Institut National de Statistique
et d'Economie Appliquée

Centre des Etudes Doctorales
Sciences, Ingénierie
et Développement Durable

Avis de soutenance de thèse de Doctorat

Monsieur Jabrane SLIMANI

Doctorant au laboratoire de recherche

« Systèmes d'Information, Systèmes Intelligents et Modélisation Mathématique »

(SI2M)

Spécialité : ***Mathématique Appliquée***

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat

Le Jeudi 23 janvier 2025 à 10h

à la salle de conférence de l'INSEA

Intitulé de la thèse

« Modelling long-run energy : the case of Morocco »

Devant le jury composé de :

Président :
Pr. Adil KABBAJ, PES, INSEA-Rabat

Directeur de thèse :
Pr. Abdeslam KADRANI, PES, INSEA-Rabat

Co-Directeurs de thèse :
Pr. El hadj EZZAHID, PES, FSJES-Rabat
Pr. Imad EL HARRAKI, PH. ENSMR- Rabat

Membres du jury :
Pr. Moha CHERKAOUI, PES, MINES Rabat
Pr. Sidi Mohammed DOUIRI, PES, FSR, UMV
Pr. Mohamed EL MANKIBI, PES, ENTPE, Lyon
Pr. Rachid BENMANSOUR, PH, INSEA

INSEA
Institut National de
Statistique et d'Économie
Appliquée
CEDOC-SIDD

Les Résumés de la thèse (F1)

Date : 31/10/2024

Réservé à l'administration
N°de thèse : .....

Nom : .....SLIMANI.....

Prénom : ...JABRANE.....

Résumé

La transition vers un système énergétique durable est cruciale pour le Maroc qui cherche à répondre à la demande croissante d'énergie tout en réduisant sa dépendance aux combustibles fossiles importés. Cette thèse explore les stratégies de planification énergétique à long terme nécessaires pour optimiser le système énergétique du Maroc, en se concentrant sur l'intégration des sources d'énergie renouvelables et le rôle du gaz naturel en tant que ressource énergétique transitoire. En utilisant un modèle d'optimisation linéaire ascendant (OSeMOSYS), nous évaluons différents scénarios qui équilibrent la faisabilité économique, la durabilité environnementale et la sécurité énergétique. Nos conclusions suggèrent qu'il est techniquement et économiquement possible d'intégrer 92% d'énergies renouvelables d'ici à 2050, même si cela représente un coût supplémentaire d'environ 32 milliards de dollars par rapport à un scénario de maintien du statu quo (Business as Usual -BAU). Le modèle identifie les centrales hydroélectriques à accumulation par pompage comme un élément essentiel pour maintenir la stabilité du réseau et compenser l'intermittence des sources renouvelables, telles que le solaire et l'éolien. En outre, notre recherche montre que le retard d'investissement dans les projets d'énergie renouvelable entraîne des coûts futurs plus élevés et une dépendance accrue aux combustibles fossiles, ce qui compromet la sécurité énergétique du Maroc et ses objectifs en matière de climat. Pour relever les défis actuels, nous recommandons un bouquet énergétique diversifié combinant les sources d'énergie renouvelables et les technologies transitoires du gaz naturel. Cela garantit une transition stable et rentable tout en réduisant les émissions de carbone à un niveau aussi bas que 0,29 MtCO2e d'ici 2050. En outre, nous soulignons l'importance des mesures d'efficacité énergétique, qui pourraient réduire la demande totale d'énergie de 15% entre 2030 et 2050, contribuant ainsi de manière significative à la faisabilité de la transition vers les énergies renouvelables au Maroc. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration de la précision du modèle grâce à l'intégration de l'apprentissage automatique et sur l'expansion de la coopération régionale en matière d'énergie, en particulier le potentiel d'échange d'électricité avec les pays voisins. En adoptant une politique énergétique tournée vers l'avenir qui donne la priorité aux investissements précoces dans l'infrastructure des énergies renouvelables, le Maroc peut se positionner en tant que leader du développement énergétique durable dans la région MENA.

Mots-clés : Énergies renouvelables, OSeMOSYS, transition énergétique, Maroc, modélisation énergétique, développement durable, stabilité du réseau, gaz naturel.

INSEA B.P. 6217, Madinat Al Irfane, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc
Tél. : +212 (0)5 37 77 48 59/60 Fax : + 212 (0) 537 77 94 57

INSEA
Institut National de
Statistique et d'Économie
Appliquée
CEDOC-SIDD

Abstract

The transition towards a sustainable energy system is crucial for Morocco as it seeks to meet rising energy demands while reducing its reliance on imported fossil fuels. This thesis explores the longterm energy planning strategies required to optimize Morocco's energy system, focusing on the integration of renewable energy sources and the role of natural gas as a transitional energy resource. Using a bottom-up linear optimization model (OSeMOSYS), we assess various scenarios that balance economic feasibility, environmental sustainability, and energy security. Our findings suggest that achieving a 92% renewable energy integration by 2050 is both technically and economically feasible, albeit with an additional cost of approximately $32 billion compared to a Business as Usual (BAU) scenario. The model identifies pumped-storage hydroelectric plants as a critical component for maintaining grid stability and compensating for the intermittency of renewable sources, such as solar and wind. Additionally, our research shows that delayed investment in renewable energy projects results in higher future costs and an increased reliance on fossil fuels, undermining Morocco's energy security and climate goals. To address the current challenges, we recommend a diversified energy mix combining renewable energy sources with transitional natural gas technologies. This ensures a stable, cost-effective transition while reducing carbon emissions to as low as 0.29 MtCO2e by 2050. Furthermore, we emphasize the importance of energy efficiency measures, which could reduce total energy demand by 15% between 2030 and 2050, significantly contributing to the feasibility of Morocco's renewable energy transition. Future research should focus on enhancing model accuracy through the integration of machine learning and expanding regional energy cooperation, particularly the potential for electricity trade with neighboring countries. By adopting a forward-looking energy policy that prioritizes early investments in renewable energy infrastructure, Morocco can position itself as a leader in sustainable energy development across the MENA region.

Keywords: Renewable energy, OSeMOSYS, energy transition, Morocco, energy modeling, sustainable development, grid stability, natural gas.

INSEA *B.P. 6217, Madinat Al Irfane, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc*
Tél. *: +212 (0)5 37 77 48 59/60* ***Fax*** *: + 212 (0) 537 77 94 57*

ملخص

يعد الانتقال نحو نظام طاقة مستدام أمرًا بالغ الأهمية بالنسبة للمغرب الذي يسعى إلى تلبية الطلب المتزايد على الطاقة مع تقليل اعتماده على الوقود الأحفوري المستورد. تستكشف هذه الأطروحة استراتيجيات تخطيط الطاقة على المدى الطويل اللازمة لتحسين نظام الطاقة في المغرب، مع التركيز على تكامل مصادر الطاقة المتجددة ودور الغاز الطبيعي كمورد انتقالي للطاقة. وباستخدام نموذج التحسين الخطي التصاعدي (OSeMOSYS)، نقوم بتقييم سيناريوهات مختلفة توازن بين الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية وأمن الطاقة. تشير النتائج التي توصلنا إليها إلى أن تحقيق تكامل الطاقة المتجددة بنسبة 92% بحلول عام 2050 ممكن من الناحيتين التقنية والاقتصادية، وإن كان ذلك بتكلفة إضافية تبلغ حوالي 32 مليار دولار أمريكي مقارنة بسيناريو العمل كالمعتاد. ويحدد النموذج محطات الطاقة الكهرومائية التي تعمل بالضخ والتخزين كعنصر حاسم للحفاظ على استقرار الشبكة والتعويض عن التقطع في مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. بالإضافة إلى ذلك، يُظهر بحثنا أن تأخر الاستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة يؤدي إلى ارتفاع التكاليف المستقبلية وزيادة الاعتماد على الوقود الأحفوري، مما يقوض أمن الطاقة في المغرب وأهدافه المناخية.b ولمواجهة التحديات الحالية، نوصي بمزيج متنوع من الطاقة يجمع بين مصادر الطاقة المتجددة وتقنيات الغاز الطبيعي الانتقالية. وهذا يضمن انتقالاً مستقراً وفعالاً من حيث التكلفة مع خفض انبعاثات الكربون إلى 0.29 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2050. علاوة على ذلك، نؤكد على أهمية تدابير كفاءة الطاقة، والتي يمكن أن تقلل من إجمالي الطلب على الطاقة بنسبة 15% بين عامي 2030 و2050، مما يساهم بشكل كبير في جدوى التحول إلى الطاقة المتجددة في المغرب. يجب أن تركز البحوث المستقبلية على تعزيز دقة النموذج من خلال دمج التعلم الآلي وتوسيع نطاق التعاون الإقليمي في مجال الطاقة، لا سيما إمكانية تجارة الكهرباء مع البلدان المجاورة. ومن خلال اعتماد سياسة طاقة استشرافية تعطي الأولوية للاستثمارات المبكرة في البنية التحتية للطاقة المتجددة، يمكن للمغرب أن يحتل مكانة رائدة في مجال تنمية الطاقة المستدامة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، OSeMOSYS، انتقال الطاقة، المغرب، نمذجة الطاقة، التنمية المستدامة، استقرار الشبكة، الغاز الطبيعي.

INSEA B.P. 6217, Madinat Al Irfane, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc
Tél. : +212 (0)5 37 77 48 59/60 **Fax** : + 212 (0) 537 77 94 57