportant 2 transformateurs et 2 départs HTA.

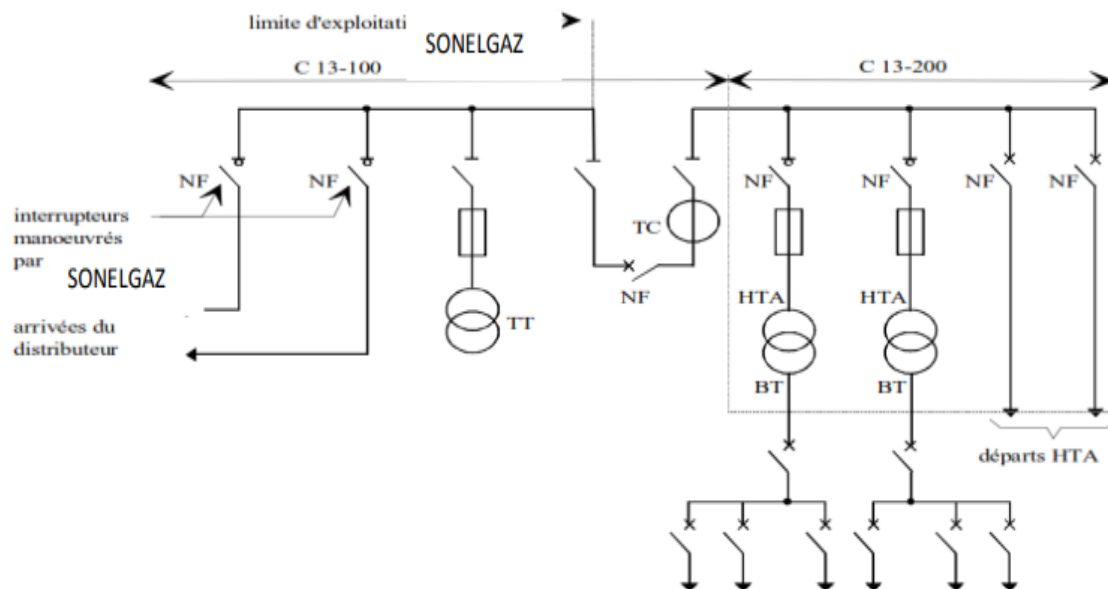


Figure (1.8) : Schéma d'un poste de livraison HTA à comptage HT.

Le comptage HT est réalisé grâce au TT (transformateur de tension) et au TC (transformateur de courant). Le transformateur de courant possède généralement un deuxième secondaire utilisé pour la protection contre les surintensités.

I.7 Topologie des réseaux électriques :

Les topologies varient selon le type de réseau. La topologie est influencée par différents facteurs tels que le niveau de fiabilité souhaité, la souplesse et la maintenance, ainsi que les dépenses d'investissement et d'exploitation. Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées dans la figure suivante. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure [8] :

- Les réseaux de transport, ont une structure maillée,
- Les réseaux de répartition, adoptent une structure bouclée en parallèle de la structure maillée ou structure radiale,
- Les réseaux de distribution, suivent quasiment exclusivement une structure bouclée.

I.7.1. Réseau radiale [14] :

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

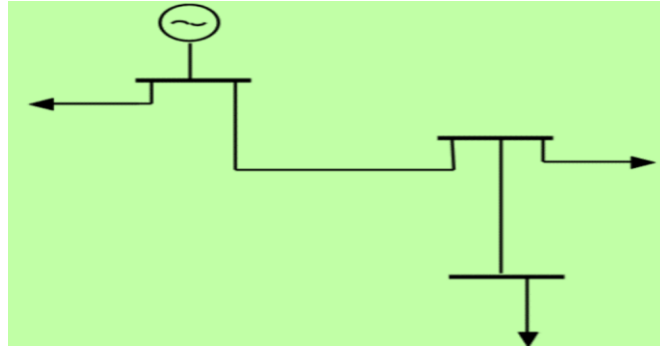


Figure (I.9) : Réseau de structure radiale.

I.7.2 Réseau maillé [14] :

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale.

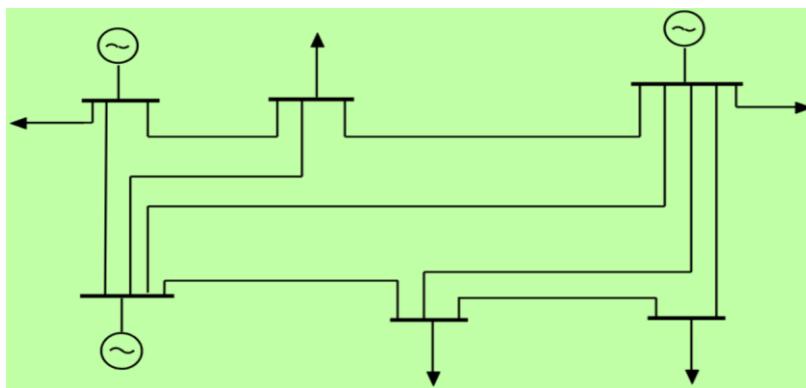


Figure (I.10) : Réseau de structure maillée.

I.7.3. Réseau bouclé [14] :

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

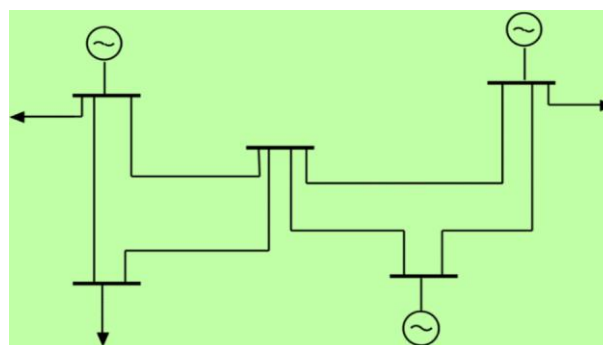


Figure (I.11) Réseau de structure bouclée.

I.8 Fonctionnement d'un réseau de transport :

Le réseau de transport relie de grandes centrales de production géographiquement dispersées à des centres de demande, généralement situés près des villes et des zones industrielles, ce qui permet de maintenir le système électrique entièrement interconnecté et en fonctionnement synchronisé [10].

Le transport d'énormes quantités d'énergie sur de longues distances nécessite de fonctionner à des tensions élevées pour réduire l'intensité du courant circulant et, par conséquent, les pertes de ligne (active et réactive).

Son rôle clé dans l'équilibre dynamique entre la production et la consommation détermine sa structure typiquement en forme de réseau, dans laquelle chaque station du réseau est soutenue par des appareillages de protection, afin d'éviter les conséquences d'éventuelles défaillances.

Les réseaux de transport ont principalement pour mission de collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation, et permettre l'interconnexion des centrales de production. Le réseau de transport est caractérisé par la tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV en Algérie, neutre directement mis à la terre et réseau maillé.

I.8.1 Gestion d'énergie d'un système :

L'intégration de plusieurs sources d'énergie renouvelable dans un système multi-sources rend le contrôle et la supervision de la distribution d'énergie particulièrement complexes. L'interaction dynamique entre ces sources et la demande peut provoquer des problèmes de stabilité et de qualité de l'énergie, peu fréquents dans les systèmes électriques classiques. Cela nécessite donc une stratégie de gestion d'énergie entre la production et la consommation.

Un contrôle adapté des systèmes hybrides multi-sources avec stockage, souvent fonctionnant comme des micro-réseaux, est essentiel pour assurer fiabilité et efficacité. La stratégie de gestion doit répartir la puissance de sortie de chaque source tout en maintenant la tension et la fréquence selon la demande. Elle vise à garantir la continuité de l'alimentation, à maximiser l'utilisation des sources renouvelables (en augmentant leur part lorsqu'une source conventionnelle, comme un groupe électrogène, est présente), à protéger les composants contre les surcharges et à renforcer la stabilité du système.

Les architectures de contrôle et de supervision de ces systèmes se divisent en trois catégories : centralisées, distribuées et hybrides. Une brève présentation de chacune sera donnée dans les sections suivantes [11].

I.8.2 Contrôle centralisé :

Dans un système de commande centralisée, les signaux de mesure provenant de toutes les parties du système, qu'il s'agisse de la production ou de la charge, sont transmis à un contrôleur unique, comme illustré dans la Figure I-12. Ce contrôleur central joue le rôle de superviseur énergétique : il prend les décisions de contrôle en s'appuyant sur l'ensemble des signaux reçus ainsi que sur un ensemble de contraintes et d'objectifs définis à l'avance. Il organise et optimise l'utilisation de l'énergie entre les différentes sources du système hybride. Les commandes correspondantes sont ensuite envoyées aux sources d'énergie via des contrôleurs locaux, afin de produire la puissance adéquate. L'avantage principal de cette architecture est qu'elle permet de mettre en œuvre une stratégie de gestion énergétique multi-objectifs - comme la réduction des coûts d'exploitation ou la diminution des émissions de gaz à effet de serre - grâce à une optimisation globale basée sur toutes les informations disponibles. Toutefois, ce mode de contrôle présente des inconvénients, notamment un temps de calcul important et une vulnérabilité liée à la

défaillance d'un seul point, pouvant entraîner l'arrêt complet du système (appelé en anglais « single-point failure »). [12]

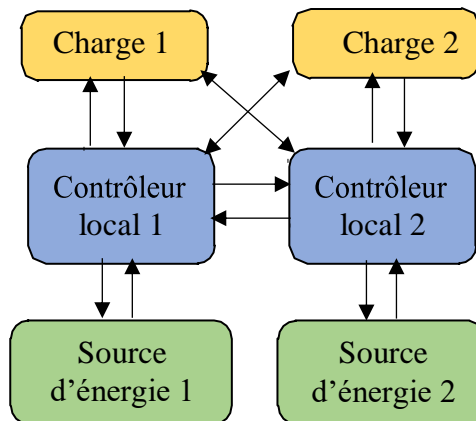


Figure (I.12) : Stratégie de gestion d'énergie centralisée.

I.8.3 Contrôle distribué :

Dans un système de contrôle entièrement distribué, les signaux de mesure des différentes sources d'énergie du système hybride sont envoyés à leurs contrôleurs locaux respectifs, comme illustré dans la Figure I-13. Ces contrôleurs locaux communiquent entre eux afin de prendre collectivement les décisions de fonctionnement du système. Un des principaux avantages de cette architecture est sa facilité d'intégration « plug and play ». De plus, le temps de calcul requis par chaque contrôleur est considérablement réduit, et le système n'est pas vulnérable à une défaillance unique pouvant entraîner un arrêt complet (single-point failure). En revanche, ce schéma implique une complexité accrue au niveau des communications, notamment en raison du nombre important de câblages nécessaires. Pour optimiser la gestion de l'énergie dans ce type de contrôle distribué, des algorithmes intelligents tels que la logique floue, les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques constituent des approches prometteuses. [12]

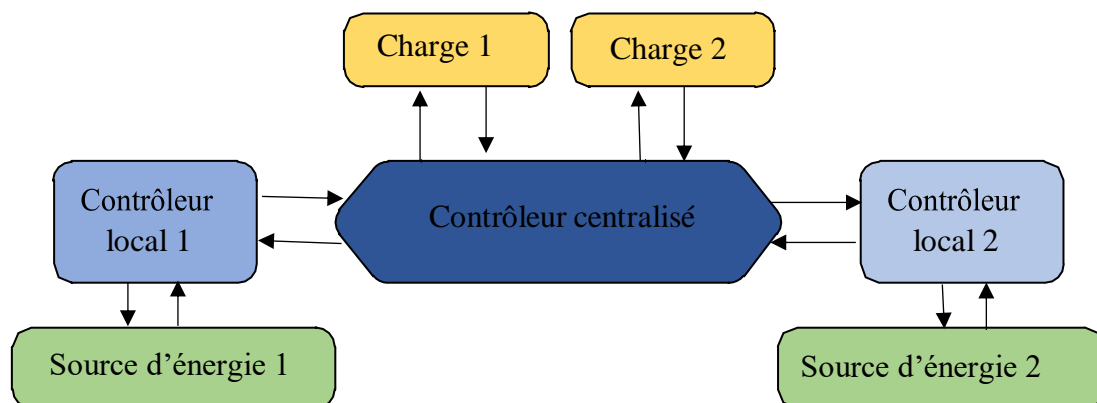


Figure (I.13) : Stratégie de gestion d'énergie distribuée.

I.8.4 Contrôle hybride centralisé et distribué :

Un schéma de contrôle plus adapté est le contrôle hybride, qui combine les approches centralisée et distribuée, comme le montre la Figure I-14. Dans ce système, les sources d'énergie sont regroupées en micro-réseaux ; à l'intérieur de chaque groupe, un contrôle centralisé est appliqué, tandis qu'un contrôle distribué assure la coordination entre les différents groupes. Ce mode de gestion hybride permet d'optimiser localement chaque groupe grâce au contrôle centralisé, tout en garantissant une coordination globale par le

contrôle distribué. Ainsi, le temps de calcul de chaque contrôleur est réduit et les risques liés à une défaillance unique pouvant entraîner l'arrêt total du système sont atténués. [12]

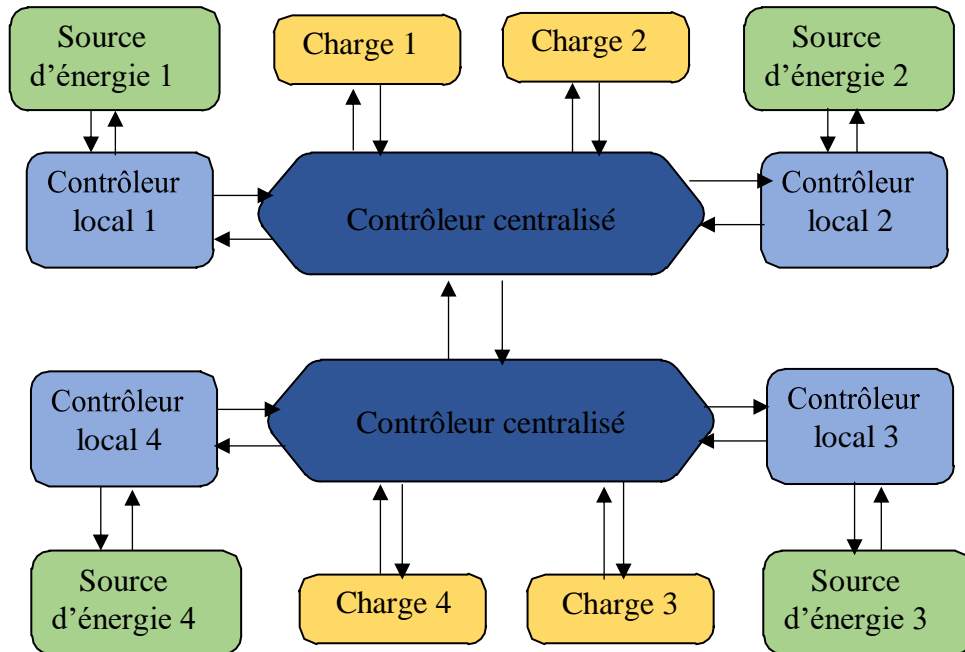


Figure (I.14) : Stratégie de gestion d'énergie hybride centralisée et distribuée.

1. Système de supervision :

L'objectif principal de tout projet d'un SMS consiste à développer un système de supervision, d'acquisition et de transfert de données de mesure (paramètres électriques des différents composants du système, etc.) pour un système hybride. Ceci permettra à l'opérateur du micro réseau de surveiller et d'analyser les performances des équipements en temps réel. Il pourra également les commander à distance à partir de l'interface du SCADA en réglant les paramètres de fonctionnement désirés (vitesse de rotation, puissance du groupe diesel et de la charge électrique, température des batteries, durée de fonctionnement et d'arrêt, etc.).

2. Système de SCADA en général :

SCADA est l'acronyme de « Supervisory Control And Data Acquisition ». En effet, le SCADA est un système de surveillance et de contrôle qui permet de gérer en temps réel et à tout moment un grand nombre de données de mesure. De plus, le système enregistre certaines données programmées dans une base de données. Cependant, une application SCADA est constituée de deux éléments :

Le premier est un mécanisme du système de processus qui permet de surveiller et contrôler à distance des unités industrielles de production.

Le deuxième élément est un réseau d'instruments intelligent qui interagit avec le premier élément par l'intermédiaire des capteurs et des sorties de commande pour permet au système SCADA de mesurer et contrôler le processus de l'unité supervisée.

Le système SCADA présente le noyau (gestionnaire en temps réel) de divers modules qui gèrent tous les composants du système.

I.9 Dispatching économique-environnemental :

Le dispatching économique et environnemental consiste à répartir la production d'électricité entre les différentes unités génératrices, tout en respectant les contraintes techniques du réseau électrique. Le

dispatching économique a pour objectif de minimiser le coût total de production, en déterminant la répartition optimale des puissances générées, tout en tenant compte des limites minimales et maximales de chaque unité ainsi que des pertes dans le réseau. Le dispatching environnemental, quant à lui, vise à réduire les émissions polluantes, notamment celles de NO_x, SO_x et CO₂, en ajustant la répartition de la production électrique de manière à limiter l'impact écologique du réseau. [13]

I.10 Objectifs et Méthodologie du Mémoire :

La production d'électricité à partir de centrales thermiques joue un rôle essentiel dans la couverture des besoins énergétiques. Cependant, ces centrales génèrent des émissions polluantes qui ont un impact négatif sur l'environnement. Il est donc nécessaire de trouver des solutions permettant d'optimiser la production afin de répondre à la demande tout en limitant ces effets indésirables.

Dans ce mémoire, notre objectif est de traiter séparément deux types d'optimisation :

- Le dispatching économique, qui vise à répartir la production d'électricité entre les différentes unités génératrices de manière à minimiser le coût total de production, tout en respectant les contraintes techniques et l'équilibre entre l'offre et la demande.
- Le dispatching environnemental, qui consiste à ajuster la répartition des puissances générées pour réduire les émissions polluantes, en particulier les oxydes d'azote (NO_x), tout en maintenant la stabilité du réseau.

Pour cela, nous avons utilisé un réseau test standard et appliqué la méthode des itérations de lambda, combinée à un calcul d'écoulement de puissance réalisé avec l'algorithme Newton-Raphson. Cette démarche permet, dans un premier temps, de déterminer l'état initial du réseau, puis d'analyser l'impact de l'optimisation économique et environnementale sur son fonctionnement. À travers ce travail, nous voulons montrer qu'une meilleure gestion de la production est possible lorsque les aspects économiques et environnementaux sont étudiés séparément, ce qui permet de mieux comprendre les enjeux et de proposer des solutions adaptées aux systèmes électriques actuels.

I.11 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de poser le cadre général de notre étude. Nous avons d'abord présenté les différentes sources de production d'énergie électrique, en soulignant leur rôle dans la satisfaction des besoins croissants en électricité. Une attention particulière a été portée aux centrales thermiques, qui, malgré leur importance dans la couverture de la demande, présentent des inconvénients majeurs, notamment leur impact négatif sur l'environnement à travers l'émission de gaz polluants.

Nous avons également décrit la structure et les architectures des réseaux électriques, tout en introduisant les notions fondamentales liées à l'écoulement de puissance. Cette étape est essentielle pour analyser l'état d'un réseau et pour assurer une gestion efficace et sécurisée des flux d'énergie.

Enfin, nous avons abordé le concept de dispatching, en distinguant le dispatching économique, qui vise à réduire les coûts de production, et le dispatching environnemental, dont l'objectif est de limiter les émissions polluantes. Ces deux approches constituent la base sur laquelle repose notre travail.

Ainsi, ce chapitre introductif nous a permis d'établir les fondations théoriques nécessaires à la compréhension des problématiques étudiées dans ce mémoire. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation mathématique et à la présentation des méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation, ouvrant la voie à la simulation et à l'analyse détaillée des résultats présentées par la suite.

Chapitre II

Étude et modélisation du dispatching économique et environnemental

II .1. Introduction :

La croissance continue de la consommation d'énergie électrique, stimulée par l'industrialisation et l'urbanisation, impose aux opérateurs des systèmes électriques de garantir un équilibre permanent entre la production et la demande, tout en minimisant les coûts et en assurant une qualité de service fiable. Dans ce contexte, le dispatching économique occupe une place centrale. Il consiste à répartir la charge totale demandée entre les différentes unités de production, de façon à minimiser le coût global de génération, tout en respectant les contraintes techniques des générateurs et du réseau. La fonction de coût est généralement modélisée par une relation quadratique en fonction de la puissance générée par chaque unité. Pour résoudre ce problème, plusieurs techniques d'optimisation existent, dont la méthode classique des itérations de lambda, qui repose sur la notion de coût marginal et ajuste la répartition des puissances générées jusqu'à atteindre l'équilibre, en tenant compte des pertes de transmission. Parallèlement, les enjeux environnementaux sont devenus une préoccupation majeure. En effet, la production d'électricité, en particulier dans les centrales thermiques, entraîne des émissions de gaz polluants tels que le CO₂, le SO_x et le NO_x, qui ont un impact significatif sur l'environnement et la santé publique. Pour répondre à cette problématique, le dispatching environnemental a été introduit, visant à réduire les émissions polluantes tout en maintenant la stabilité et la performance du réseau [18].

Dans ce chapitre, nous présentons les bases théoriques nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre du dispatching économique et environnemental. Nous y détaillerons les principes fondamentaux de l'écoulement de puissance, la méthode de Newton-Raphson pour sa résolution, ainsi que la formulation mathématique du dispatching économique par la méthode des itérations de lambda, avant d'introduire la modélisation des émissions polluantes.

II.2. Calcul de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance constitue une étape cruciale dans l'analyse, la conception et la planification des réseaux électriques. Elle permet d'évaluer l'état d'un réseau en régime permanent équilibré en déterminant les modules et les phases des tensions aux nœuds, ainsi que les courants circulant dans les lignes de transport. À partir de ces informations, il est possible de calculer les puissances actives et réactives transmises et d'évaluer les pertes de transmission. Grâce aux simulations, l'écoulement de puissance offre la possibilité d'observer et d'analyser le comportement du réseau face à différentes situations, telles que la perte de lignes, les variations brusques de charges ou les ajustements opérés sur le système [9]. Il joue ainsi un rôle fondamental dans la gestion et l'optimisation des échanges de puissance entre les centres de production, en particulier dans le cadre du dispatching économique, tout en permettant de prévoir et de gérer efficacement les changements dans les conditions d'exploitation du réseau.

II.2.1 Modélisation des éléments du réseau électrique :

II.2.1.1 Classification des jeux de barre d'un réseau électrique [9] :

La classification des jeux de barres (ou nœuds) dans l'analyse de l'écoulement de puissance est cruciale pour comprendre le comportement des réseaux électriques. Chaque jeu de barres est caractérisé par quatre paramètres principaux : la puissance active injectée ou soutirée (P), la puissance réactive injectée ou soutirée (Q), le module de la tension (V), et le déphasage de la tension (δ). Les jeux de barres sont classés en trois catégories principales :

Jeux de Barres de Contrôle (Control Bus) :

- Type : PV
- Description : Associés aux centrales de production, ces jeux de barres ont une puissance active (P) et un module de tension (V) spécifiés. Les variables à déterminer sont la phase de la tension (δ) et la puissance réactive (Q).

Jeux de Barres de Charge (Load Bus) :

- Type : PQ
- Description : Généralement associés aux charges, ces jeux de barres ont des consommations de puissances active (P) et réactive (Q) spécifiées. Des générateurs avec des puissances fixes peuvent également être associés. Les variables à déterminer sont le module (V) et la phase (δ) de la tension.

Jeu de Barres de Référence (Slack Bus) :

- Type : Balancier ou Bilan
- Description : Ce jeu de barres est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Il sert à compenser les pertes de transmission et à fournir une référence pour les phases des tensions. Le module et la phase de la tension sont spécifiés (généralement $V=1$ et $\delta=0$), tandis que les puissances active (P) et réactive (Q) sont calculées après résolution du problème d'écoulement de puissance.

Tableau (II.1) : Classification des jeux de barre [9].

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
PQ	Les puissances actives et réactives (P, Q)	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)
PV	Puissance active et la tension (P, V)	Angle de phase de tension et puissance réactive (δ , Q)
Référence	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)	Le courant, les puissances active et réactive (P, Q)

II.2.1.2 Générateur de puissance [20] :

Les générateurs sont des dispositifs qui convertissent différentes formes d'énergie (mécanique, photonique, chimique, etc.) en énergie électrique. Ils peuvent injecter ou absorber de l'énergie active et réactive, tout en régulant le niveau de tension désiré. Cependant, leur capacité de production est limitée, tant pour la puissance active que pour la puissance réactive. Il est représenté par un schéma équivalent électrique.

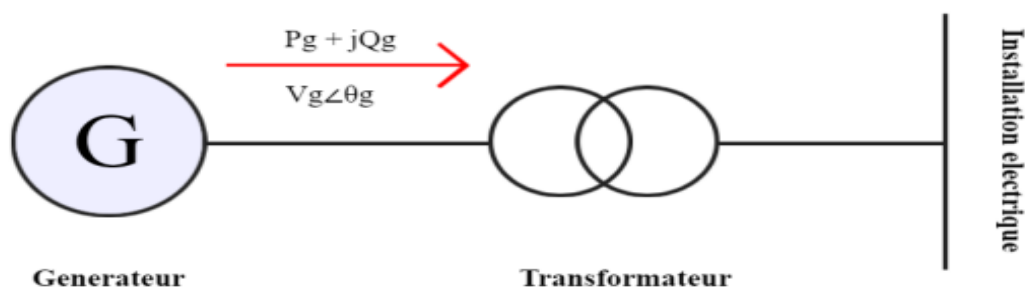


Figure (II.1) : Modélisation d'un générateur.

Modélisation des générateurs :

Les générateurs électriques peuvent être modélisés selon deux approches principales : modélisation dynamique et modélisation statique.

- La modélisation dynamique prend en compte les variations temporelles des grandeurs électriques, notamment lors des perturbations ou des transitions rapides dans le réseau.
- La modélisation statique, utilisée dans ce travail, considère les grandeurs électriques comme constantes en régime permanent, ce qui la rend particulièrement adaptée pour les études d'écoulement de puissance et d'optimisation.

Les générateurs sont soumis à des contraintes physiques qui se traduisent par des limites sur :

- La tension à leurs bornes,
- La puissance active maximale et minimale qu'ils peuvent fournir,
- Ainsi que leur puissance réactive, nécessaire pour compenser les fluctuations de charge et maintenir la stabilité des tensions dans le réseau.

Les limites de tension empêchent le générateur de dépasser une valeur admissible pour éviter des endommagements, tandis que les contraintes sur la puissance active et réactive sont liées aux caractéristiques thermiques et magnétiques de la machine. Ces limites doivent donc être intégrées dans les modèles pour assurer la stabilité et la sûreté du réseau électrique.

II.2.1.3 Charge [9] :

Une charge sera simplement représentée par une consommation de puissance active. En outre, elle peut consommer ou fournir de la puissance réactive, selon sa nature : les charges inductives consomment de la puissance réactive, tandis que les charges capacitatives la fournissent.

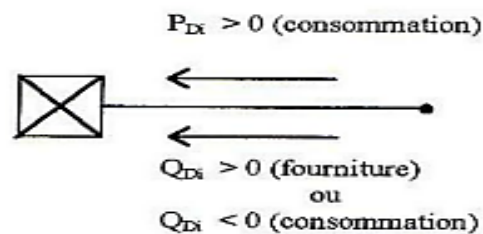


Figure (II.2) : Représentation d'une charge par la puissances consommée et fournie.

Modèles de charges :

Les charges électriques peuvent être modélisées selon plusieurs typologies principales :

- Modèle constant : puissance consommée supposée constante, indépendante de la tension.
- Modèle dépendant de la tension : puissance variante en fonction de la tension fournie.
- Modèle ZIP : charge considérée comme combinaison de trois composantes : impédance constante (Z), courant constant (I), et puissance active constante (P).

II.2.1.4 Ligne de transport [15] :

Les lignes de transport électrique sont généralement classées en trois catégories selon leur longueur :

- Lignes courtes : Inférieures à 80 km.
- Lignes moyennes : Inférieures à 250 km.
- Lignes longues : Supérieures à 250 km.

Étant donné que nos travaux se focalisent sur les réseaux de transport haute et très haute tension, nous nous concentrons spécifiquement sur les lignes longues. Ces dernières sont souvent modélisées à l'aide d'un schéma équivalent en π , qui simplifie leur analyse tout en préservant leurs caractéristiques fondamentales.

Pour modéliser une ligne électrique entre deux points 'i' et 'j', on représente la ligne par trois éléments : une résistance R_{ij} qui montre les pertes d'énergie sous forme de chaleur, une réactance X_{ij} qui illustre comment la ligne s'oppose aux changements de courant, et une admittance shunt $Y_{ij}/2$ à chaque extrémité, reflétant les effets capacitifs entre la ligne et la terre. Ce modèle simplifié nous permet de comprendre le comportement de la ligne, de calculer les pertes et de s'assurer que l'électricité est transmise de manière efficace entre les deux points. Elle est représentée par le modèle ci-dessous.

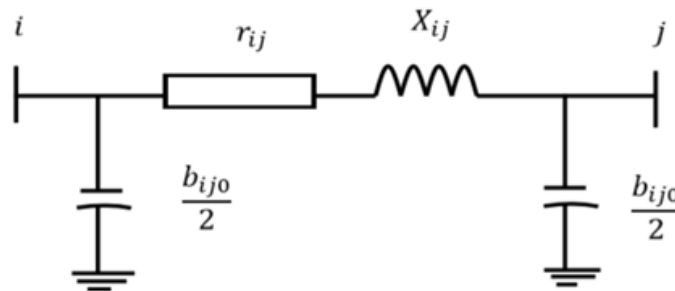


Figure (II.3) : Modélisation d'une ligne de transport.

La matrice d'admittance nodale d'une ligne reliant un nœud i à un nœud j est donnée par :

$$\underline{Y} \begin{pmatrix} y_{ij} + \frac{y_{ij0}}{2} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + \frac{y_{ij0}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Où l'admittance longitudinale Y_{ij} vaut :

$$\underline{y}_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} - jb_{ij} \quad (\text{II.2})$$

L'admittance transversale correspondant aux effets capacitifs s'écrit :

$$\underline{y}_{ij0} = jb_{ij0} \quad (\text{II.3})$$

r_{ij} : Résistance longitudinale.

x_{ij} : Réactance longitudinale.

b_{ij0} : Susceptance transversale.

II.2.1.5 Transformateur [15] :

Un transformateur électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Ce modèle inclut deux paramètres principaux : le rapport de transformation a et l'impédance de fuite. Les rapports a_{ij} sont intégrés dans les éléments de la matrice d'admittance, où les susceptances dépendent des rapports de transformation. Cette représentation permet de mieux comprendre comment le transformateur influence les propriétés électriques du circuit, notamment en termes de puissance et d'impédance.

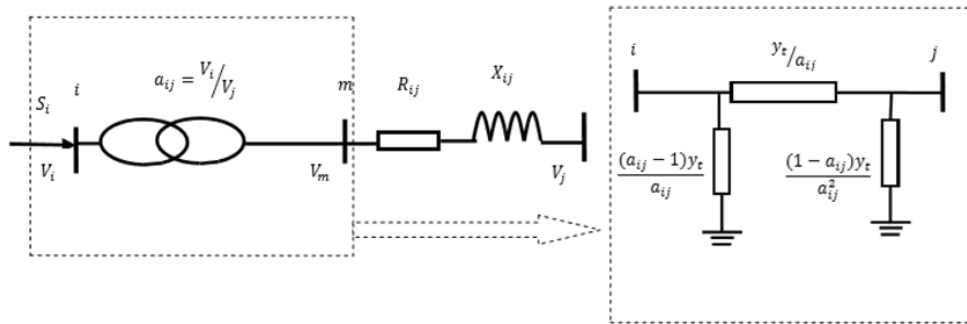


Figure (II.4) : Modèle des transformateurs.

La matrice d'admittance d'un transformateur connecté entre un nœud i et un nœud j est exprimée comme suit :

$$Y = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} Y_{ij} & -\frac{1}{a} Y_{ij} \\ -\frac{1}{a} Y_{ij} & Y_{ij} \end{pmatrix} \tag{II.4}$$

Avec :

a : le rapport de transformation.

y_{ij} : l'admittance de la branche i - j

Transformateurs à prises réglables :

Les transformateurs sont modélisés par impédances série et admissions shunt. Les transformateurs à prises réglables permettent d'ajuster le rapport de transformation, ce qui modifie la tension secondaire pour contrôler le réseau.

Ce mécanisme est clé pour maintenir la qualité de la tension et gérer efficacement les flux de puissance.

II.2.2 Formulation mathématique de l'écoulement de puissance :

II.2.2.1 Matrice admittance :

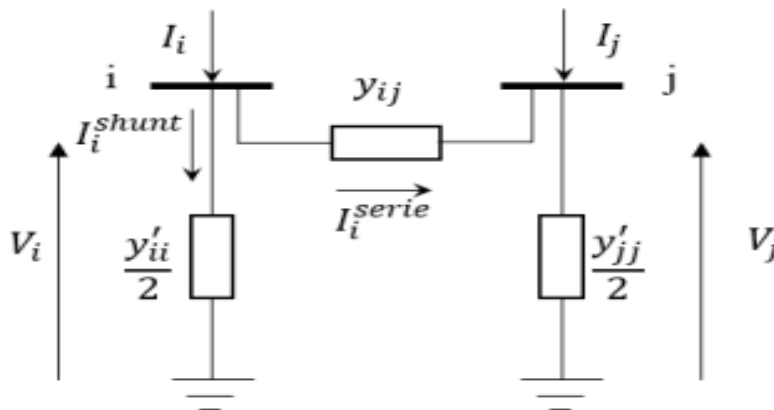


Figure (II.5) : schéma d'une branche [16]

I_i : Courant injecté au nœud i .

I_j : Courant injecté au nœud j .

I_{ij} : Courant transitant du nœud i au nœud j .

I'_{ij} : Courant de fuite au nœud i .

y_{ij} : Admittance de ligne i - j .

$\frac{y_{ij}}{2}$: Admittance shunt des nœuds i et j.

V_i, V_j : Tensions aux nœuds i et j.

De façon générale, la matrice des admittances d'un réseau électrique à n nœuds est de la forme suivante [13] :

$$[\dot{Y}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les éléments diagonaux Y_{ii} et les éléments non diagonaux Y_{ij} ($i \neq j$) sont exprimés respectivement par les équations (II.6) et (II.7).

$$\dot{Y}_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{y'_{ij}}{2} + \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \quad (\text{II.6})$$

$$\dot{Y}_{ij} = -\dot{Y}_{ji} \quad (\text{II.7})$$

II.2.2.2 Puissances transmises :

L'écoulement de puissance dans une ligne i-j s'exprime par :

$$\vec{S}_{ij} = \vec{V}_i \vec{I}_{ij} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\vec{I}_{ij} = (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \vec{y}_{ij} + \vec{V}_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad (\text{II.9})$$

Les puissances transmises seront donc données par :

$$\vec{S}_{ij}^* = \vec{V}_i^* (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \vec{y}_{ij} + \vec{V}_i^* \vec{V}_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad (\text{II.10})$$

II.2.2.3 Puissances injectées :

Le bilan énergétique (puissance injectée) au nœud i est donné par la relation suivante :

$$\vec{S}_i = \sum_{j=1}^n \vec{S}_{ij} = P_i + jQ_i \quad (\text{II.11})$$

$$\vec{S}_{ij}^* = P_i - jQ_i = \vec{V}_i^* \sum_{j=1}^n \vec{Y}_{ij} \vec{V}_j \quad (\text{II.12})$$

Les courants sont calculés pour l'ensemble des nœuds à l'exception du nœud bilan comme suit :

$$\vec{I}_i = \frac{\vec{S}_i^*}{\vec{V}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\vec{V}_i^*} \quad (\text{II.13})$$

Le courant est considéré comme positif lorsqu'il entre dans un nœud, et négatif lorsqu'il en sort.

Dans un réseau comportant des éléments shunt, le courant total injecté à un nœud est donné par la relation :

$$\vec{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\vec{V}_i^*} - \vec{y}_{i0} \vec{V}_i \quad (\text{II.14})$$

II.2.2.4 Les pertes :

Les pertes peuvent être calculées à l'aide de la relation suivante :

$$\vec{S}_L = P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n P_i + j \sum_{i=1}^n Q_i \quad (\text{II.15})$$

II.2.3 Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance [9] :

La complexité des problèmes d'écoulement de puissance a conduit à l'adoption de méthodes numériques pour réduire le temps de résolution manuelle.

Dans cette partie, nous présenterons diverses méthodes numériques utilisées pour analyser l'écoulement de puissance, en détaillant une des méthodes les plus utilisées pour résoudre la répartition de charge dans les réseaux de distribution. Parmi ces méthodes, on retrouve :

- La méthode de Gauss-Seidel (GS).
- La méthode de Newton-Raphson (NR).
- La méthode de découplage rapide.

Ces approches numériques sont essentielles pour optimiser le calcul des flux de puissance dans les réseaux électriques complexes.

II.2.4 Méthode de résolution : Méthode de Newton-Raphson :

Newton a introduit la méthode de Newton-Raphson en 1669, et Joseph Raphson (1648–1715) l'a achevée en 1690, raison pour laquelle cette méthode est successivement approximative [13].

Afin de surmonter les défis rencontrés dans l'étude de l'écoulement de puissance, Van-Ness et Griffin l'ont développée en 1961. Les équations quadratiques de cette méthode nous permettent d'exprimer les puissances active et réactive en fonction des tensions nodales.

Elle est largement adoptée pour l'étude de l'écoulement de puissance en raison de sa rapidité de convergence, généralement supérieure à celle d'autres méthodes ainsi que de sa fiabilité, notamment dans des situations où d'autres approches peuvent échouer. Selon la littérature, elle est fréquemment utilisée pour résoudre les équations non linéaires. L'équation est exprimée sous une forme de coordonnées polaires, où l'indice " j " prend en compte le nœud " i " [9].

Algorithme de la méthode [13]

1. Former la matrice admittance du réseau.

2. Supposons les tensions initiales comme suit :

$$\vec{V}_k = |\vec{V}_k, \text{spec}| < 0 \quad \text{Pour tous les nœuds PV.}$$

$$\vec{V}_k = 1 < 0 \quad \text{Pour tous les nœuds PQ.}$$

3. A l'itération (i + 1), calculer $P_{k,\text{cal}}^{(i+1)}$ pour tous les nœuds PV et PQ et $Q_{k,\text{cal}}^{(i+1)}$ pour tous les nœuds PQ en utilisant les tensions de l'itération précédente $\vec{V}_k^{(i)}$.

4. Calculer les écarts de puissances :

$$\Delta P_k^{(i)} = P_{k,\text{spec}} - P_{k,\text{cal}}^{(i+1)} \quad \text{Pour tous les nœuds PV et PQ.}$$

$$\Delta Q_k^{(i)} = Q_{k,\text{spec}} - Q_{k,\text{cal}}^{(i+1)} \quad \text{Pour tous les nœuds PQ.}$$

5. Calculer le jacobéen $[J^{(i)}]$ en utilisant les tensions $\vec{V}_k^{(i)}$.

6. Calculer :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(i)} \\ \Delta |\vec{V}|^{(i)} \end{bmatrix} = [J^{(i)}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^{(i)} \\ \Delta Q^{(i)} \end{bmatrix}$$

7. Mettez à jour les variables comme suit :

$$\delta_k^{(i+1)} = \delta_k^{(i)} + \Delta \delta_k^{(i)} \quad \text{Pour tous les nœuds PV et PQ.}$$

$$|\vec{V}_k|^{(i+1)} = |\vec{V}_k|^{(i)} + \Delta |\vec{V}_k|^{(i)} \quad \text{Pour tous les nœuds PQ.}$$

8. Aller à l'étape 3 et recommencez jusqu'à ce que les écarts de puissance soient dans la tolérance acceptable.

Tableau (II.2) : Comparaison des principales méthodes de calcul de l'écoulement de puissance [9].

Critères	Gauss-Seidel	Newton-Raphson	Découplage rapide
Rapidité	Lente (convergence linéaire	Très rapide (convergence quadratique)	Rapide, légèrement plus lente que Newton-Raphson
Précision	Moyenne, sensible aux conditions initiales	Très précise, adaptée aux réseaux complexes	Bonne, mais légèrement moins précise que Newton-Raphson
Complexité	Simple à mettre en œuvre	Complexe (calcul et mise à jour de la jacobienne)	Moins complexe que Newton-Raphson, nécessite des hypothèses
Utilisation	Petits réseaux, études simples	Grands réseaux, études précises	Réseaux de grande taille ou la rapidité est prioritaire

Dans ce travail, la méthode de Newton-Raphson a été choisie pour sa rapidité et sa précision. Grâce à sa convergence quadratique, elle offre des résultats fiables en peu d'itérations, ce qui la rend idéale pour analyser et optimiser des réseaux électriques complexes. Sa robustesse et sa capacité à résoudre des équations non linéaires permettent d'évaluer avec exactitude l'état du réseau, les pertes et les émissions, garantissant ainsi une optimisation efficace du système étudié.

II.3 Dispatching économique :

Les centrales électriques connectées au réseau sont appelées à produire suffisamment de puissance pour répondre à la demande des charges. Cette demande varie considérablement durant les journées et les saisons, et les coûts de production d'énergie diffèrent aussi d'une centrale à une autre, selon le type et l'efficacité. Par conséquent, il est indispensable de répartir la capacité de génération d'une manière à satisfaire la demande avec un minimum de coût [19].

L'objectif du dispatching économique optimal est alors la minimisation du coût de production de l'énergie électrique, en satisfaisant des contraintes de types égalité et inégalité. Nous donnons quelques exemples [18] :

- Le dispatching économique tend à minimiser la quantité d'eau gaspillée ou de produire le maximum de MWh à partir de la quantité d'eau disponible dans un réseau composé de centrales hydrauliques.
- Dans un réseau composé de centrales thermiques fonctionnant au charbon, le dispatching économique tend à répartir la production entre les différentes stations pour minimiser le taux de pollution.
- Soient deux générateurs, l'un fonctionne au pétrole et l'autre au gaz. Le dispatching économique dans ce cas permet de partager la charge entre les deux générateurs pour que le coût global de production soit minimal.

En Algérie, le combustible étant essentiellement le Gaz Naturel, il s'agit d'optimiser la consommation spécifique des générateurs-turbines à gaz et à vapeur.

II.3.1 Coût de génération [19] :

Le coût de production électrique varie d'une centrale à une autre, en fonction de plusieurs facteurs tels que le type de combustible utilisé, la technologie employée, ainsi que d'autres paramètres spécifiques à chaque unité de production. Pour une centrale thermique, le coût horaire de génération d'une puissance P_G peut être approximé par une fonction non linéaire, souvent modélisée par un polynôme du second degré, représentant la relation entre la puissance produite et le coût total associé à cette production.

$$C(P_G) = aP_G^2 + bP_G + c \text{ (\$/h)} \quad (\text{II.16})$$

Avec a , b et c , des coefficients constants propres à chaque centrale.

\$: est une unité monétaire.

Lorsqu'il y a n centrales, le coût total de génération est donc

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i (P_G) \quad (\text{II.17})$$

II.3.2 Contraintes [19] :

Soit un nombre n d'unités de génération, ou centrales connectées au réseau. Ces centrales sont appelées à produire la puissance PD demandée par la charge. Le dispatching économique doit optimiser les coûts pour répondre à la demande de la charge tout en respectant les conditions suivantes :

- Produire toute la puissance demandée par la charge et les pertes de transmission (transport)
- Une centrale ne doit pas fonctionner au-dessous de sa capacité minimale ou au-dessus de sa capacité maximale

La première condition fait sortir la première contrainte, dite contrainte d'égalité, et elle est écrite comme :

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_{Di} + P_{loss} \quad (\text{II.18})$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Où P_{Gi} , la puissance générée par une centrale i, P_{loss} représente les pertes de transmission.

La deuxième condition représente une deuxième contrainte dite contrainte d'inégalités, et elle est exprimée comme : $P_{Gi, \min} - P_{Gi} \leq 0$ et $P_{Gi} - P_{Gi, \max} \leq 0$

Par conséquent le problème de dispatching économique consiste à minimiser le coût total CT, tout en respectant ces deux contraintes.

En résumé : Le dispatching peut être résumé en trois points :

- Pour chaque demande de puissance, calculer les puissances que doivent générer les différentes centrales, et ce de manière à réduire le coût global.
- La puissance totale générée doit couvrir la demande des charges et les pertes de transmission.
- Chaque puissance calculée doit respecter les limites de production de l'unité correspondante.

Si la puissance calculée est inférieure à la puissance minimale, elle est ajustée à cette valeur minimale. En revanche, si elle dépasse la puissance maximale, elle est ramenée à la valeur maximale autorisée.

II.3.3 Solutions du Dispatching Économique avec et sans Pertes [18] :

Le dispatching économique est un problème majeur dans l'exploitation des systèmes électriques, dont l'objectif est d'allouer la production de puissance active entre les différentes centrales en minimisant le coût total de génération, tout en garantissant l'équilibre énergétique du système et en respectant les contraintes techniques liées aux capacités des générateurs.

II.3.3.1 Dispatching Économique Sans Pertes :

Dans le cadre simplifié du dispatching sans pertes, on suppose que les pertes énergétiques dans les lignes de transmission sont négligeables. La contrainte principale consiste donc à équilibrer la puissance générée P_{Gi} aux générateurs avec la demande totale P_D :

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D \quad (\text{II.19})$$

λ : le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'équilibre entre production, demande et pertes.

L'objectif est la minimisation du coût total :

$$\min C_T = \sum_{i=1}^n C_i P(G_i) \quad (\text{II.20})$$

Sous les contraintes opérationnelles de limites minimales et maximales de puissance générée par chaque unité :

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$$

Cette optimisation est résolue analytiquement en imposant l'égalisation des coûts marginaux, définis comme la dérivée du coût par rapport à la puissance générée :

$$\frac{\partial C_1}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial C_2}{\partial P_{G2}} = \dots = \frac{\partial C_n}{\partial P_{Gn}} = \lambda \quad (\text{II.21})$$

λ : est le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'équilibre énergétique.

Cette égalisation plaide pour que chaque unité produise une puissance telle que son coût incrémental soit identique, assurant ainsi le minimum global du coût total. La résolution consiste alors à calculer λ pour satisfaire la contrainte d'égalité et à déterminer les puissances optimales P_{Gi} . Cette méthode simple est utilisée pour son efficacité, bien que la négligence des pertes limite sa précision dans des réseaux réels.

II.3.3.2 Dispatching économique avec pertes :

Lorsqu'on considère les pertes dans les réseaux, le dispatching devient plus complexe. Les pertes de puissance dans les lignes, notées P_{perte} , dépendent de la puissance générée par chaque centrale et sont principalement dues aux résistances des conducteurs parcourus par des courants électriques.

Modélisation des pertes :

Les pertes sont généralement modélisées au moyen de coefficients B selon l'expression quadratique :

$$P_{\text{perte}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^{ng} B_{0i} P_{Gi} + B_{00} \quad (\text{II.22})$$

P_{perte} : Pertes actives dans les réseaux.

B_{ij} : Les B-coefficients.

B_{0i} : Un terme linéaire.

B_{00} : Un terme constant.

Cette formulation permet d'intégrer la contribution de chaque couple de générateurs aux pertes totales, où la matrice symétrique B Best réalisé à partir du modèle du réseau et de ses caractéristiques.

Formulation mathématique du problème :

La contrainte d'équilibre énergétique s'écrit alors :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} = P_D + P_{\text{perte}} \quad (\text{II.23})$$

Le problème est de minimiser le coût total de génération tout en respectant cette contrainte et les contraintes sur les limites de production :

$$\min C_T = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}), \quad \text{sous } P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (\text{II.24})$$

Lors de l'introduction de la fonction Lagrangienne :

$$L = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) + \lambda(P_D + P_{\text{perte}} - \sum_{i=1}^n P_{Gi}) + \sum_{i=1}^n h_i(P_{Gi}) \quad (\text{II.25})$$

où :

λ est le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'égalité.

$h_i(P_{Gi})$ regrouper les termes liés aux contraintes d'inégalité sur les limites de puissance, incluant les coefficients $\sigma_{i,\min}$, $\sigma_{i,\max}$ qui sont nuls lorsque la contrainte est respectée.

$$h_i(P_{Gi}) = \sigma_{i,\min}(P_{G,\min} - P_{Gi}) + \sigma_{i,\max}(P_{G,\max} - P_{Gi}) \quad (\text{II.26})$$

$\sigma_{i,\min} = 0$ quand $P_{Gi} > P_{G,\min}$

$\sigma_{i,\max} = 0$ quand $P_{Gi} < P_{G,\max}$

Résolution par méthode des multiplicateurs de Lagrange [19] :

L'optimalité est caractérisée par l'annulation des dérivées partielles de la fonction Lagrangienne :

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} + \lambda \frac{\partial P_{perte}}{\partial P_{Gi}} + \frac{\partial h_i}{\partial P_{Gi}} = 0 \quad (\text{II.27})$$

En rappelant que la dérivée du coût est le coût incrémental IC_i , et que les dérivées des pertes sont les pertes incrémentales IL_i :

$$IC_i + \lambda IL_i + \frac{\partial h_i}{\partial P_{Gi}} = 0 \quad (\text{II.28})$$

Lorsque $h_i = 0$ (contraintes non actives), on obtient un système non linéaire dépendant des puissances et λ .

Ce système est résolu par la méthode itérative dite "méthode des itérations de lambda", dont le principe est :

- Initialiser une valeur de λ à partir d'une solution sans pertes.
- Calculer les puissances P_{Gi} à partir de l'égalité des coûts incrémentaux pondérés par les pertes incrémentales.
- Calculer les pertes totales P_{perte} .
- Évaluer le résidu $\Delta P = P_D + P_{perte} - \sum P_{Gi}$.
- Mettre à jour λ sur la base de ΔP et du gradient associé.
- Répéter les étapes jusqu'à ce que ΔP soit inférieure à une tolérance donnée.
- Cette méthode itérative permet d'intégrer avec finesse la complexité des pertes dans la solution du dispatching.

Importance des contraintes d'inégalités :

Les contraintes d'inégalités, modélisées par $h_i(P_{Gi})$, garantit que les solutions restent dans les limites physiques des générateurs.

Lorsque la puissance P_{Gi} se situe à l'intérieur des limites autorisées, les coefficients liés aux contraintes d'inégalité sont nuls. Sinon, ils s'activent et modifient la solution en excluant l'unité du calcul d'optimisation partielle, puis en réajustant les puissances des autres unités.

Conclusion :

Les solutions du dispatching économique sans et avec pertes sont ainsi distinguées par la prise en compte ou non des pertes énergétiques dans les lignes.

La méthode des multiplicateurs de Lagrange, combinée à une procédure itérative sur le multiplicateur λ , permet de résoudre ce problème avec des contraintes d'égalité et d'inégalité, aboutissant à une répartition optimale et réalisable des puissances générées.

Cette méthodologie est au cœur des travaux pratiques et simulations réalisés dans les réseaux tests comme le réseau IEEE 9 bus étudié.

II.4 Dispatching environnemental [17] :

Le dispatching environnemental désigne la gestion et l'ordonnement de la production d'électricité (ou d'autres activités logistiques) en tenant compte non seulement des coûts économiques, mais aussi des impacts environnementaux, notamment la réduction des émissions polluantes (CO₂, NO_x, SO_x).

Il s'écrit sous la forme :

$$\text{Min}E = \sum_{i=1}^{ng} E_i(P_{Gi}) \quad (\text{II.29})$$

$$E_i(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \delta_i (\text{ton/h}) \quad (\text{II.30})$$

$E_i(P_{Gi})$: La fonction des émissions des gaz.

$\alpha_i\beta_i\delta_i$: Coefficients caractéristiques propres à chaque groupe de production.

II.5 Formulation classique du problème du Dispatching économique [13] :

Les producteurs d'énergie électrique établissent expérimentalement des courbes représentant le coût de production de chaque groupe en fonction de la puissance délivrée. Ces courbes sont généralement modélisées par un polynôme de degré « n ». En pratique, elles sont le plus souvent exprimées sous la forme d'un polynôme de second degré, donné par l'équation (II.19).

La réduction du coût total de production d'énergie électrique consiste à minimiser cette fonction, comme indiqué par l'équation (II.22).

Cette optimisation est réalisée sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D - P_{\text{perte}}(P_{Gi}) = 0 \quad (\text{II.31})$$

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (\text{II.32})$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{Gi} - Q_D - Q_{\text{perte}} = 0 \quad (\text{II.33})$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (\text{II.35})$$

$$|\theta_{ij}| \leq \theta_{ij, \max} \quad (\text{II.36})$$

P_D : Puissance active demandée.

$P_{\text{perte}}(P_{Gi})$: Pertes actives totales dans le réseau.

$P_{Gi \min}$: Puissance minimale active du générateur i.

$P_{Gi \max}$: Puissances maximale active du générateur i.

Q_{Gi} : Puissance réactive produite par le générateur i.

Q_D : Puissance réactive demandé.

Q_{perte} : Pertes réactives totales dans le réseau.

$Q_{Gi \min}$: Puissance minimale réactive du générateur i

$Q_{Gi \max}$: Puissance maximale réactive du générateur i.

V_i : Tension nodale.

$V_{i \min}$: Tension nodale minimale.

$V_{i \max}$: Tension nodale maximale.

θ_{ij} : déphasage entre les tensions V_i et V_j .

$\theta_{ij \max}$: déphasage maximal entre les tensions V_i et V_j .

La résolution de ce problème, avec l'ensemble de ses contraintes, devient complexe lorsqu'il s'agit d'un grand réseau comportant de nombreux nœuds et lignes d'interconnexion. Il est donc nécessaire d'apporter des simplifications.

Nous avons négligé les contraintes (II.35) et (II.36), en supposant que tous les nœuds présentent approximativement la même tension en amplitude et en phase. Cette hypothèse simplificatrice influe néanmoins sur la fonction coût, puisque le respect des contraintes de tension joue un rôle essentiel pour garantir la sécurité la sécurité d'exploitation ainsi que la protection des équipements. Contrairement à la fréquence, la tension peut varier localement dans des marges relativement larges, de l'ordre de $\pm 10\%$. Toutefois, le dépassement de la limite supérieure, observé notamment en période de faible charge, peut compromettre l'isolement des équipements. À l'inverse, une tension trop basse nuit au bon fonctionnement

du réseau et peut entraîner un effondrement progressif de la tension, phénomène à l'origine de nombreuses pannes majeures.

Les contraintes (II.34) et (II.36) peuvent être ignorées, car la puissance réactive a un impact relativement faible sur la fonction coût.

Quant à la contrainte (II.21), nous la traiterons selon deux approches :

- La première considère les pertes comme constantes, après les avoir calculées.
- La seconde suppose que les pertes dépendent des puissances générées.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre théorique indispensable pour comprendre et mettre en œuvre l'optimisation de la production d'énergie électrique dans un réseau. Nous avons tout d'abord introduit l'importance de l'écoulement de puissance (power flow), qui constitue une étape fondamentale pour analyser l'état d'un système électrique. Cette étude permet de déterminer les tensions aux nœuds, les flux de puissance dans les lignes et les pertes associées, des informations indispensables pour assurer une exploitation sûre et efficace du réseau.

L'utilisation de la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'écoulement de puissance s'est révélée particulièrement adaptée grâce à sa robustesse et à sa rapidité de convergence, en particulier pour les réseaux de taille moyenne et grande. Ce calcul préalable est essentiel, car il fournit les données nécessaires à l'optimisation et permet de vérifier la faisabilité technique des solutions proposées.

La problématique a ensuite été élargie pour inclure la dimension environnementale, un aspect devenu incontournable dans la gestion moderne des systèmes électriques. Le dispatching environnemental vise à minimiser les émissions de gaz polluants, tels que les oxydes d'azote (NOx), tout en garantissant une exploitation économiquement viable et techniquement sûre. Cette étape représente une évolution logique des stratégies d'optimisation, répondant à la nécessité d'un développement durable et d'une réduction de l'empreinte écologique des réseaux électriques.

Ainsi, la combinaison des deux approches – économique et environnementale – offre une vision complète et réaliste de l'optimisation des systèmes électriques. Le dispatching économique permet d'assurer une exploitation rentable, tandis que le dispatching environnemental s'attache à réduire l'impact écologique. La méthode utilisée dans ce mémoire suit une approche séquentielle, dans laquelle le problème économique est résolu dans un premier temps, puis la répartition des puissances est ajustée pour atteindre des objectifs environnementaux.

Chapitre III :

Simulations et interprétation des résultats

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous abordons la problématique du dispatch économique et environnemental à travers l'utilisation d'un programme développé sous MATLAB. L'objectif de cette étude est d'optimiser la répartition de la puissance active générée par les centrales du réseau de test choisi, tout en tenant compte des pertes de transmission et des contraintes techniques imposées par le système électrique.

Le code de base utilisé provient des travaux de H. Saadat, qui ont servi de référence pour la résolution du problème de dispatch économique à l'aide de la méthode des multiplicateurs de Lagrange (lambda-itération). Ce programme, dans sa version initiale, se limite à la minimisation du coût total de production, en considérant à la fois l'équilibre entre la génération et la demande, ainsi que les pertes actives dans le réseau représenté par les coefficients B , B_0 , B_{00} .

Dans ce travail, l'étude est réalisée sur le réseau de test IEEE 9 bus, qui constitue un système de référence largement utilisé dans les études académiques de planification et d'optimisation des systèmes électriques.

Dans un premier temps, nous avons analysé l'état initial du système, c'est-à-dire la répartition de la puissance générée obtenue à partir du calcul de l'écoulement de puissance avant toute optimisation. Cet état de référence permet de déterminer le coût de production initial, les pertes de transmission ainsi que le niveau d'émissions de NOx. Il constitue une base de comparaison essentielle pour évaluer l'efficacité des différentes stratégies d'optimisation.

Ensuite, dans le cadre de ce mémoire, nous avons adapté et enrichi ce programme en y intégrant une composante supplémentaire liée à l'impact environnemental de la production d'électricité, à savoir les émissions de NOx. Cette modification a permis d'étendre l'optimisation au-delà de l'aspect purement économique, afin de prendre en compte l'enjeu majeur que représentent les émissions polluantes dans le secteur énergétique.

Ainsi, trois situations sont étudiées et comparées :

- L'état initial, qui reflète le fonctionnement du système avant toute optimisation.
- L'optimisation économique, visant à minimiser le coût de production tout en respectant les contraintes du réseau et en tenant compte des pertes de transmission.
- L'optimisation environnementale, où l'objectif est de réduire les émissions de polluants tout en garantissant l'équilibre du système et en considérant également les pertes dans le réseau.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence les différences entre ces approches, notamment en termes de répartition de la puissance générée, du coût associé, du niveau d'émissions et des pertes de puissance. Ils constituent une base d'analyse pertinente pour envisager, dans des travaux futurs, une approche plus complète de type bi-objectif, où coût et environnement seraient optimisés simultanément.

III.2 Structure et données du réseau étudié :

Le réseau étudié dans ce travail est un réseau de test à 9 nœuds, extrait de la bibliothèque du logiciel PSAT (Power System Analyses Toolbox). Bien que la simulation soit finalement réalisée à l'aide d'un programme MATLAB, ce réseau est conservé en raison de sa structure simple et représentative, idéale pour l'analyse de l'écoulement de puissance et l'étude du dispatching économique et environnemental. Il est constitué de 9 bus, 9 lignes de transmission, 3 générateurs placés aux bus 1, 2 et 3, des charges réparties sur plusieurs nœuds, ainsi que de transformateurs permettant l'ajustement des niveaux de tension. La puissance de base du système est fixée à 100 MVA, et la demande totale en puissance active du réseau

s'élève à 315 MW. Ce réseau présente une topologie compacte permettant une convergence rapide des calculs, tout en reflétant les contraintes réelles d'un système électrique. Le schéma du réseau, ainsi que les tableaux détaillant ses caractéristiques électriques (lignes, transformateurs, puissances), sont présentés ci-après.

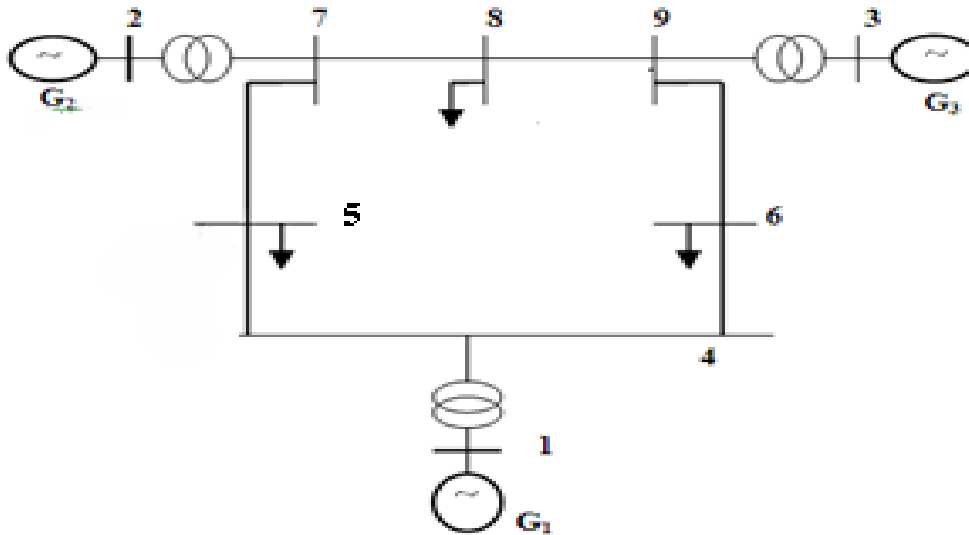


Figure (III.1) : Schéma unifilaire du réseau de test à 9 nœuds.

Le tableau (III.1) présente les coefficients de coût associés à chaque générateur, ainsi que les limites minimales et maximales de puissance qu'ils peuvent produire. Le tableau (III.2), quant à lui, regroupe les coefficients caractéristiques des émissions de NOx propres à chaque unité de production.

Tableau (III.1) : Coefficients de coût et limites des puissances générées.

N° du générateur	$C(P_G) = aP_G^2 + bP_G + c$ (\$/h)			P_{Gmin} (MW)	P_{Gmax} (MW)
	a (\$/MW ² h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)		
1	0.11	5	150	10	250
2	0.085	1.2	600	10	300
3	0.1225	1	335	10	270

Tableau (III.2) : Coefficients caractéristiques des émissions de NOx.

N° du générateur	$E(P_G) = aP_G^2 + bP_G + c$ (ton/h)		
	a (ton/Nm ³ .h)	b (ton/Nm ³ .h)	c (ton/Nm ³ .h)
1	6.490×10^{-6}	-5.554×10^{-4}	4.091×10^{-2}
2	5.638×10^{-6}	-6.047×10^{-4}	2.543×10^{-2}
3	4.586×10^{-6}	-5.094×10^{-4}	4.258×10^{-2}

Les caractéristiques du réseau, notamment les valeurs des impédances, des admittances shunt, des tensions nodales estimées, ainsi que les puissances générées et consommées planifiées, sont regroupées dans les tableaux (III.3) et (III.4). Les données relatives aux transformateurs figurent quant à elles dans le tableau (III.5).

Tableau (III.3) : Les données des lignes.

Noeuds	R en p.u	X en p.u	($\frac{1}{2}$) B en p.u
1-4	0.0	0.0576	0.0
2-7	0.0	0.0625	0.025
3-9	0.0	0.0586	0.020
4-5	0.01	0.085	0.088
4-6	0.017	0.092	0.079
5-7	0.032	0.161	0.153
6-9	0.039	0.170	0.179
7-8	0.085	0.072	0.00745
9-8	0.119	0.1008	0.1045

Tableau (III.4) : Valeurs planifiées des tensions et des puissances.

Type de Bus	N° du nœud	Tension		Puissance générée		Puissance consommée	
		V _m (p.u)	δ (degrés)	P (MW)	Q (MVar)	P (Mw)	Q(MVar)
Slack	1	1,04	0,00	-	-	0	0
PV	2	1,025	0,00	163	-	0	0
PV	3	1,025	0,00	85	-	0	0
PQ	4	1,00	0,00	0	0	0	0
PQ	5	1,00	0,00	0	0	125	50
PQ	6	1,00	0,00	0	0	90	30
PQ	7	1,00	0,00	0	0	0	0
PQ	8	1,00	0,00	0	0	100	35
PQ	9	1,00	0,00	0	0	0	0

Tableau (III.5) : Les données des transformateurs.

Transformateur nœud	Puissance nominale (MVA)	Tension nominale (KV)	Fréquence nominale	Tension primaire et secondaire (KV/KV)	Résistance (p.u)	Réactance (p.u)
1-4	100	16,5	60	16,5/230	0	0,0576
2-7	100	18	60	18/230	0	0.0625
3-9	100	13,8	60	13,8/230	0	0.0586

III.3 Algorithme et Organigramme du programme de simulation et d'optimisation :

Le programme MATLAB utilisé est en grande partie basé sur les scripts développés par le professeur Hadi Saadat (1998), auteur du livre "Power System Analysis" (McGraw-Hill, 1999), et adaptés dans le cadre de ce travail pour intégrer notamment l'aspect environnemental via les émissions de NOx.

Étapes principales du programme MATLAB :

1. Initialisation des données :

- Données des bus (busdata).
- Données des lignes (linedata).
- Coefficients de coût des générateurs (cost).
- Limites de puissance des générateurs (mwlimits).

2. Formation de la matrice d'admittance :

- lfybus : Calcul de la matrice Ybus du réseau.

3. Écoulement de puissance initial :

- lfnwton : Résolution de l'écoulement de puissance avec la méthode Newton-Raphson.
- busout : Affichage des tensions et puissances par bus.
- lineflow : Calcul des flux de puissance dans les lignes.

4. Calcul des pertes :

- bloss : Calcul des coefficients de pertes en utilisant la méthode des coefficients B.

5. Calcul du coût de génération avant optimisation :

- Coût calculé manuellement à partir des puissances générées données (P_{gg}).
- Utilisation des coefficients de coût dans la formule quadratique :

$$C(P_G) = aP_G^2 + bP_G + c \text{ (\$/h)}$$

6. Calcul des émissions de NOx avant optimisation :

- Application de la même formule quadratique avec les coefficients d'émission.

7. Optimisation économique (λ -méthode) :

- Boucle de mise à jour : recalcul de l'écoulement de puissance, des pertes et du dispatch jusqu'à convergence.
- Dispatch : Répartition économique optimale de la production.
- Affichage du coût de génération après optimisation.

8. Optimisation environnementale :

- Recalcul de l'écoulement de puissance (lfnwton) et du profil du réseau.
- Substitution des coefficients de coût par les coefficients d'émission NOx.
- Réexécution de l'optimisation (dispatch) avec comme objectif la minimisation des émissions.

9. Comparaison finale :

- Affichage comparatif des coûts de génération (\$/h).
- Affichage comparatif des émissions de NOx (ton/h).
- Graphiques en barres pour visualiser les résultats.

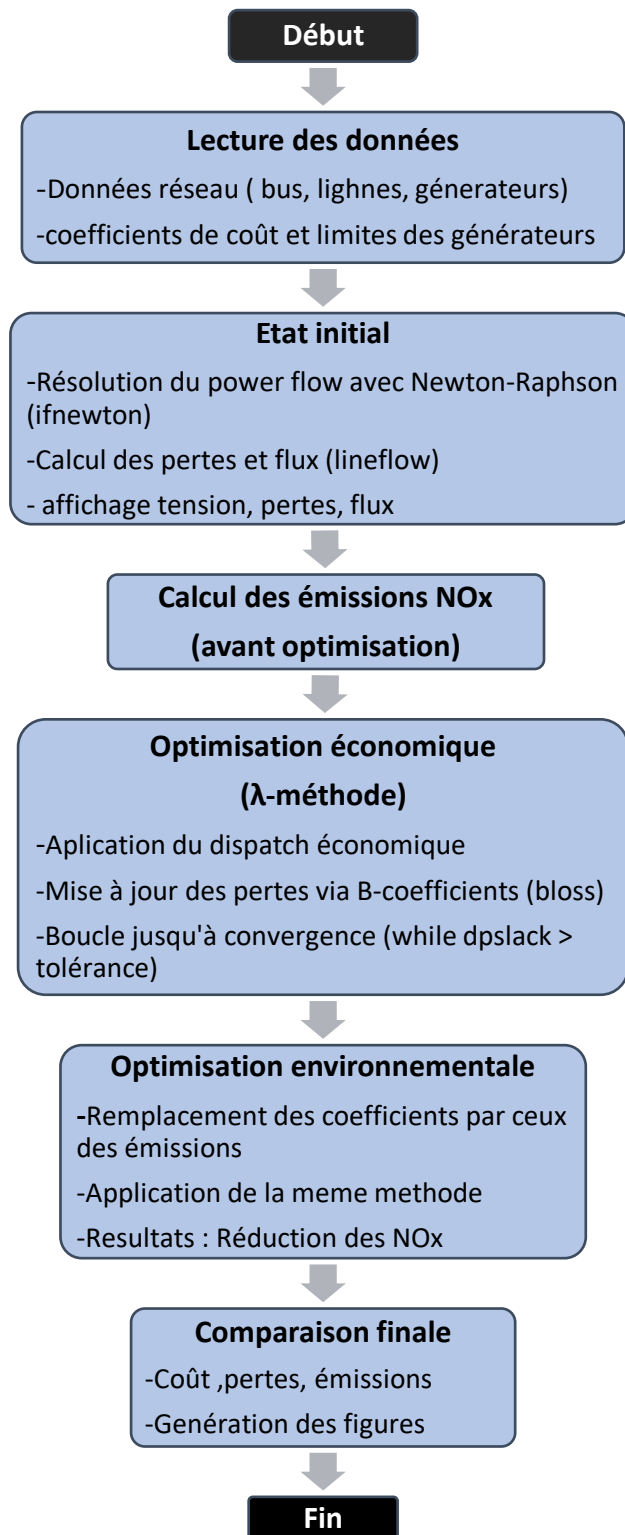


Figure (III.2) : Organigramme global du programme MATLAB utilisé pour l'optimisation économique et environnementale.

III.4 Calcul de l'écoulement de puissance :

Les résultats de l'écoulement de puissance sont illustrés dans les tableaux (III.6) et (III.7) :
 Le tableau (III.6) présente, pour chaque bus du réseau, la tension (en p.u), l'angle de phase (en degrés), la puissance active et réactive générées (Pg, Qg), demandées (Pd, Qd) ainsi que les puissances injectées dans le réseau.

Tableau (III.6) : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds.

Jeu de barre	Tension	Angle	Génération		Demande		Injection	
	p.u	Degrés	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
1	1.04	0.000	77.436	28.252	0.00	0.00	77.436	28.252
2	1.025	9.333	163	4.388	0.00	0.00	163	4.388
3	1.025	3.475	85	-2.971	0.00	0.00	85	-2.971
4	1.025	-2.397	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.995	-4.094	0.00	0.00	125	50	-125	-50
6	1.011	-4.244	0.00	0.00	90	30	-90	-30
7	1.026	3.771	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.963	0.788	0.00	0.00	100	35	-100	-35
9	1.027	0.762	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total			325.436	29.669	315	115	10.436	-85.331

- On observe que les bus 1, 2 et 3 présentent une puissance active générée, car ils représentent les nœuds de génération, tandis que les autres bus ne sont associés à aucune production (valeurs nulles), puisqu'ils correspondent à des nœuds de charge.
- Les puissances actives consommées sont concentrées principalement sur les bus 5, 6 et 8, ce qui reflète la localisation des charges dans le réseau.
- La puissance réactive totale injectée est négative, ce qui indique un déficit réactif global dans le système. Ce déficit traduit la nécessité d'un soutien réactif, souvent fourni par des équipements comme les compensateurs ou par une meilleure répartition de la génération réactive.
- Enfin, on note que la somme des puissances actives générées dépasse la demande totale, cette différence correspondant aux pertes dans les lignes de transmission, qui sont prises en compte dès cet état initial.
- Le tableau (III.7) présente, pour chaque ligne du réseau, les puissances active (MW) et réactive (MVAr) transférées, ainsi que les pertes associées dues à l'effet joule et aux impédances des lignes.

Tableau (III.7) : Flux de puissances et pertes dans les lignes du réseau.

branche		Flux dans les lignes			Pertes dans les lignes	
Du noeud	Au noeud	MW	MVAr	MVA	MW	MVAr
1	4	77.436	28.252	82.429	0.00	3.618
2	7	163	4.388	163.059	0.00	10.579
3	9	85	-2.971	85.052	0.00	-0.179
4	5	39.340	23.143	45.643	0.247	-15.862
4	6	38.096	1.490	38.125	0.250	-15.019
5	7	-85.907	-10.995	86.608	2.391	-19.209
6	9	-52.154	-13.491	53.871	1.047	-32.585
7	8	74.702	2.024	74.729	4.516	2.351
8	9	-29.814	-35.327	46.226	1.984	-19.024
Total					10.436	-85.331

- On remarque que les flux les plus élevés circulent dans les lignes 1–4, 2–7 et 3–9, qui sont directement reliées aux générateurs. Ces lignes constituent les principaux axes d’acheminement de la puissance vers les zones de consommation.
- Ces observations mettent en évidence les tronçons critiques du réseau où l’amélioration du dispatching pourrait avoir le plus fort impact sur la réduction des pertes et la stabilité globale du système.

Le tableau ci-dessous résume les résultats essentiels de l’écoulement de puissance avant toute optimisation. Il fournit une vue d’ensemble des performances du réseau dans son état initial, qui seront utilisées comme base de comparaison avec les résultats optimisés.

Tableau (III.8) : Bilan des performances du réseau dans son état initial.

Indicateur	Nombre d’itérations	Erreur maximale de déséquilibre de puissance	Pertes actives totales	Coût global de génération	émissions totales de NOx
			MW	\$/h	ton/h
valeur	4	$5,84611 \times 10^{-7}$	10,436	5555.80	0.1459

- On observe que l’erreur maximale de déséquilibre de puissance est très faible, ce qui indique une bonne convergence de la méthode de Newton-Raphson utilisée pour l’écoulement de puissance.
- Les pertes actives totales atteignent 10,436 MW, ce qui représente une part significative de la génération totale et traduit une inefficacité énergétique du réseau dans son état initial.
- Le réseau, dans son état initial, présente à la fois un coût de génération important et des émissions significatives de NOx, ce qui met en évidence la nécessité d’une optimisation pour réduire simultanément les dépenses et l’impact environnemental.
- Ces résultats montrent la nécessité de mettre en place une optimisation économique et environnementale afin de réduire simultanément les coûts, les pertes et les émissions polluantes, tout en améliorant la performance globale du système.

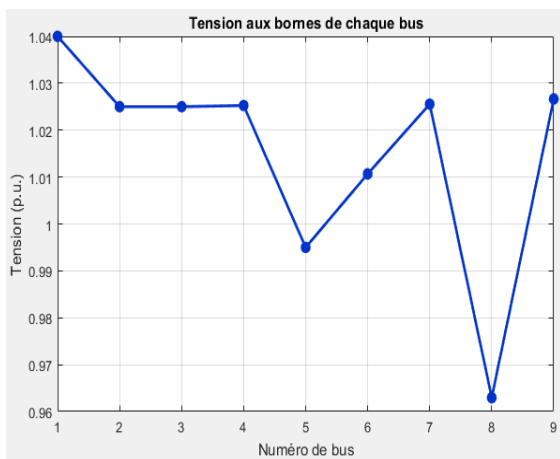


Figure (III.3) : Profils de tension des bus

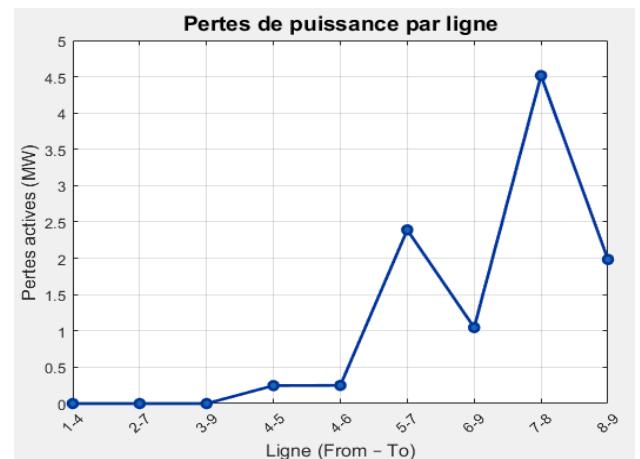


Figure (III.4) : Distribution des pertes actives Par ligne

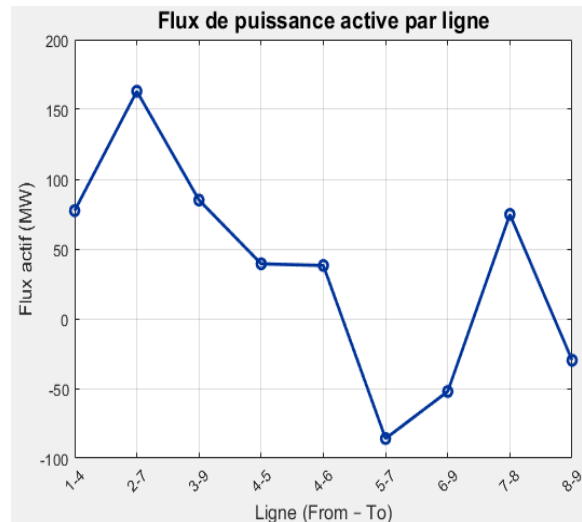


Figure (III.5) : Répartition du flux actif (MW) dans chaque ligne.

- Les tensions restent globalement proches de la valeur nominale (1 p.u.), traduisant un réseau stable. Une légère baisse est observée au bus 8 (0,963 p.u.), liée à la charge importante connectée à ce nœud et à son éloignement relatif des générateurs, mais elle reste dans les limites acceptables.
- Les pertes les plus élevées se concentrent dans les branches transportant les flux les plus importants, notamment les lignes 5–7, 7–8 et 8–9, ce qui est cohérent avec la loi $P_{\text{pertes}}=I^2 \times R$. Cela met en évidence l'impact direct des charges et de la répartition du flux sur les pertes totales du réseau.
- Les flux les plus importants circulent principalement à travers les lignes reliant les zones de production aux zones de consommation, comme 2–7, 3–9 et 1–4, assurant l'acheminement de l'énergie depuis les générateurs vers les charges. Certains flux apparaissent négatifs, traduisant un sens de circulation inverse à la convention adoptée dans le programme, ce qui est normal et indique un retour partiel de puissance vers le réseau. Dans la ligne 5–7, le flux est négatif car la puissance circule de bus 7 vers bus 5, parce que le générateur proche du bus 2 alimente la charge située près du bus 5.

III.5 Le dispatching économique et environnemental avec optimisation :

Après l'analyse de l'état initial du réseau, deux scénarios d'optimisation ont été étudiés afin d'améliorer les performances du système électrique.

- L'optimisation économique, qui vise à minimiser le coût global de production tout en respectant les contraintes techniques et en tenant compte des pertes de transmission.
- L'optimisation environnementale, qui remplace la fonction de coût par la fonction d'émission afin de réduire la pollution générée par les centrales, tout en maintenant l'équilibre du réseau.

Dans le cas économique, le coût de génération est réduit de 5555,80 \$/h à 5437,70 \$/h, soit une diminution significative d'environ 2.12 %. Cependant, cette stratégie provoque une augmentation des émissions de NOx, qui passent de 0,1459 ton/h à 0,1279 ton/h.

À l'inverse, le dispatch environnemental permet de réduire ces émissions à 0,128 ton/h, soit une baisse de 5.60 % par rapport à l'optimisation économique et de 17.17 % par rapport à l'état initial. Ce résultat est obtenu tout en maintenant un coût global inférieur à la situation de départ (5591,22 \$/h).

Enfin, les pertes actives diminuent légèrement dans les deux cas, passant d'environ 10,4 MW à 9,1 MW, ce qui confirme l'efficacité des optimisations. Ces résultats mettent en évidence le compromis

coût/environnement, où l'approche environnementale offre une réduction substantielle de la pollution pour un léger surcoût par rapport à la stratégie purement économique.

III.5.1 Optimisation économique :

Le dispatching économique consiste à répartir la puissance active entre les générateurs de manière à minimiser le coût total de production, tout en respectant les contraintes opérationnelles du réseau, telles que les limites de production et l'équilibre entre la production et la demande.

Dans ce travail, l'optimisation a été réalisée à l'aide de la méthode du multiplicateur de Lagrange (méthode λ). Cette approche permet de déterminer la répartition optimale des puissances générées en tenant compte des pertes dans les lignes de transmission. Elle représente une étape essentielle pour améliorer la performance du système électrique et assurer une gestion efficace des ressources énergétiques.

Les résultats obtenus suite à l'optimisation économique sont présentés dans les tableaux (III.9), (III.10) et (III.11).

Le tableau (III.9) détaille les résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds après optimisation. On y retrouve les tensions nodales, les angles de phase, ainsi que les puissances générées, demandées et injectées.

Tableau (III.9) : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds après optimisation économique.

Jeu de barre	Tension	Angle	Génération		Demande		Injection	
	p.u	Degrés	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
1	1.04	0.000	92.094	26.0839	0.00	0.00	92.094	26.839
2	1.025	5.840	135	6.301	0.00	0.00	135.636	6.301
3	1.025	3.370	96.318	-9.696	0.00	0.00	96.318	-9.696
4	1.026	-2.848	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.996	-5.266	0.00	0.00	125	50	-125	-50
6	1.013	-4.680	0.00	0.00	90	30	-90	-30
7	1.023	1.203	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.964	-0.899	0.00	0.00	100	35	-100	-35
9	1.031	0.308	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total			324.048	23.444	315	115	9.048	-91.556

- On observe que la répartition des puissances générées après l'optimisation économique est conforme aux attentes. Les puissances actives injectées aux nœuds non générateurs sont nulles, ce qui est normal puisqu'ils ne participent pas à la production mais uniquement à la consommation.
- En revanche, le bilan global de la puissance réactive est négatif, ce qui indique que le réseau consomme plus de puissance réactive qu'il n'en produit. Cette situation reflète la présence d'un réseau principalement inductif et non compensé, ce qui est fréquent dans les réseaux de test. Dans la pratique, ce déficit de puissance réactive peut entraîner une chute de tension importante, surtout dans les bus fortement chargés et éloignés des sources de production (comme le bus 8 dans notre cas). Si aucune mesure corrective n'est prise, cela peut engendrer des problèmes de stabilité de tension, une augmentation des pertes et, dans les cas extrêmes, un effondrement de tension.
- Ainsi, ces résultats montrent l'importance d'intégrer des compensateurs réactifs (tels que des batteries de condensateurs ou le réglage des générateurs) pour assurer la fiabilité et la stabilité du réseau électrique.

Le tableau (III.10) présente le flux de puissances dans les lignes, avec les pertes actives et réactives associées, résultant de la nouvelle répartition de génération obtenue par l'algorithme de dispatch économique.

Tableau (III.10) : Flux de puissances et pertes dans les lignes après optimisation économique.

Branche		Flux dans les lignes			Pertes dans les lignes	
Du noeud	Au noeud	MW	MVAr	MVA	MW	MVAr
1	4	92.094	26.839	95.925	0.00	4.900
2	7	135.636	6.302	135.783	0.00	5.749
3	9	96.318	-9.696	96.805	0.00	0.980
4	5	54.395	21.676	58.555	0.372	-14.847
4	6	37.699	0.263	37.700	0.241	-15.124
5	7	-70.977	-13.477	72.245	1.625	-23.023
6	9	-52.542	-14.614	54.537	1.055	-32.791
7	8	63.035	10.098	63.838	3.324	1.344
8	9	-40.289	-26.246	48.084	2.432	-18.746
Total					9.048	-91.556

- Le tableau (III.10) présente les flux de puissance active et réactive dans chaque ligne du réseau ainsi que les pertes correspondantes après l'optimisation économique. Les lignes 2–7, 3–9 et 1–4 véhiculent les flux actifs les plus élevés, atteignant respectivement 135,636 MW, 96,318 MW et 92,094 MW. Ces lignes relient directement les générateurs principaux aux zones de consommation, ce qui explique ces valeurs élevées.
- La ligne 7–8, avec 63,035 MW, joue également un rôle clé dans l'alimentation des charges locales.
- Les pertes actives restent relativement faibles par rapport aux flux transportés, avec une perte totale de 9,048 MW, ce qui représente un bon rendement de transmission. On remarque que les pertes les plus élevées sont concentrées sur les lignes 7–8 (3,324 MW) et 8–9 (2,432 MW), ce qui est logique car ces lignes sont plus chargées et possèdent une impédance plus élevée.
- Enfin, les valeurs négatives des flux et pertes réactives ne traduisent pas un défaut du système mais simplement le sens du transfert de puissance, conformément à la convention utilisée dans le programme.

Enfin, le tableau (III.11) synthétise les performances du réseau dans ce cas : nombre d'itérations, erreur maximale de déséquilibre de puissance, pertes totales, coût global de génération et émissions de NO_x.

Tableau (III.11) : synthèse des résultats du réseau après optimisation économique.

Indicateur	Nombre d'itérations	Erreur maximale de déséquilibre de puissance	Pertes actives totales	Coût global de génération	émissions totales de NO _x
			MW	\$/h	ton/h
valeur	2	4.74377×10^{-7}	9.048	5437.70	0.1279

- On observe que la convergence de l'algorithme a été atteinte en deux itérations seulement, avec une erreur maximale de déséquilibre de puissance très faible, ce qui traduit une stabilité et une précision élevées du calcul.
- Les pertes actives totales du réseau sont de 9,048 MW, ce qui est cohérent avec les flux de puissance observés dans les lignes.

- Le coût global de génération a été optimisé, atteignant une valeur de 5437,70 \$/h, contre 5555,80 \$/h avant optimisation, confirmant ainsi une réduction significative des dépenses liées à la production d'énergie.
- En ce qui concerne les émissions de NOx, elles sont réduites à 0,127999 ton/h, ce qui montre que, bien que l'objectif principal de cette étape soit purement économique, l'optimisation a également un impact positif indirect sur l'environnement.
- Ces résultats démontrent l'efficacité de l'approche adoptée, qui parvient à atteindre un compromis entre minimisation des coûts et stabilité opérationnelle du réseau, tout en préparant la base pour l'étape suivante d'optimisation environnementale.

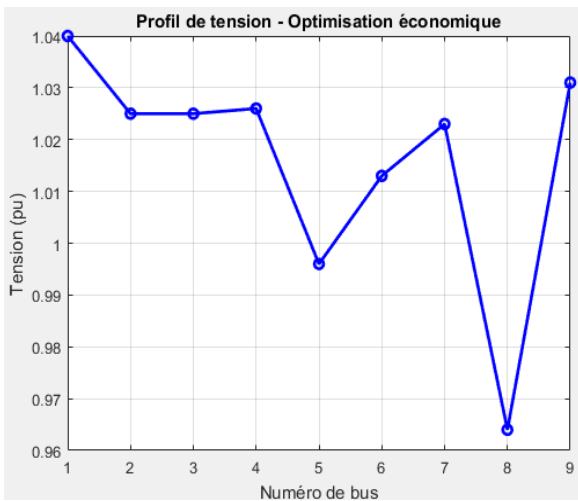


Figure (III.6) : Profil de tension des bus Optimisation économique.

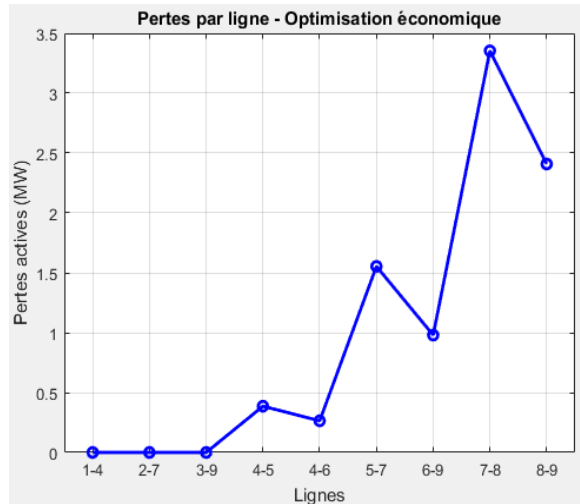


Figure (III.7) : Pertes actives par ligne après Optimisation économique.

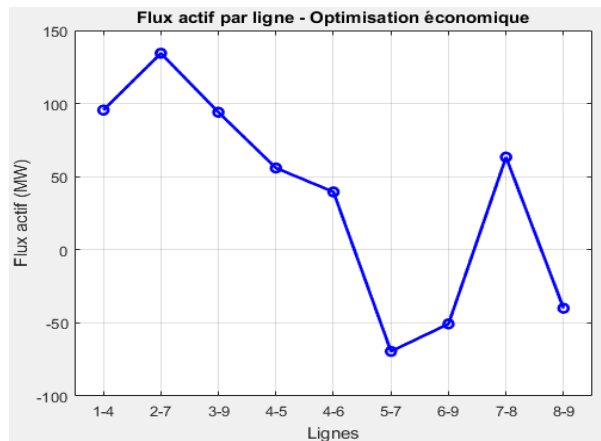


Figure (III.8) : Répartition du flux actif par ligne après optimisation économique.

- Le profil des tensions reste globalement stable, avec des valeurs proches de la tension nominale (1 pu). La tension au bus 8 reste légèrement inférieure par rapport aux autres bus, traduisant la présence d'une charge importante connectée à ce nœud. L'optimisation économique permet de maintenir un bon équilibre du réseau tout en minimisant le coût, sans dégradation notable de la qualité de la tension.
- Les pertes sont principalement concentrées dans les lignes où circulent des flux importants, notamment les branches **4-5**, **5-7** et **8-9**. Cela est cohérent avec la loi $P_{pertes} = I^2 \cdot R$, où les pertes

augmentent avec le courant. On remarque une légère réduction des pertes par rapport à l'état initial grâce à une meilleure répartition des puissances générées.

- Les flux les plus élevés apparaissent dans les lignes 2-7, 3-9 et 4-5, qui sont directement connectées aux générateurs. Les flux négatifs observés dans certaines lignes indiquent un retour partiel de puissance vers le réseau, traduisant une redistribution de l'énergie en fonction des charges et des générateurs, ce qui est normal dans ce type de réseau maillé.

III.5.2 Optimisation environnementale :

Ce type d'optimisation est particulièrement pertinent dans le contexte actuel où la réduction de l'impact environnemental du secteur électrique est une priorité. En concentrant la production sur les générateurs les moins polluants, cette approche permet de diminuer la quantité totale de NOx rejetée dans l'atmosphère, même si cela peut entraîner une légère hausse du coût de génération.

Les résultats de l'optimisation environnementale sont récapitulés dans les tableaux (III.12), (III.13) et (III.14).

Le tableau (III.12) présente les résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds obtenus suite à l'optimisation environnementale, dans laquelle la fonction de coût a été remplacée par une fonction représentant les émissions de NOx.

Tableau (III.12) : Résultats de l'écoulement de puissance aux nœuds après optimisation environnementale .

Jeu de barre	Tension	Angle	Génération		Demande		Injection	
	p.u	Degrés	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
1	1.04	0.000	92.540	27.432	0.00	0.00	97.403	26.478
2	1.025	3.566	110.001	12.539	0.00	0.00	141.967	4.056
3	1.025	5.551	121.862	-16.570	0.00	0.00	84.786	-7.015
4	1.026	-2.863	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.995	-5.774	0.00	0.00	125	50	-125	-50
6	1.014	-4.192	0.00	0.00	90	30	-90	-30
7	1.018	-0.212	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.962	-1.140	0.00	0.00	100	35	-100	-35
9	1.036	1.694	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total			324.402	23.401	315	115	9.156	-91.481

- L'observation de ce tableau montre que, dans le cas de l'optimisation environnementale, la répartition des puissances actives des générateurs est significativement modifiée par rapport à l'optimisation économique. On remarque que le générateur situé au nœud 3 fonctionne à une puissance plus élevée, tandis que celui du nœud 2 produit moins. Cette configuration vise à réduire les émissions de NOx, car le générateur du nœud 3 présente un facteur d'émission plus faible.
- La puissance réactive reste globalement négative, ce qui confirme la prédominance des charges inductives dans le réseau. Cependant, la gestion de la puissance active est ici clairement orientée vers la protection de l'environnement, même si cela peut se faire au détriment d'un léger accroissement des pertes ou du coût global de production.
- Ce tableau illustre donc l'impact direct de la stratégie environnementale sur la répartition des générateurs et met en évidence la priorité donnée à la réduction des émissions polluantes.

Le tableau (III.13) fournit les flux de puissance dans les lignes ainsi que les pertes associées à cette configuration environnementale.

Tableau (III.13) : Flux de puissances et pertes dans les lignes après optimisation environnementale.

branche		Flux dans les lignes			Pertes dans les lignes	
Du noeud	Au noeud	MW	MVAr	MVA	MW	MVAr
1	4	92.540	27.432	96.520	0.00	4.961
2	7	110.001	12.539	110.713	0.00	2.118
3	9	121.962	-16.570	122.983	0.00	4.153
4	5	64.690	21.994	68.327	0.490	-13.813
4	6	27.850	0.477	27.854	0.138	-15.693
5	7	-60.800	-14.193	62.435	1.195	-24.996
6	9	-62.288	-13.830	63.805	1.480	-31.146
7	8	48.006	21.224	52.488	2.287	0.475
8	9	-54.281	-14.251	56.121	3.812	-17.659
Total					9.402	-91.599

- On observe que les flux les plus importants se trouvent sur les lignes 3–9 (121,862 MW), 2–7 (110,001 MW) et 1–4 (92,540 MW). Cela s’explique par la forte injection de puissance au niveau des générateurs connectés à ces nœuds et par leur rôle dans l’alimentation des charges situées en aval.
- On remarque également que certaines lignes, comme 2–7, 3–9 et 1–4, affichent des pertes nulles dans la simulation. Cela est dû au fait que ces branches contiennent des transformateurs modélisés comme idéaux (R=0), ce qui est une hypothèse couramment utilisée dans les études de flux de puissance. En réalité, la résistance d’un transformateur existe mais elle est très faible par rapport à sa réactance et peut donc être négligée sans impact significatif sur la précision globale des résultats. Ainsi, même si des flux importants traversent ces lignes, aucune perte ohmique n’est comptabilisée dans le modèle.

Le tableau (III.14) propose une synthèse globale des indicateurs de performance pour cette configuration .

Tableau (III.14) : synthèse des résultats du réseau après optimisation environnementale.

Indicateur	Nombre d’itérations	Erreur maximale de déséquilibre de puissance	Pertes actives totales	Coût global de génération	émissions totales de NOx
			MW		
Valeurs	3	$2,62215 \times 10^{-9}$	9.194	5591.22	0.1208

- Ce tableau résume les performances du réseau après l’optimisation environnementale. Le nombre d’itérations et l’erreur maximale de déséquilibre de puissance confirment la stabilité et la précision de la solution obtenue. On constate une légère variation des pertes actives par rapport aux autres cas, liée à la redistribution des flux lors de la réduction des émissions.
- Le coût global de génération augmente, ce qui est attendu puisque la priorité est donnée à la réduction des NOx plutôt qu’à la minimisation des dépenses. En parallèle, les émissions totales de NOx diminuent de façon notable, illustrant le compromis classique entre le coût économique et la préservation de l’environnement.

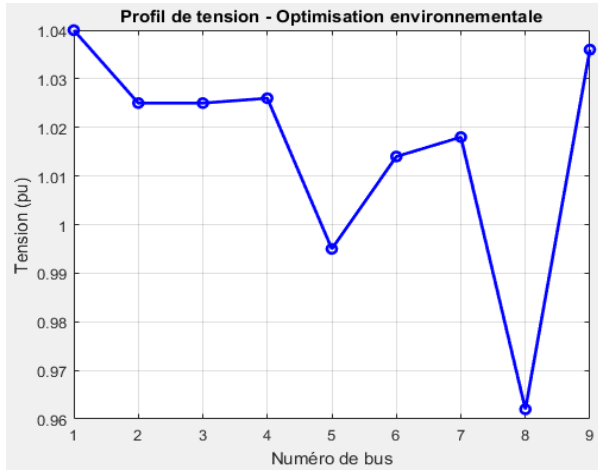


Figure (III.9) : Profil de tension des bus optimisation environnementale.

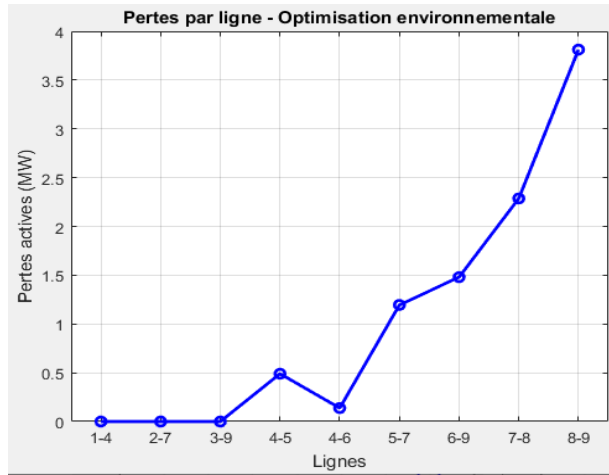


Figure (III.10) : Pertes actives par ligne après optimisation environnementale.

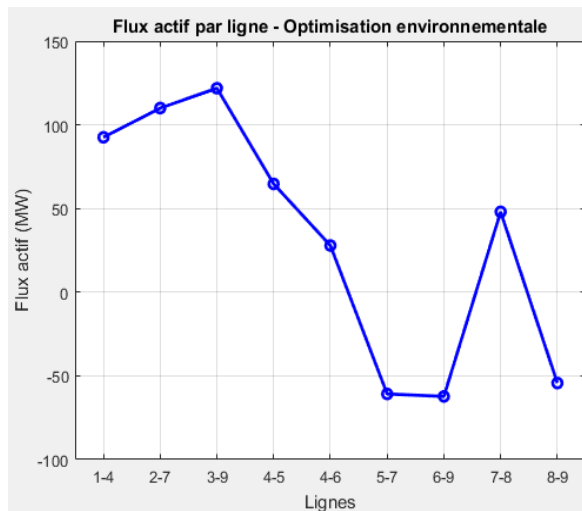


Figure (III.11) : Répartition du flux actif par ligne après optimisation environnementale.

- Dans ce scénario, les tensions restent proches de la tension nominale, mais une légère chute de tension est observée au niveau du bus 8, due à sa position éloignée des sources de production et à la charge importante qu'il supporte. Néanmoins, toutes les tensions restent dans une plage acceptable, ce qui confirme le bon maintien de la qualité de service malgré le changement de répartition de production.
- Les pertes actives sont nulles dans les lignes 1-4, 2-7 et 3-9, car elles contiennent des transformateurs modélisés avec une résistance nulle, tandis que dans les autres lignes, les pertes restent faibles et bien réparties, ce qui traduit une gestion optimisée des flux pour réduire les émissions.
- Les lignes 3-9, 2-7 et 4-5 transportent les flux les plus importants, avec respectivement 121,962 MW, 110,001 MW et 64,690 MW, ce qui est cohérent avec leurs positions proches des principaux générateurs. Les lignes 5-7, 6-9 et 8-9 présentent des flux négatifs, ce qui indique un changement de sens dans la circulation de puissance. Ce phénomène est tout à fait normal et reflète l'équilibre naturel du réseau sous les nouvelles contraintes environnementales.
- Cette répartition montre que la stratégie d'optimisation environnementale a permis de mieux équilibrer les flux, en priorisant la réduction des émissions, tout en maintenant des performances techniques acceptables.

III.5.3 Comparaison des configurations optimisées :

Afin d'évaluer l'efficacité des différentes stratégies d'optimisation appliquées au réseau étudié, une comparaison a été réalisée entre l'état initial, le dispatch économique et l'optimisation environnementale. Cette analyse permet de mettre en évidence les évolutions en termes de coût, d'émissions de NOx, de pertes actives et de répartition de la génération.

Tableau (III.15) : Comparaison des résultats avant et après optimisation.

Configuration	Coût (\$/h)	Émissions NOx (ton/h)	Pertes actives (MW)	Pg1 (MW)	Pg2 (MW)	Pg3 (MW)	Nb itérations
Avant optimisation	5555.80	0.1459	10,436	77,436	163	85	4
Optimisation économique	5437.70	0.1279	9.048	92.094	135	96.318	2
Optimisation environnementale	5591.22	0,1208	9.402	92.540	110.001	121.862	3

Le tableau met en évidence l'efficacité des deux types d'optimisation. L'optimisation économique réduit considérablement le coût global tout en maintenant les pertes à un niveau modéré, tandis que l'optimisation environnementale diminue fortement les émissions de NOx, au prix d'une légère hausse du coût. La répartition des puissances générées confirme que, selon l'objectif choisi, la priorité est donnée soit à la rentabilité, soit à la réduction de la pollution.

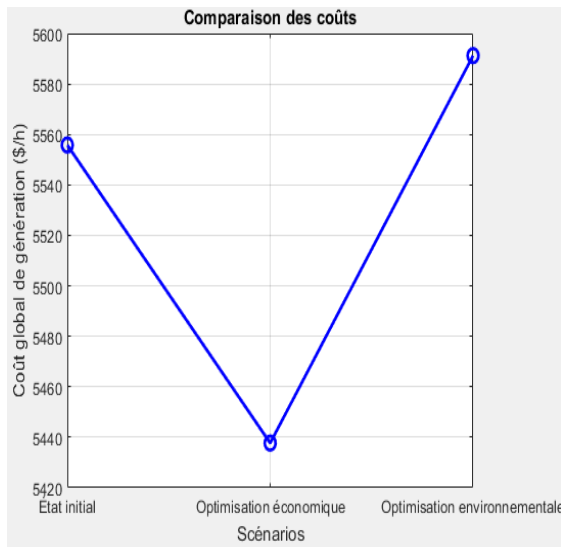


Figure (III.12) : Comparaison des coûts de génération avant et après optimisation

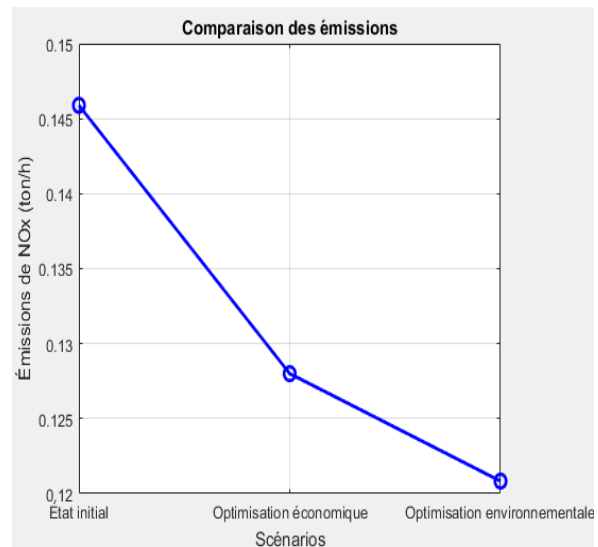


Figure (III.13) : Comparaison des émissions de Nox avant et après optimisation

- La figure (III.12) montre que l'optimisation économique permet une réduction significative du coût global de génération par rapport à l'état initial. En revanche, l'optimisation environnementale entraîne une légère augmentation du coût par rapport au cas économique. Cette évolution est logique : pour réduire les émissions, le système sollicite davantage certaines unités de production moins polluantes mais plus coûteuses, ce qui fait légèrement grimper le coût.
- La figure (III.13) montre une diminution progressive des émissions de Nox entre les trois scénarios étudiés. On observe que l'optimisation économique, bien que centrée sur la réduction des coûts, parvient déjà à réduire légèrement les émissions par rapport à l'état initial grâce à une répartition plus

rationnelle des charges. En revanche, l'optimisation environnementale offre une réduction beaucoup plus marquée, car elle privilégie la production des unités les moins polluantes, même si cela se fait au prix d'une légère augmentation des coûts. Ce résultat illustre clairement l'efficacité d'une approche orientée vers la durabilité et la protection de l'environnement.

III.6 Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement l'impact du type d'optimisation choisi sur le fonctionnement global du réseau. L'optimisation économique a permis de réduire considérablement le coût global de génération, mais avec une légère hausse des émissions de Nox. À l'inverse, l'optimisation environnementale a entraîné une baisse significative des émissions polluantes, mais au prix d'une augmentation du coût de production.

Ces résultats mettent en évidence l'existence d'un compromis inévitable entre les deux objectifs. Le choix de la stratégie d'optimisation dépendra donc des priorités du gestionnaire du réseau : privilégier la rentabilité économique ou la réduction de l'impact environnemental.

Le travail réalisé constitue une première étape importante dans l'étude de l'optimisation des réseaux électriques. Il ouvre la voie à des perspectives futures, notamment le développement de méthodes multi-objectifs capables de traiter simultanément les aspects économiques et environnementaux, afin d'atteindre un équilibre optimal entre performance financière et durabilité énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'augmentation continue de la demande en énergie électrique, associée aux enjeux environnementaux et économiques actuels, impose aux opérateurs de réseaux une gestion optimale et durable de la production et de la distribution. Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en proposant une étude complète portant sur l'optimisation du dispatching économique et environnemental, intégrant le calcul d'écoulement de puissance pour garantir la fiabilité du réseau.

Dans un premier temps, nous avons présenté les notions fondamentales relatives à la production d'énergie électrique et aux différentes sources de génération, qu'elles soient conventionnelles ou renouvelables. Nous avons également abordé la structure et le fonctionnement des réseaux électriques, en insistant sur l'importance de la planification et du contrôle pour assurer un équilibre permanent entre production et consommation, tout en minimisant les pertes et en garantissant la qualité de service.

Dans le second chapitre, nous avons développé le cadre théorique de l'écoulement de puissance et du dispatching. L'écoulement de puissance, résolu grâce à la méthode Newton-Raphson, a permis de déterminer avec précision les tensions aux nœuds, les flux dans les lignes et les pertes totales du système. Cette étape est indispensable pour évaluer l'état du réseau et préparer l'optimisation.

L'optimisation du dispatching économique a ensuite été étudiée en détail. Elle vise à répartir la charge demandée entre les générateurs disponibles de manière à minimiser le coût global de production, tout en respectant les contraintes techniques propres à chaque unité et aux caractéristiques du réseau. La méthode des itérations de lambda, fondée sur le principe du Lagrangien, a été choisie pour résoudre ce problème en raison de sa simplicité et de sa robustesse.

Enfin, la problématique a été élargie pour inclure la dimension environnementale, avec la prise en compte des émissions de NOx, dans une optique de réduction de l'impact écologique de la production d'électricité.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation pratique sur le réseau de test D009, en utilisant un programme développé sous MATLAB. Ce programme intègre le calcul d'écoulement de puissance par la méthode Newton-Raphson et l'optimisation par la méthode des itérations de lambda. Trois scénarios ont été étudiés :

- L'état initial du réseau.
- L'optimisation économique.
- L'optimisation environnementale.

Les résultats obtenus ont permis de comparer ces différents états en termes de profils de tension, flux de puissance, pertes actives, coût global et émissions de NOx.

Il en ressort que l'optimisation économique a permis une réduction significative du coût de production, tandis que l'optimisation environnementale a entraîné une baisse importante des émissions polluantes, avec un léger compromis sur le coût global. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'intégrer progressivement des critères environnementaux dans les stratégies de gestion des réseaux électriques, tout en maintenant leur performance et leur stabilité.

En conclusion, ce mémoire a permis de démontrer l'efficacité de la méthode des itérations de lambda associée au calcul d'écoulement Newton-Raphson pour résoudre des problèmes concrets d'optimisation dans les réseaux électriques. Les résultats obtenus soulignent la pertinence de l'intégration de critères environnementaux dans les processus décisionnels, ouvrant ainsi la voie à une gestion plus responsable, durable et innovante des systèmes électriques modernes.

Références

- [1] E. Sidi Cheikh : « Evaluation des performances de la centrale PV », Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2020/2021.
- [2] IEA, CO₂ Emissions en 2022, International Energy Agency, 2023. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [3] B.Mohamed et B.Sid Ahmed : «Étude du système de regulation de la tension (PSS+AVR) des alternteurs de grande puissance par le reseau de neurones », 2019/2020.
- [4] <https://ekwateur.fr/blog/marche-de-l-energie/centrale-thermique/>, Consulté le 02/02/2025.
- [5] Khelifi Abd-Errahmane, « L'énergie renouvelable et le potentiel énergétique en Algérie », mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019.
- [6] Planète Energies, « Production d'électricité et émissions de CO₂ », Lycée sciences de la vie et de la terre, 4/12/2023.
- [7] Commission de coopération environnementale. (2004). Les émissions atmosphériques des centrales électriques nord-américaines. Montréal, Canada : Commission de coopération environnementale. Disponible sur le site : <https://www.cec.org/files/documents/publications/10236-north-american-power-plant-air-emissions-fr.pdf>, consulté le 05/02/2025.
- [8] Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, Cours : Réseaux électriques industriels, Chapitre 2 : Postes de livraison HTA à comptage BT.
- [9] F.Bennama et H. Benmesahel, « Analyse de flux d'énergie dans un réseau de distribution», Mémoire de Master, Université -Abdelhamid Ibn Badis- Faculté des sciences et de la technologie de Mostaganem, 2023/2024.
- [10] T. Gönen, "Electrical Power Transmission System Engineering : Analysis and Design", Edition CRC Press, USA, 2024.
- [11] A. Laïb, "Écoulement de Puissance Optimal Intelligent d'un Système de Puissance Multi-Sources", Diplôme ingénieur en électrotechnique, ENP, Alger, 2021.
- [12] H. Ghalia et L. Hayat « Dimensionnement d'un système d'une centrale photovoltaïque-éolienne - Hydroélectrique- stockage batteries pour alimenter une charge variable », Mémoire de Master, Université -Abdelhamid Ibn Badis- Faculté des sciences et de la technologie de Mostaganem, 2022/2023.
- [13] M.Guesmia Mohammed et M.Hadjoudja Sofiane : « Gestion économique et environnementale d'un réseau d'énergie », Mémoire de Master, Université -Mohamed Boudiaf- des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2019/2020.
- [14] R. ABIDI et H. MIHI : « Étude de l'Écoulement de Puissance Optimal dans le Réseau de Transport par l'Algorithme d'Optimisation GTO », Mémoire de Master, Université Mostefa Benboulaïd Batna 2, 2024-2025.
- [15] Yahiaoui Merzoug : « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS », Thèse de Doctorat, Université -Mohamed Boudiaf- des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2014.

Références

[16] H.Baaziz & S.Beroual « Optimisation des puissances actives dans un réseau d'énergie électrique par la recherche Tabou » PFE Master, Université -Mohamed Boudiaf- des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2019.

[17] A.Belmadani, L.Benasla et M.Rahli : «Etude d'un Dispatching Economique-Environnemental par la méthode Harmony Search », Acta Electrotehnica, Volume 50, Number 1, 2009.

[18] A. LAIFA, Modélisation et optimisation des réseaux électriques, Master 1 Réseaux Électriques, Département de Génie Électrique, Université 20 Août 1955 - Skikda, 2022/2023

[19] A. BOUAZZA - Planification des réseaux électriques 2021/2022

[20] N.Benameur et Dj.Bedri «Optimisation des puissances actives dans un réseau électrique », Mémoire de Master, Université -Mohamed Boudiaf- des Sciences et de la Technologie d'Oran,2021/2022