

Royaume du Maroc

Ministère de la Transition
Énergétique et du
Développement Durable



المملكة المغربية

وزارة الانتقـال
الطـاقـي
والتنمية المستدامة

LT-LEDS

Plan sectoriel de décarbonation de l'Énergie

**Projet de la stratégie nationale Bas Carbone du Maroc
2050**

23/10/2023

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	4
2. ENJEUX DU SECTEUR.....	5
2.1. Place du secteur dans les émissions de GES du pays	5
2.2. Tendances récentes et actuelles	7
2.2.1. Demande et production d'électricité	7
2.2.2. Autres activités de transformation.....	9
3. LE SECTEUR EN 2050 DANS UN SCENARIO NET ZERO	11
3.1. Consommation et production d'électricité.....	11
3.1.1. Demande d'électricité dans le scénario net-zéro.....	11
3.1.1. Production d'électricité dans le scénario net-zéro	13
3.1.2. Production et utilisation de charbon de bois dans le scénario net-zéro	18
3.1.1. Production et utilisation de gaz naturel dans le secteur de l'électricité dans le scénario net-zéro.....	18
3.1.2. Production et usages de l'hydrogène vert dans le scénario net-zéro	19
3.2. Émissions de GES du secteur énergie à 2050	21
4. MESURES A IMPLEMENTER POUR ATTEINDRE LE SCENARIO NET ZERO DANS LE SECTEUR DE L'ENERGIE	23
4.1. Ajout de nouvelles capacités de production d'électricité	23
4.2. Coûts d'investissement relatifs aux nouvelles capacités de production d'électricité	26
4.1. Coûts d'investissement relatifs à la production d'hydrogène vert.....	28
4.2. Volumes de gaz naturel à approvisionner.....	29
4.3. Empreinte spatiale de la production d'électricité dans le scénario net-zéro	30
ANNEXE 1 – MESURES D'ATTENUATION PREVUES POUR LE SECTEUR DE LA TRANSFORMATION D'ENERGIE DANS LE SCENARIO NET-ZERO.....	32
ANNEXE 2 – PROGRAMME ANNUEL D'INVESTISSEMENT EN NOUVELLES CAPACITES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE DE 2021 A 2050 DANS LE SCENARIO NET-ZERO (EN MW)..	33

Avertissement

Les scénarios présentés, issus du travail de modélisation des différents plans nationaux et mesures de décarbonation, sont à utiliser avec précaution. Le degré élevé de détail fourni ne doit pas mener à sous-estimer les incertitudes à plusieurs niveaux. Impacts de la situation nationale et internationale sur les politiques choisies et développées, évolution des priorités ministérielles relatives, évolution du développement technologique au niveau international, possibles nouvelles connaissances et données sur le contexte local, hypothèses de modélisation : tous ces éléments impactent significativement les scénarios présentés ici. Pour ces raisons, une mise à jour des scénarios régulière permettrait d'affiner les trajectoires dessinées ici, prenant en compte l'évolution réelle de la situation économique, environnementale et sociale, ainsi que la disponibilité de nouvelles données techno-économiques pour la modélisation.

Les principales incertitudes associées à la modélisation du secteur de l'énergie et en particulier du secteur électrique portent sur la forme des futures courbes de charge, les coûts de renforcement du réseau et l'impact de l'épuisement des sites de haute qualité sur les facteurs de capacité de l'éolien.

1. Introduction

Les Plans Sectoriels de Décarbonation (PSD) ont pour objectif de proposer des trajectoires de réduction des émissions de GES permettant au Maroc d'atteindre le net-zéro d'ici à 2050. Six PSD ont été préparés pour les secteurs suivants : bâtiment, approvisionnements en énergie, transports, industrie, agriculture-forêts et déchets.

Les PSD sont basés sur le travail de modélisation très fin réalisé par SEI US à l'aide du modèle LEAP. La concertation et les échanges approfondis avec les acteurs nationaux a permis de traduire la vision marocaine dans un ensemble de scénarios intégrés et cohérents entre secteurs et sous-secteurs.

Au sein de chaque secteur, les actions permettant d'atteindre l'objectif net-zéro en 2050 correspondent aux différentes hypothèses qui sous-tendent la modélisation LEAP. Celles-ci ont été proposées et discutées lors des ateliers de consultation avec les parties prenantes et validées in fine par le comité de pilotage. Elles s'appuient sur les axes de réduction des émissions figurant dans la Contribution Déterminée Nationalement (CDN) pour la période allant jusqu'à 2030, sur des mesures complémentaires figurant dans les stratégies sectorielles et enfin, sur des mesures additionnelles, plausibles mais également ambitieuses, nécessaires pour atteindre le net-zéro en 2050.

Les PSD donnent donc une vision précise des changements technico-économiques et des efforts de décarbonation à opérer pour atteindre l'objectif de décarbonation à 2050. Les politiques et mesures correspondantes seront définies grâce à l'appropriation de ces résultats par les différents ministères concernés.

En ce qui concerne le secteur de la transformation d'énergie, l'analyse qui suit porte sur la période 2020-2060, 2020 étant l'année de base de la modélisation et 2060, l'année de fin de la modélisation. Néanmoins, il est important de souligner que le scénario Net-Zéro est construit de manière à atteindre des émissions nettes nulles en 2050.

Les résultats de la modélisation LEAP présentés dans ce document sont tirés de la version lt-leds maroc v0.112.

2. Enjeux du secteur

2.1. Place du secteur dans les émissions de GES du pays

Le secteur « énergie » comprend les activités d'extraction et de transformation de l'énergie à savoir :

- L'extraction pétrolière et gazière
- Le raffinage de produits pétroliers
- Le transport et la distribution de combustibles fossiles
- La production d'électricité
- La production de charbon de bois et,
- La production d'hydrogène.

Dans le secteur énergie, les émissions de gaz à effet de serre (GES) surviennent :

- Lors de la combustion des énergies fossiles pendant un processus de transformation
- Lorsque le secteur de l'énergie consomme de l'énergie pour son fonctionnement propre (ex. systèmes auxiliaires, transport et distribution) et,
- Lors d'émissions fugitives liées à l'extraction et au transport/distribution de combustibles fossiles.

Pour la période d'analyse 2020-2060, dans le secteur de l'énergie, seules les activités de production d'électricité, de production de charbon de bois et d'extraction de pétrole et de gaz seront émettrices de GES. En effet, l'activité de raffinage s'est interrompue en 2015¹. D'autre part, il est prévu que la production d'hydrogène pour usage énergétique démarre d'ici à 2030 mais elle ne sera pas émettrice de GES puisqu'entièrement basée sur des énergies renouvelables.

En 2020, année de base de la modélisation, les émissions du secteur de l'énergie représentent 28,0% des émissions totales de GES du Maroc. Au sein du secteur de l'énergie, la production d'électricité représente la quasi-totalité des émissions (99,1%), suivie du transport et distribution de combustibles fossiles (0,8%), de la production de charbon de bois (0,1%) et de l'extraction de gaz naturel (0,1%). L'exploration-production de pétrole brut représente des émissions négligeables.

¹ Aucun des scénarios LEAP ne prévoit un redémarrage des activités de raffinage au Maroc.

Tableau 1 Émissions de GES du Maroc en 2020 (MT)

Branche	Millions de tonnes métriques	%
Demande	41,687	39,0
<i>Agriculture pêche forêt</i>	2,852	2,7
<i>Industrie</i>	13,250	12,4
<i>Résidentiel</i>	8,794	8,2
<i>Tertiaire</i>	0,606	0,6
<i>Transport</i>	16,185	15,1
Transformation d'énergie	29,927	28,0
Non Energie	35,415	33,1
<i>PIUP²</i>	7,189	6,7
<i>Agriculture</i>	16,457	15,4
<i>Déchets</i>	12,351	11,5
<i>UTCAF</i>	-0,582	-0,5
Total	107,029	100,0

Tableau 2 Émissions de GES du secteur de l'énergie du Maroc en 2020 (MT)

Branche	Millions de tonnes métriques	%
Production d'électricité	29,647	99,1
Transport et distribution de combustibles fossiles	0,238	0,8
Production de charbon de bois	0,022	0,1
Production de gaz naturel	0,021	0,1
Production de pétrole brut	<0,001	0,0
Raffinage de pétrole	-	-
Production de charbon	-	-
Consommations propres du secteur énergétique	-	-
Total	29,927	100,0

² Contrairement à l'inventaire marocain de GES, la modélisation LEAP des émissions PIUP à 2060 incluent les émissions provenant de la production d'acide phosphorique. Il y a donc une légère différence entre le périmètre des émissions dans LEAP et dans l'inventaire de GES.

2.2. Tendances récentes et actuelles

2.2.1. Demande et production d'électricité

En 2020, la demande d'électricité du Maroc, tous secteurs confondus, s'élève à 34,0 TWh³. Le principal secteur consommateur est l'industrie (38,0%), suivi du résidentiel (34,5%), du tertiaire (16,3%), de l'agriculture (10,5%) et du transport (0,2%). En 2020, la demande d'électricité du transport provient entièrement du ferroviaire.

La hausse de la demande d'électricité entre 2004 et 2020 a été de 4,7% par an en moyenne. A l'exception du transport (+0,4% par an), tous les secteurs ont connu une croissance soutenue comprise entre 4,2% et 4,9% par an.

Tableau 3 Demande d'électricité par secteur en 2020 (TWh)

Branche	Demande en TWh	%	TCAM 2004-2020 (%)	Part de l'électricité dans la CFE ⁴ 2020 (%)
Agriculture, pêche, forêt	3,6	10,5	4,6	27,2
Industrie	12,9	38,0	4,8	33,7
Résidentiel	11,8	34,5	4,9	20,2
Tertiaire	5,5	16,3	4,2	37,0
Transport	0,2	0,6	0,4	0,3
Total	34,0	100,0	4,7	17,9

La part de l'électricité dans la demande totale d'énergie finale en 2020 s'établit à 17,9% contre 13,0% en 2004. Il y a donc une tendance de fond à l'électrification des usages de l'énergie dans l'économie marocaine à l'exception du transport, du moins jusqu'à maintenant. La part de l'électricité est la plus élevée dans le tertiaire (37,0%) et l'industrie (33,7%).

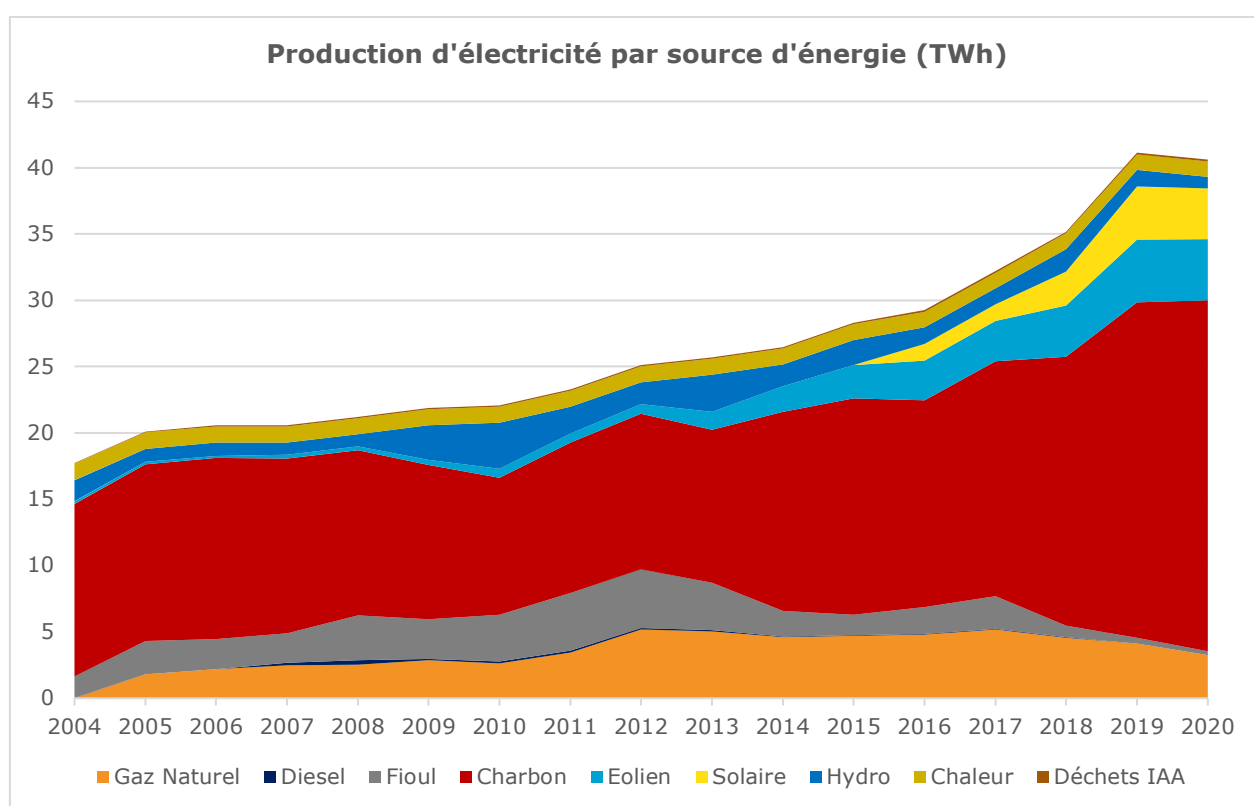
En 2020, la production d'électricité (99,1% des émissions du secteur énergie en 2020) reste dominée par les combustibles fossiles (78,1%) et notamment le charbon (68,5%). Les sources renouvelables représentent 18,6% dont 11,6% d'éolien, 3,8% de solaire, 2,3% d'hydro classique et 1% de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP).

³ La demande en électricité a atteint environ 38 TWh en 2022. L'année de base étant 2020, toutes les données figurant dans le Plan sectoriel de décarbonation de l'énergie pour les années qui suivent (2021-2060) sont des résultats de la modélisation LEAP et peuvent donc présenter de légères différences avec les valeurs réelles observées pour 2021 et 2022.

⁴ CFE : Consommation finale d'énergie

Tableau 4 Production d'électricité par source d'énergie en 2020 (en TWh)

Production d'électricité en 2020	TWh	%
Gaz naturel	3,4	8,6
Fioul et Diesel	0,4	1,0
Charbon	27,2	68,5
Éolien	4,6	11,6
Solaire	1,5	3,8
Hydro	0,9	2,3
Chaleur	1,2	3,0
Déchets des industries agro-alimentaires	0,1	0,3
STEP	0,4	1,0
Total	39,7	100,0



En termes de capacités installées, les centrales thermiques classiques représentent 62,8% du total, les renouvelables 32,8% et le stockage (STEP⁵) 4,4%. La dernière décennie a été marquée par la montée en puissance de l'éolien, du solaire (PV et CSP) mais également du charbon. Avec 38,7% des capacités installées, ce dernier fournit encore 68,5% de l'électricité produite au Maroc.

⁵ Stations de Transfert d'Énergie par Pompage

Tableau 5 Capacités installées par technologie en 2020 (en MW)⁶

Technologie	MW	%
Gaz naturel	834	7,9
Diesel	314	3,0
Fioul	300	2,8
TAG	1110	10,4
Charbon	4 116	38,7
Éolien	1 430	13,5
Solaire	751	7,1
Hydro	1 306	12,3
Stockage	464	4,4
Total	10 625	100,0

2.2.2. Autres activités de transformation

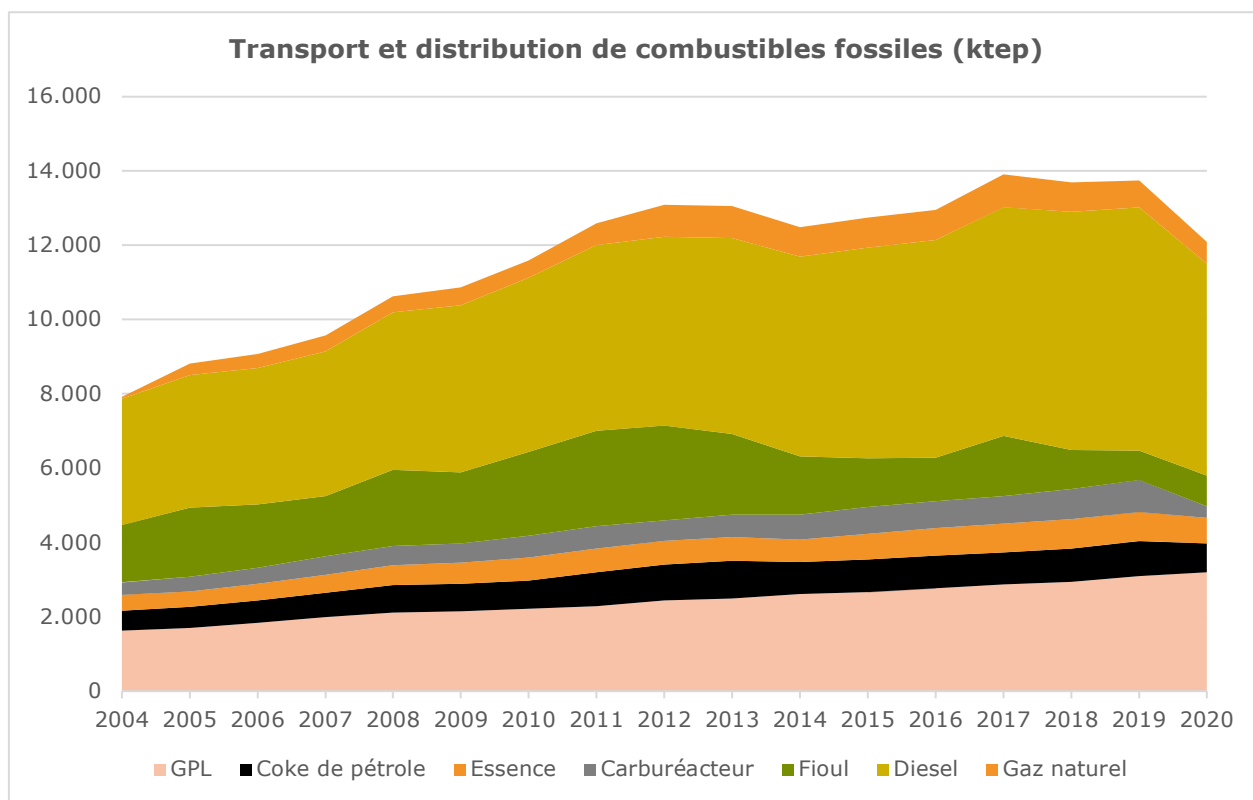
Les activités de transformation autres que la production d'électricité émettent peu de GES car ne sont comptabilisées que les émissions relatives aux consommations énergétiques intermédiaires nécessaires au fonctionnement des unités de transformation ou au transport des produits transformés.

La production de charbon de bois (0,01% des émissions du secteur énergie en 2020) est passée de 6,9 ktep en 2004 à 14,9 ktep en 2020 soit une progression annuelle moyenne de 4,9%. L'efficacité moyenne de la production de charbon de bois est estimée à 30% et reste inchangée la période 2004-2020 et sur la période 2020-2060.

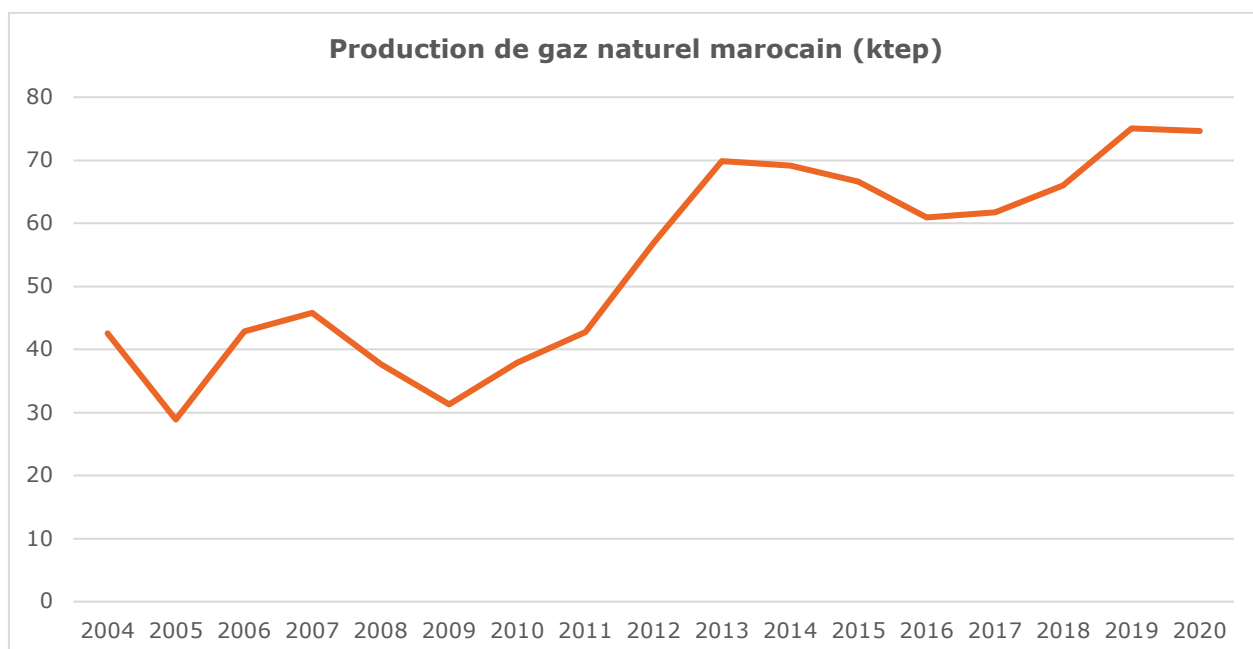
Le transport et la distribution de combustibles fossiles (0,24% des émissions du secteur énergie en 2020) concerne les produits suivants : GPL⁷, coke de pétrole, essence, carburéacteur, fioul, diesel et gaz naturel. Les combustibles fossiles ont connu une croissance de 2,7% sur la période 2004-2020 avec une tendance à la stabilisation en fin de période. Ils sont dominés par le diesel (47% en 2020) et le GPL (27% en 2020). Les croissances les plus fortes concernent le gaz naturel, le diesel et le GPL. Seul le fioul est en recul net.

⁶ Les capacités de production installée en cogénération dans l'industrie s'élèvent à 149 MW. Elles ne figurent pas dans ce tableau

⁷ Gaz de pétrole liquéfié



La production de gaz naturel marocain (0,02% des émissions du secteur énergie en 2020) est à un niveau relativement faible (75 ktep en 2020) mais en croissance depuis 2004. La majeure partie du gaz naturel consommé au Maroc est importé (87%).



3. Le secteur en 2050 dans un scénario Net Zéro

3.1. Consommation et production d'électricité

3.1.1. Demande d'électricité dans le scénario net-zéro

Atteindre le scénario net-zéro implique d'opérer un basculement massif vers une électricité décarbonée des usages finaux qui reposent encore largement sur les combustibles fossiles. Cela revient à dire que la part de l'électricité dans les usages finaux des différents secteurs devra augmenter fortement.

L'électrification massive des usages dans le scénario net-zéro se traduit par une demande totale d'électricité en très forte augmentation par rapport au scénario de référence. En 2050, la demande d'électricité dans le scénario net-zéro est 70% plus élevée que dans le scénario de référence.

Dans le scénario net-zéro, la demande totale d'électricité est multipliée par 5 entre 2020 et 2050 ce qui correspond à un taux de croissance annuel moyen de 5,5% sur la période (+3,1% dans le scénario de référence). On peut souligner que cette croissance annuelle moyenne dans le scénario net-zéro est plus rapide que celle enregistrée sur la période 2004-2020.

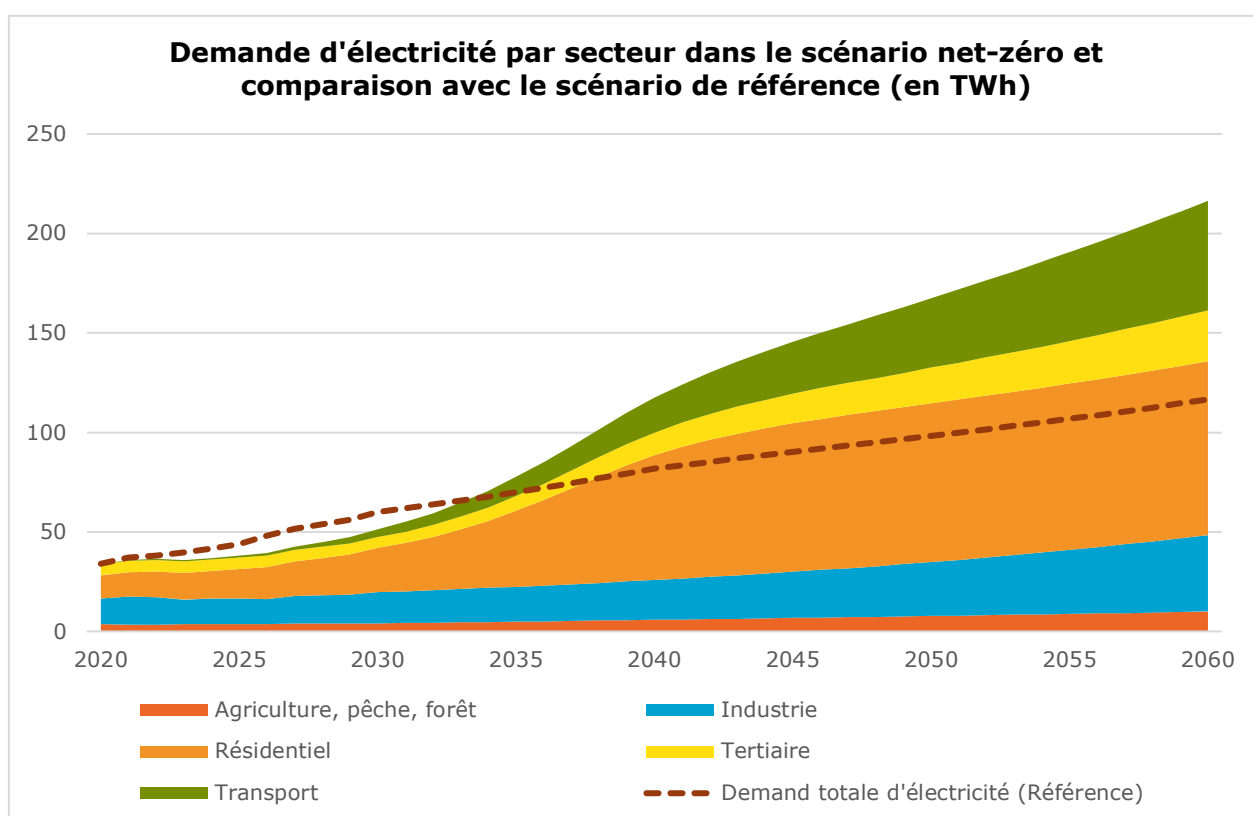


Tableau 6 Demande d'électricité par secteur dans le scénario net-zéro (en TWh)

Secteur	2020	2030	2040	2050	2060
Agriculture, pêche, forêt	3,6	4,1	5,9	7,8	10,0
Industrie	12,9	15,6	19,9	27,1	38,4
Résidentiel	11,8	22,1	62,7	79,8	87,4
Tertiaire	5,5	5,5	11,5	17,9	25,6
Transport	0,2	4,0	17,4	35,0	55,0
Tous secteurs (Net-zéro)	34,0	51,3	117,4	167,6	216,4
Tous secteurs (Référence)	34,0	59,9	81,9	98,2	116,6

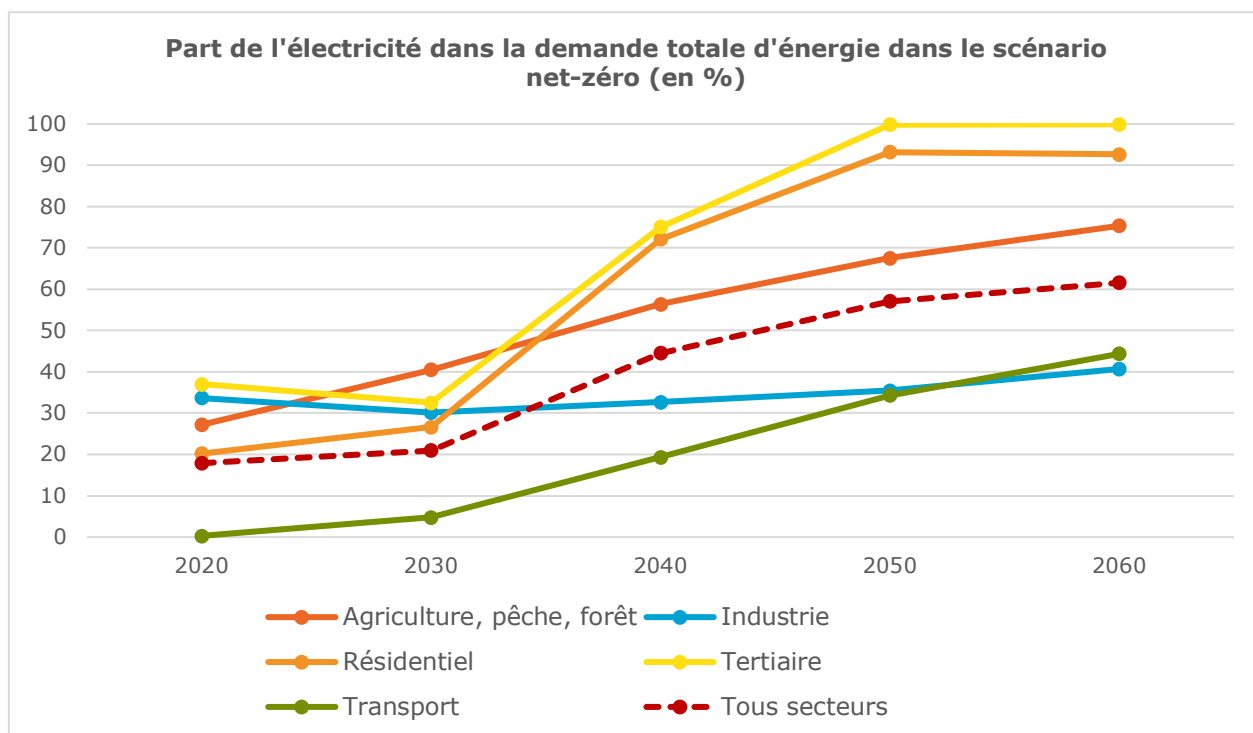
Source : LEAP

A l'horizon 2050, dans le scénario net-zéro, la pénétration de l'électricité dans le résidentiel et le tertiaire atteindra respectivement 93,1% et 99,9%, contre 20,2% et 37,0% en 2020. Le secteur agriculture-pêche-forêt verra la part de l'électricité passer de 27,2% à 67,5%. Le secteur du transport verra la pénétration de l'électricité atteindre 34,3% en 2050 contre 0,3% en 2020 grâce notamment à la forte croissance du parc de véhicules particuliers et utilitaires légers électriques.

Le secteur de l'industrie fait figure d'exception car la hausse de la part de l'électricité y reste modeste (de 33,7% en 2020 à 35,4% en 2050) en comparaison avec les autres secteurs. La projection à 2050 prend en compte la décarbonisation dans l'industrie via des mesures d'atténuation spécifiques et notamment l'utilisation des énergies renouvelables directement par l'industrie.

Tableau 7 Part de l'électricité par secteur (en %)

Secteur	2020	2030	2040	2050	2060
Agriculture, pêche, forêt	27,2	40,5	56,4	67,5	75,4
Industrie	33,7	30,1	32,7	35,4	40,7
Résidentiel	20,2	26,6	72,1	93,1	92,6
Tertiaire	37,0	32,5	75,0	99,9	99,9
Transport	0,3	4,8	19,4	34,3	44,4
Tous secteurs	17,9	21,0	44,5	57,1	61,5



3.1.1. Production d'électricité dans le scénario net-zéro

3.1.1.1. Capacités de production

Afin de répondre à la forte hausse attendue de la demande d'électricité dans le scénario net-zéro, il est nécessaire de poursuivre et d'accélérer la transformation du mix électrique déjà engagée par le Maroc au travers de ses investissements dans les énergies renouvelables.

Il est important de noter que les plans d'équipement de l'ONEE⁸ prévoient d'ores et déjà une décarbonisation très poussée des capacités de production d'électricité aux horizons 2030 et 2040⁹. Le gouvernement marocain a déjà fixé des objectifs de production d'électricité sans carbone de plus de 52% en 2030¹⁰ et de 80% en 2050. Par ailleurs, même sans un objectif obligatoire de décarbonation, les émissions de la production d'électricité sont réduites de presque 90 % à l'horizon 2060 du seul fait que les technologies renouvelables et de stockage (éolien, solaire, batteries) voient leur compétitivité-coût s'accroître de manière tendancielle. Après 2030, les énergies renouvelables et notamment l'éolien sont les plus compétitives en termes des coûts.

⁸ Office National de l'Electricité et de l'Eau potable

⁹ Mix électrique, Schéma Directeur Production 2020-2040. Présentation ONEE de février 2020

¹⁰ Il à souligner que lors d'une réunion de travail dédiée au déploiement de la stratégie des énergies renouvelables qui s'est tenue en novembre 2018, Sa Majesté Le Roi Mohammed VI a donné ses instructions pour augmenter la part des capacités renouvelables à plus de 52% dans le mix électrique national à l'horizon 2030.

Le scénario net-zéro s'inscrit donc dans un mouvement largement entamé du point de vue du mix mais qu'il sera nécessaire de confirmer et d'amplifier pour produire les volumes d'électricité nécessaire à la satisfaction de la demande.

Dans le scénario net-zéro, il est notamment prévu¹¹ un moratoire sur la production de charbon à partir de 2040. Ce moratoire est l'une des mesures d'atténuation figurant dans le scénario net-zéro pour le secteur de l'énergie. On peut noter que dans ce scénario, les centrales au charbon ne seraient démantelées qu'à la fin de leur durée de vie technique, dans le courant des années 2040. Compte tenu de l'existence de deux contrats PPA (JLEC et SAFIEC) dont les durées ne prendront fin jusqu'à 2044 et 2048 respectivement, un moratoire sur le charbon devrait s'accompagner de mesures d'accompagnement financières et sociales supportées par le Gouvernement du Maroc et visant à compenser l'impact de fermetures anticipées.

Dans le scénario net-zéro, il est attendu une forte hausse des capacités installées qui passeraient ainsi de 10,6 GW en 2020¹² à 110, 2 GW en 2050 soit une multiplication par 10. A titre de comparaison, le scénario net-zéro exige 47,1 GW de capacités supplémentaires en 2050 par rapport au scénario de référence. L'effort le plus important concerne l'éolien (+33,4 GW d'accroissement net entre 2020 et 2050). Vient ensuite le solaire avec + 43,0 GW d'ici à 2050, pratiquement uniquement en PV. Il est important de noter que le scénario net-zéro prévoit le développement de capacités d'énergies renouvelables par l'OCP¹³ à partir de 2027 (éolien et solaire PV).

L'introduction à grande échelle de sources d'énergies intermittentes nécessitera d'autre part d'augmenter les capacités de stockage sous forme de STEP (+ 0,9 GW) ou de batteries (+13,4 GW) sur la même période (2020-2050). Pour les mêmes raisons de besoins en flexibilité, les centrales fonctionnant au gaz naturel verront leur rôle perdurer jusqu'en fin de période et leur capacités installées s'accroître de + 13,7 GW à 2050¹⁴. La capacité hydroélectrique traditionnelle resterait inchangée à 1,3 GW. Dans le scénario net-zéro, les capacités pilotables que sont les centrales au gaz naturel, l'hydroélectrique et le stockage (STEP et batteries) représentent une part essentielle de la production en contribuant à maintenir la marge de réserve du système.

Dans le scénario net-zéro, il est envisagé un recours au nucléaire sous forme de centrales dites SMR¹⁵ à hauteur de 0,3 GW en 2050 et 2,4 GW en 2060 soit la limite autorisée selon les directives du MTEDD¹⁶. Le nucléaire apporterait un surcroît de flexibilité au système. Une petite capacité de production à partir de biomasse (+0,3 GW) complète le mix de production.

¹¹ Sur proposition du METDD

¹² 10,8 GW si l'on inclut la cogénération industrielle

¹³ Office Chérifien des Phosphates

¹⁴ Cet accroissement des capacités de production au gaz naturel pourraient inclure la conversion des TAG fioul existantes en TAG gaz naturel

¹⁵ Small Modular Reactor

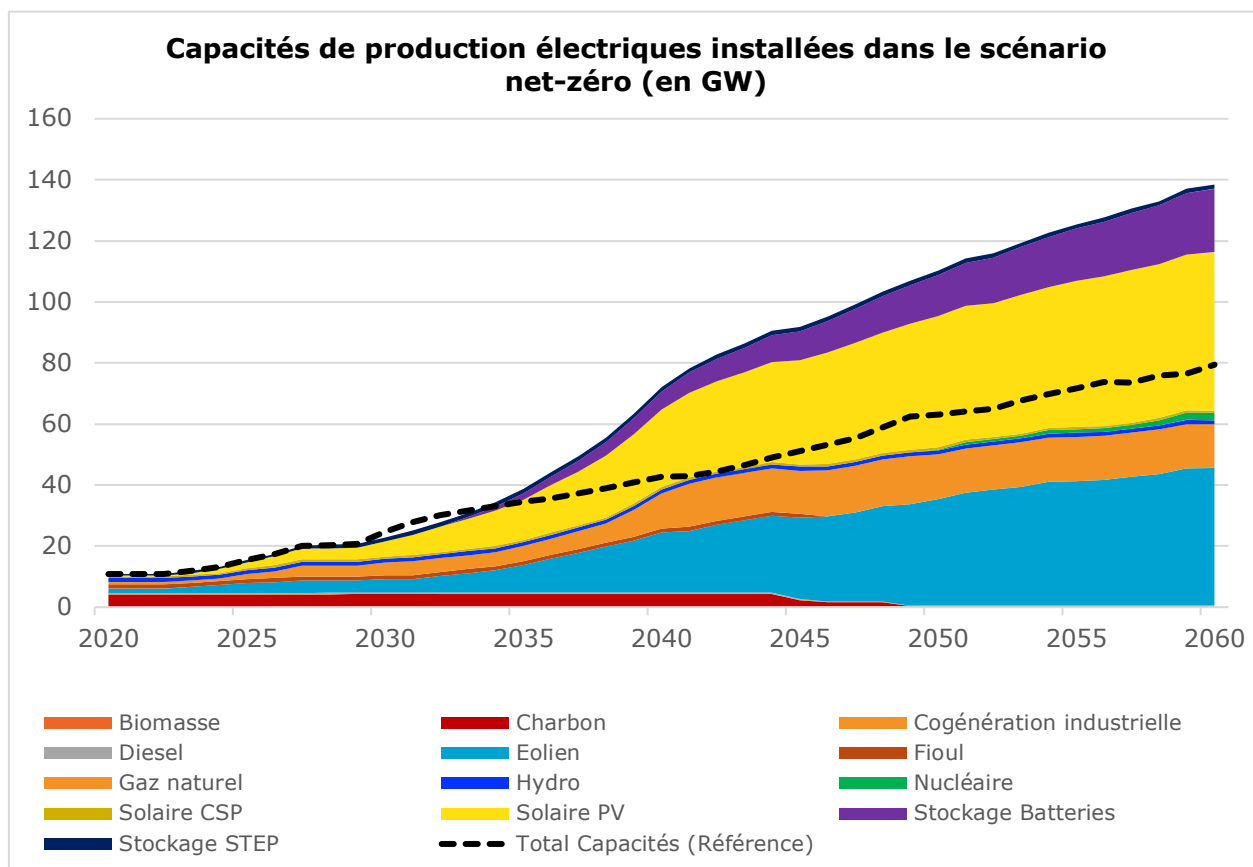
¹⁶ Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable

Tableau 8 Capacités de production d'électricité installées par technologie entre 2020 et 2060 dans le scénario net-zéro (en GW)

Technologie	2020	2030	2040	2050	Acroissement net 2020-2050 en GW	2060
Biomasse	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Charbon	4,1	4,1	4,1	0,0	-4,1	0,0
Cogénération industrielle	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Diesel	0,3	0,3	0,3	0,0	-0,3	0,0
Éolien	1,6	4,4	19,8	35,0	33,4	45,1
Fioul	1,3	1,3	1,3	0,0	-1,3	0,0
Gaz naturel	0,8	4,1	11,5	14,5	13,7	14,4
Hydro	1,3	1,3	1,3	1,3	0,0	1,3
Nucléaire	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	2,4
Solaire CSP	0,5	0,7	0,7	0,7	0,2	0,7
Solaire PV	0,3	4,9	25,5	43,1	42,8	51,9
Stockage Batteries	0,0	0,0	5,9	13,4	13,4	20,8
Stockage STEP	0,5	1,4	1,4	1,4	1,0	1,4
Total	10,8	22,9	72,0	110,2	99,4	138,4

Enfin, il est prévu que les centrales au charbon, au diesel et au fioul soient toutes mises hors service après 2040 ce qui représente un retrait de 5,7 GW de capacités thermiques.

Les accroissements de capacité mentionnés ci-dessus sont des accroissements nets. A partir de 2040, les investissements en nouvelles capacités de production devront tenir compte du besoin de remplacement de capacités en renouvelables et au gaz naturel arrivant en fin de vie.



3.1.1.1. Mix de production d'électricité

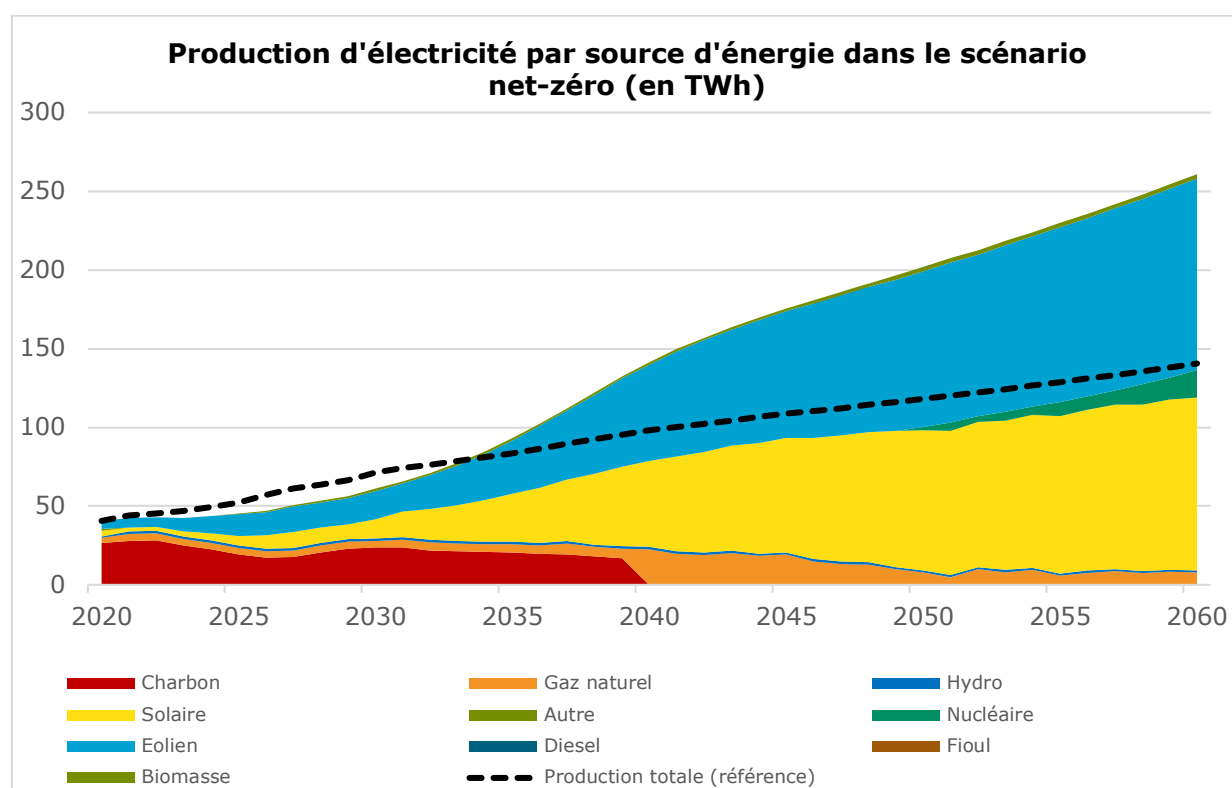
Dans le scénario net-zéro, la production d'électricité atteint 201,9 TWh en 2050 soit une multiplication par plus de 5 par rapport au niveau de 2020 (39 TWh) et une croissance annuelle moyenne de 5,6% sur la période 2020-2050. A titre de comparaison, la croissance annuelle moyenne de la production d'électricité sur la période 2004-2020 a été de 5,3%. Par rapport au scénario de référence, la production d'électricité est plus élevée de 84 TWh en 2050.

Tableau 9 Production totale d'électricité par source d'énergie (TWh)

Source d'énergie	2020	2030	2040	2050	2060
Charbon	26,5	23,6	0,0	0,0	0,0
Gaz naturel	3,2	4,4	22,6	7,8	7,8
Hydro	0,9	1,6	1,5	1,3	1,5
Solaire	3,8	12,2	54,8	88,9	109,5
Nucléaire	0,0	0,0	0,0	2,3	17,6
Éolien	4,6	17,7	60,9	98,8	121,7
Biomasse	0,0	1,4	1,4	2,8	2,8
Produits pétroliers et autres	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Total (net-zéro)	39,0	61,0	141,1	201,9	260,8
Total (référence)	40,6	71,5	98,3	117,9	140,6

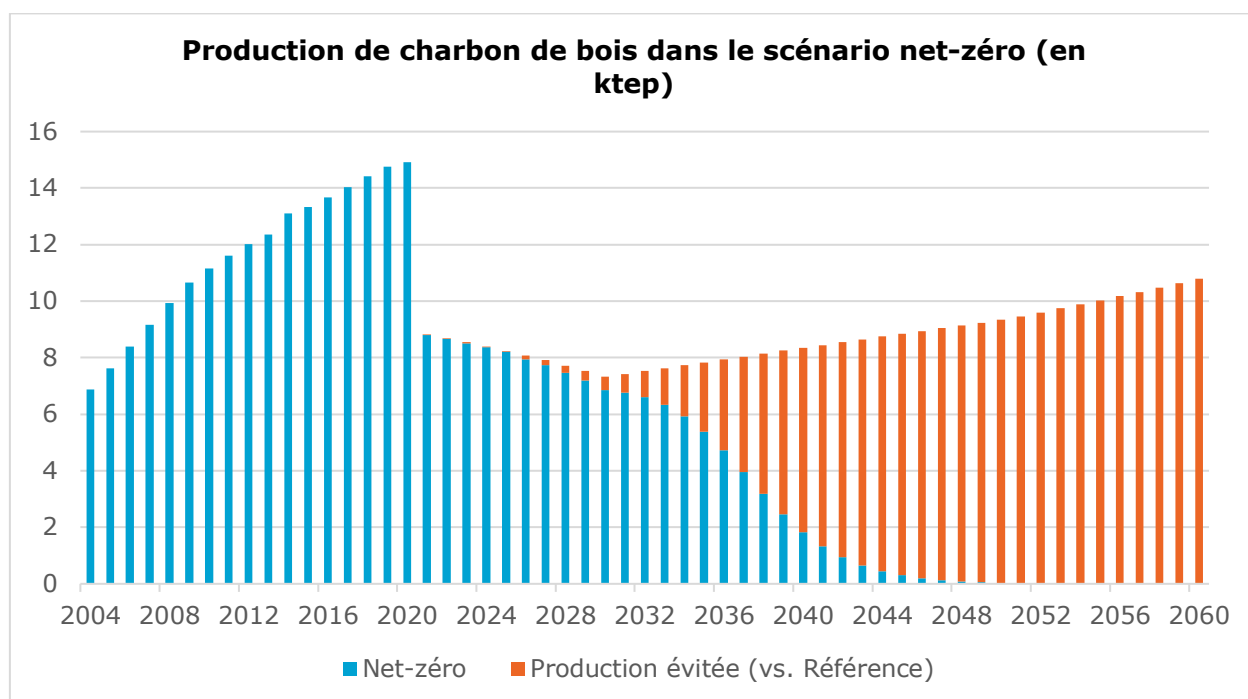
La production d'électricité à partir du charbon cesse en 2040 dans le scénario net-zéro. Dans un premier temps, la production des centrales au charbon est compensée par une hausse nette de la production des centrales au gaz naturel. Cependant, l'essentiel de la forte hausse de demande d'électricité est couvert par la montée en puissance très rapide de l'éolien et du solaire PV dans des proportions très similaires.

A l'horizon 2050, le système électrique marocain évolue vers une configuration largement dominée par l'éolien et le solaire et équilibré par le stockage (STEP et batteries) et une petite production pilotable (gaz naturel, nucléaire et biomasse).



3.1.2. Production et utilisation de charbon de bois dans le scénario net-zéro

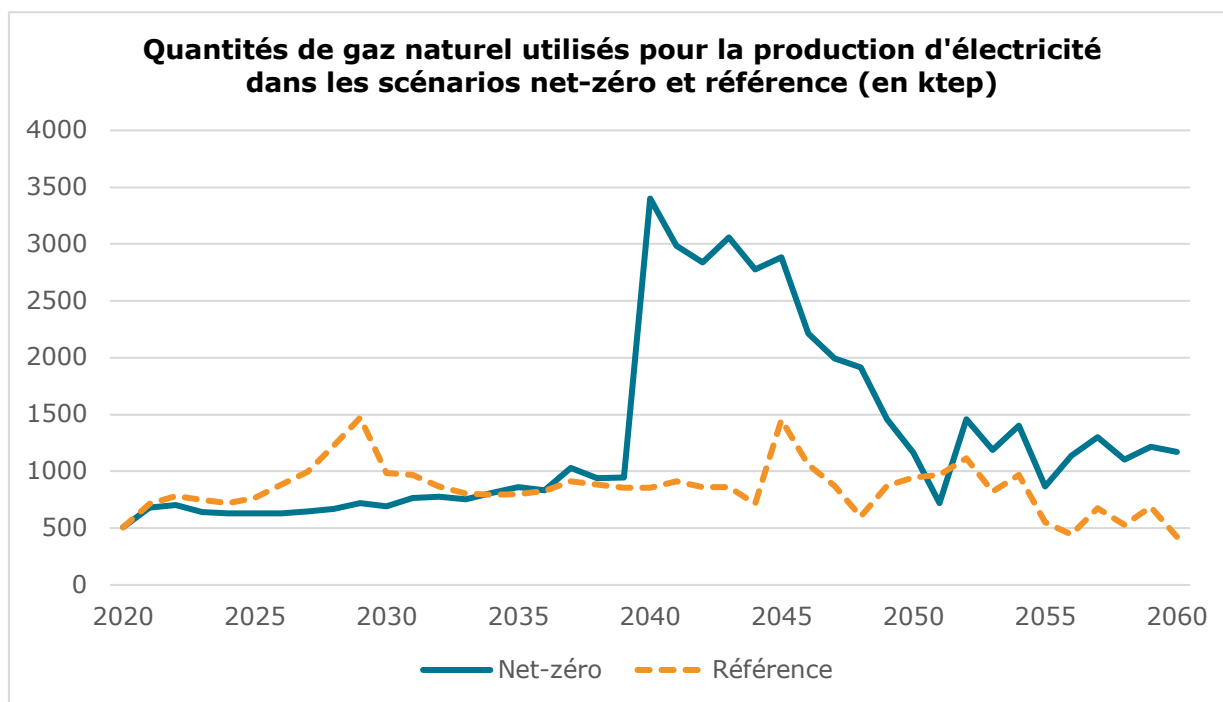
La production de charbon de bois dans le scénario net-zéro chute brutalement dans le début des années 2020 de 15 ktep à 8 ktep environ avant d'entamer une baisse régulière jusqu'à disparaître totalement à la fin des années 2040. Dans le scénario de référence, la production de charbon de bois perdurerait jusqu'à la fin de l'horizon de prévision. La disparition du charbon de bois nécessite sa substitution par des énergies alternatives dans les secteurs résidentiels et tertiaires.



3.1.1. Production et utilisation de gaz naturel dans le secteur de l'électricité dans le scénario net-zéro

Les volumes de gaz naturel utilisés pour la production d'électricité augmentent de manière significative dans le scénario net-zéro, notamment après 2040. Le recours accru aux centrales au gaz naturel est rendu nécessaire par la sortie du charbon et par la nécessité d'équilibrer un système dominé par les sources renouvelables intermittentes.

En 2043, l'année de pointe de consommation de gaz naturel, les volumes consommés sont plus de six fois supérieurs aux volumes consommés en 2020.



L'utilisation du gaz naturel atteint un pic en 2040. La baisse qui s'ensuit est essentiellement le résultat d'exigences croissantes en matière de décarbonation. Le concept de base ou semi-base tendra à s'estomper dans l'avenir. L'introduction massive des renouvelables sera équilibrée par l'usage des batteries d'une part et du gaz naturel d'autre part.

3.1.2. Production et usages de l'hydrogène vert dans le scénario net-zéro

Dans le scénario net-zéro, la production d'hydrogène vert démarre au milieu des années 2020 et monte en puissance progressivement jusqu'à atteindre plus de 14,000 ktep en fin de période¹⁷.

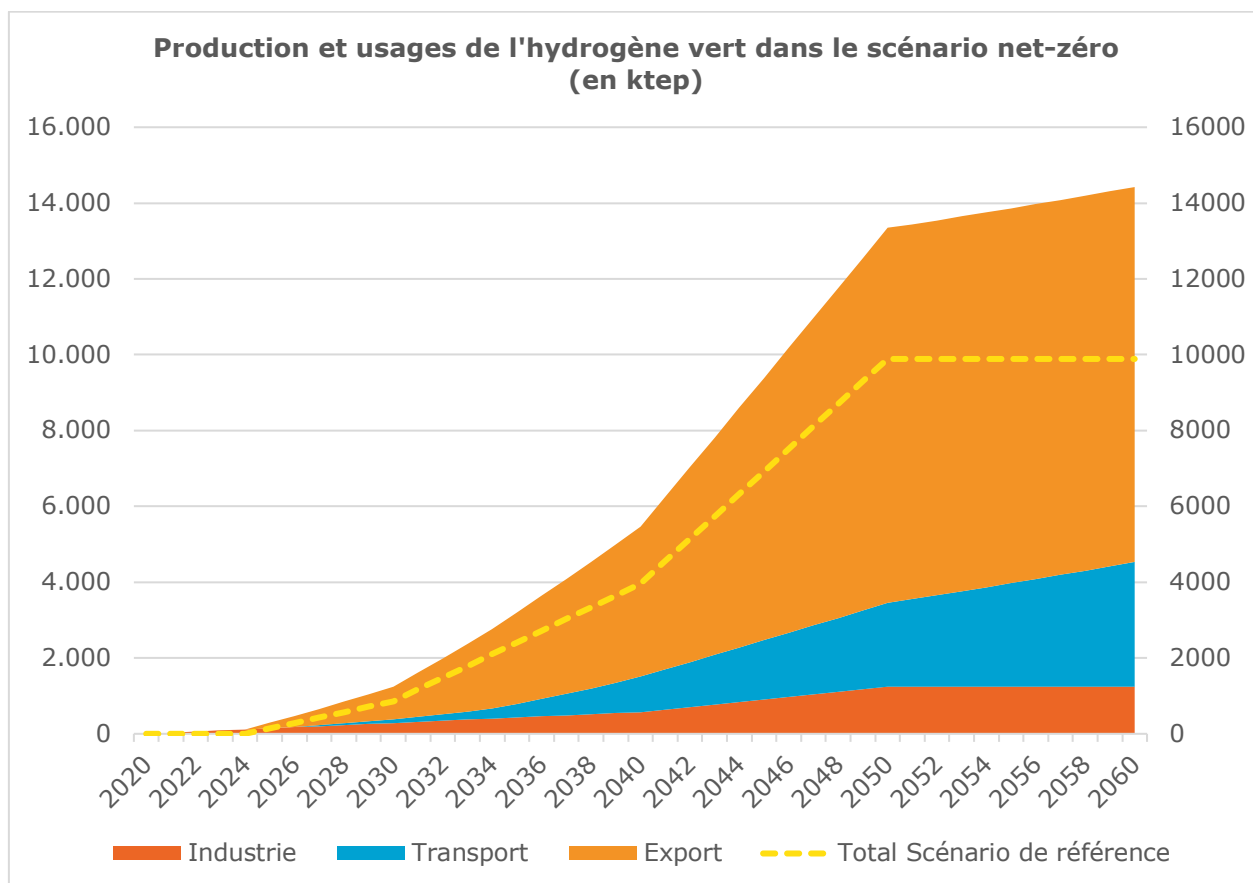
Conformément à la feuille de route du Maroc sur l'hydrogène vert, les volumes produits seront destinés en premier lieu à l'exportation, à hauteur des trois-quarts en 2050.

Le reste sera consommé dans l'industrie (usages thermiques) et dans le transport (routier lourd, transport ferroviaire, véhicules hors route et aviation). En 2050, le transport, terrestre surtout, représenterait près des deux-tiers de la demande domestique d'hydrogène vert et l'industrie l'autre tiers, notamment pour la production de ciment.

La production d'hydrogène vert ne génère pas d'émissions de GES car elle est entièrement basée sur des électrolyseurs alimentés par le solaire PV¹⁸ hors réseau.

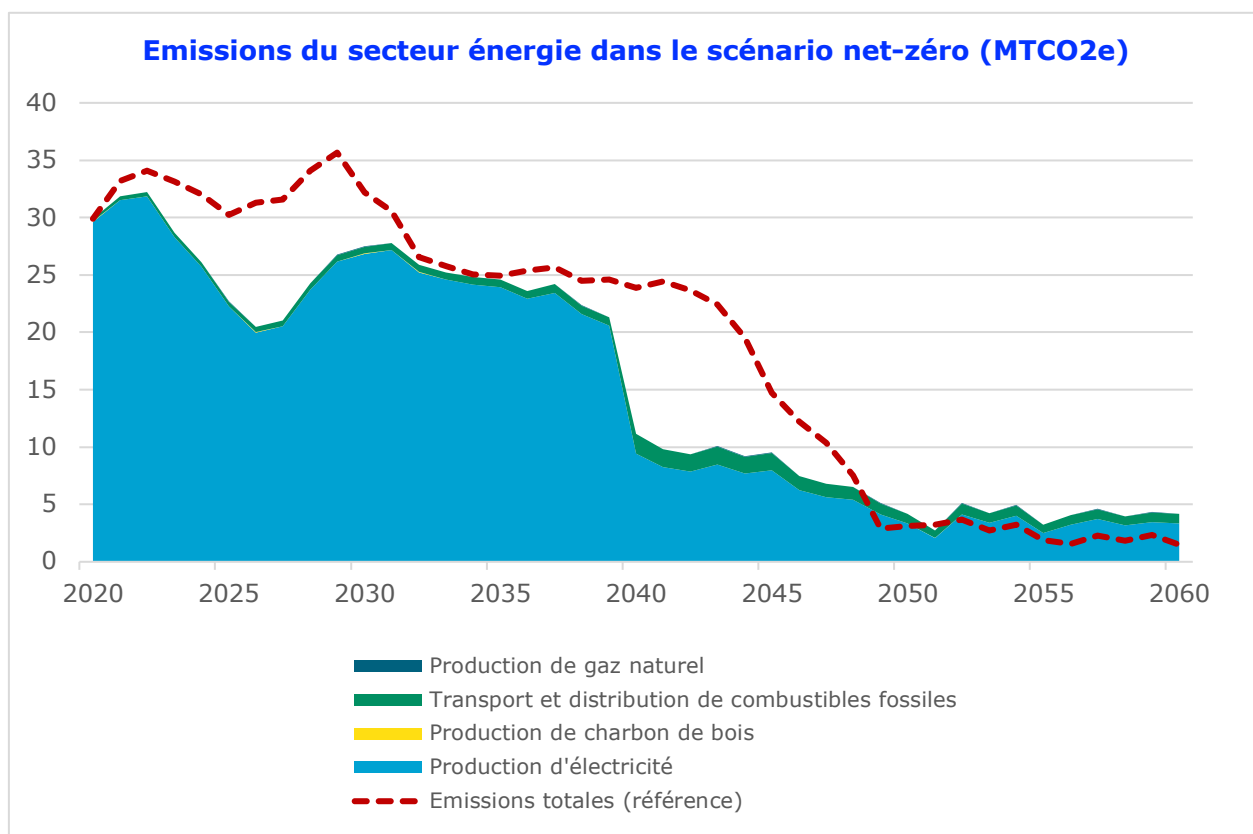
¹⁷ A noter que dans le scénario « référence », toute la production d'hydrogène vert est exportée.

¹⁸ Sur la base d'une analyse des coûts complets de la production d'hydrogène vert, la modélisation n'envisage que l'électrolyse alimentée par des énergies renouvelables hors réseau.



3.2. Émissions de GES du secteur énergie à 2050

Dans le scénario net-zéro, les émissions de GES du secteur de l'énergie passent de près de 29,9 MTCO₂e en début de période à 4,2 MTCO₂e en 2050. Les émissions restent dominées par le secteur de la production d'électricité. Le transport et la distribution de combustibles fossiles voient leurs émissions augmenter principalement en raison du recours accru au gaz naturel à partir de 2035.



En se substituant à la production à partir du charbon, l'autoproduction industrielle d'électricité a un impact notable sur les émissions du secteur électrique dans les années 2020/2030. À partir du milieu des années 2040 et y compris en 2050, les émissions sont plus élevées dans le scénario net-zéro que dans le scénario de référence malgré les objectifs plus stricts en matière d'électricité décarbonée.

La raison de ce paradoxe tient au niveau de production d'électricité total beaucoup plus important dans le scénario net-zéro que dans le scénario de référence.

Avec l'arrêt du charbon en 2040, les émissions résiduelles du secteur électrique proviennent presque exclusivement des centrales au gaz naturel.

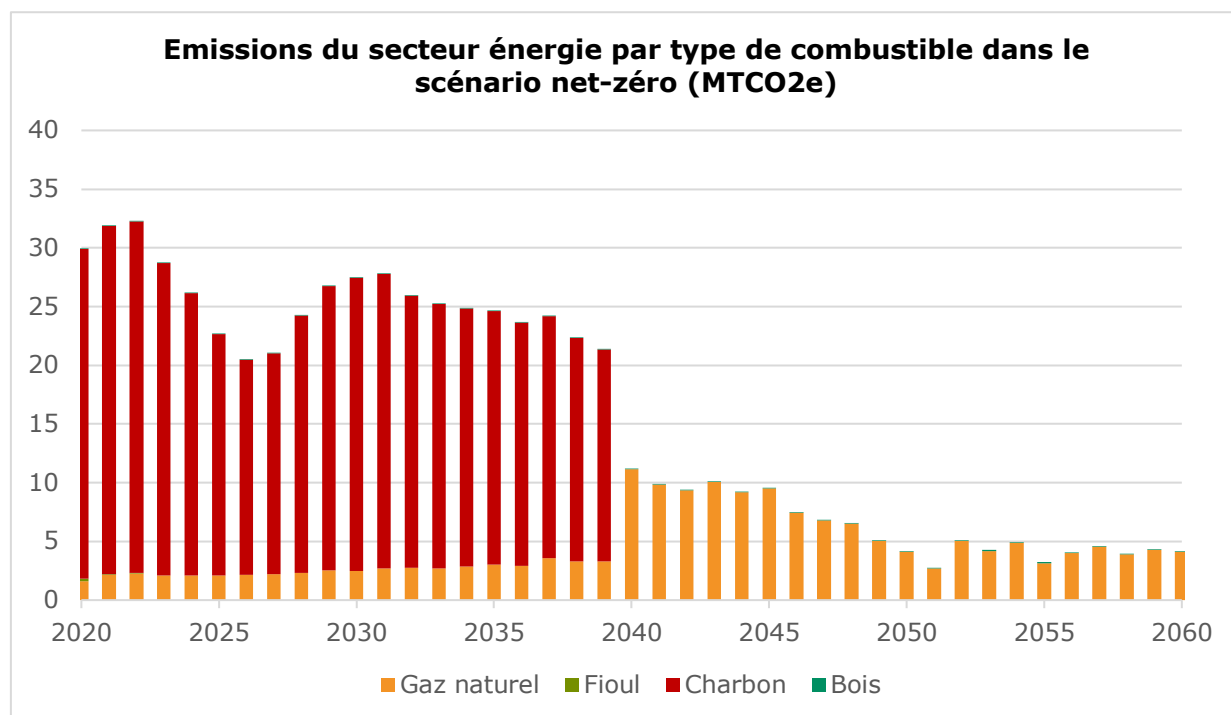


Tableau 10 Émissions du secteur énergie par type de combustible dans le scénario net-zéro (MTCO₂e)

	2020	2030	2040	2050	TCAM (2020- 2050)	2060
Gaz naturel	1,6	2,5	11,2	4,1	3,2%	4,1
Fioul	0,2	0,0	0,0	0,0	-100,0%	0,0
Charbon	28,1	25,0	0,0	0,0	-100,0%	0,0
Bois	0,0	0,0	0,0	0,1	4,0%	0,1
Émissions totales (net- zéro)	29,9	27,5	11,2	4,2	-6,4%	4,2
Émissions totales (référence)	29,9	32,2	23,9	3,1	-7,2%	1,5

4. Mesures à implémenter pour atteindre le scénario Net Zéro dans le secteur de l'énergie

4.1. Ajout de nouvelles capacités de production d'électricité

Atteindre le scénario net-zéro nécessite de fournir un effort considérable d'investissement en nouvelles capacités de production. Ces besoins en nouvelles capacités de production doivent couvrir à la fois la hausse de la demande d'électricité mais également les retraits de capacités arrivées en fin de vie.

L'effort à réaliser sur la période 2020-2049 dans le scénario net-zéro correspond à 111 GW de nouvelles capacités dont 36 GW en éolien, 46 GW en solaire, plus de 12 GW en centrales au gaz naturel (OCGT et CCGT) et plus de 17 GW en STEP et batteries de stockage. Les investissements à réaliser par décennie et par technologie sont détaillés dans le tableau suivant.

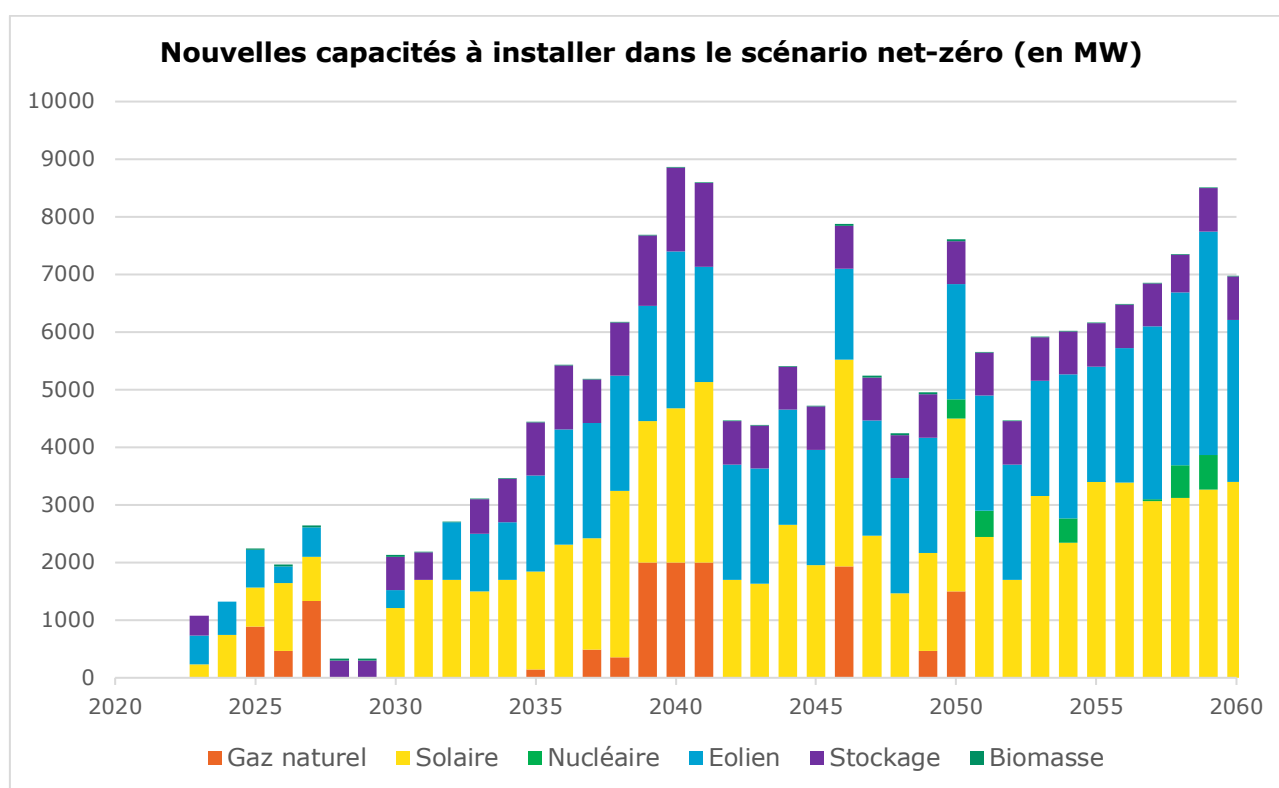
Tableau 11 Nouvelles capacités à installer par technologie et par décennie dans le scénario net-zéro (en MW)

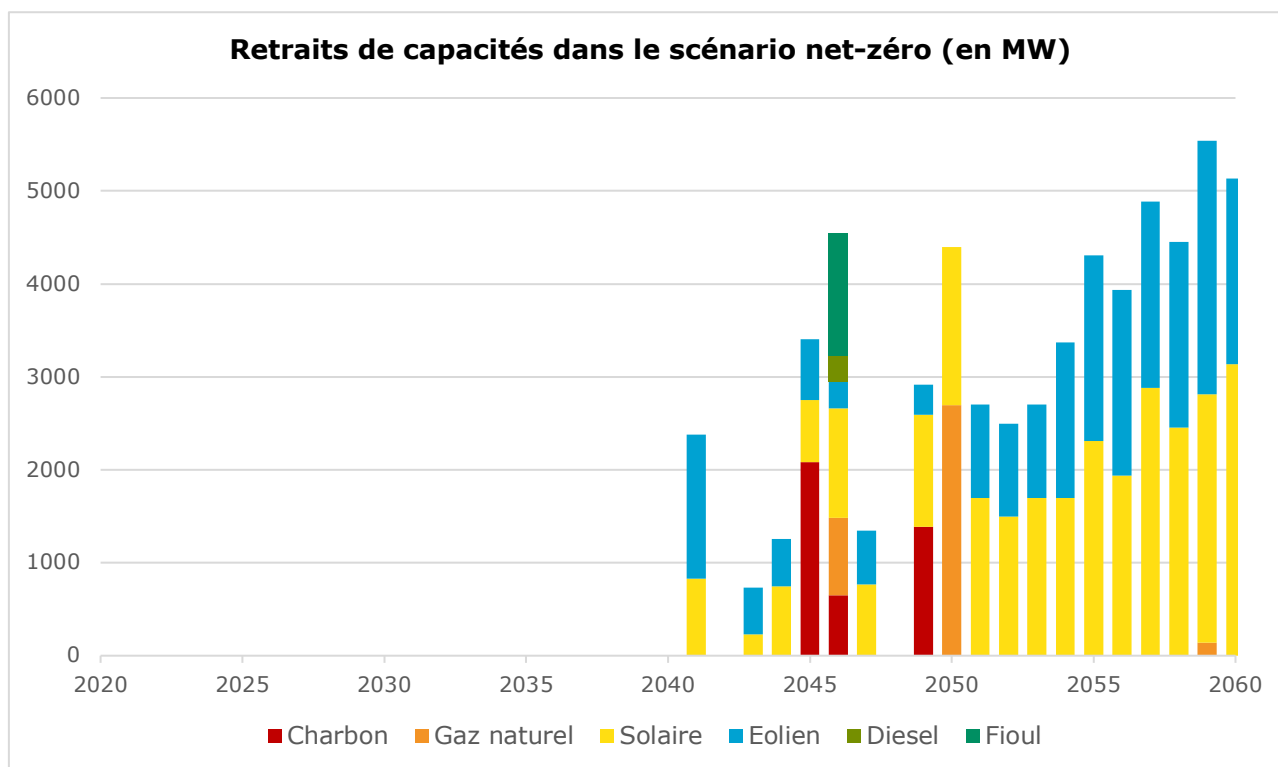
	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2050	2050-60
Gaz naturel	2 698	2 987	6 403	12 088	1 496
Nucléaire	0	0	0	0	2 400
Solaire	3 588	19 088	22 964	45 640	32 295
Éolien	2 535	12 988	20 305	35 828	27 524
Stockage	950	7 339	8 900	17 189	8 156
Biomasse	147	30	140	317	32
Total Scénario net-zéro	9 918	42 433	58 711	111 062	71 903
Total Scénario Référence	9 771	20 162	36 729	66 661	37 709

L'effort à réaliser sur la décennie 2030-2039 est justifié par la hausse attendue de la demande. L'effort à réaliser sur la décennie 2040-2049 est particulièrement soutenu en raison de la poursuite de la hausse de la demande mais également de l'arrivée en fin de vie de 16,6 GW.

Tableau 12 Capacités à décommissionner par technologie et par décennie dans le scénario Net-Zéro (en MW)

	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2049	2050-60
Charbon	0	0	-4 116	-4 116	0
Gaz naturel	0	0	-834	-3 673	-2 839
Solaire	0	0	-5 623	-29 311	-23 688
Éolien	0	0	-4 404	-21 803	-17 399
Diesel et fioul	0	0	-1 597	-1 597	0
Total Net-Zéro	0	0	-16 573	-60 499	-43 926
Total Scénario Référence	0	0	-18 265	-37 820	-19 554

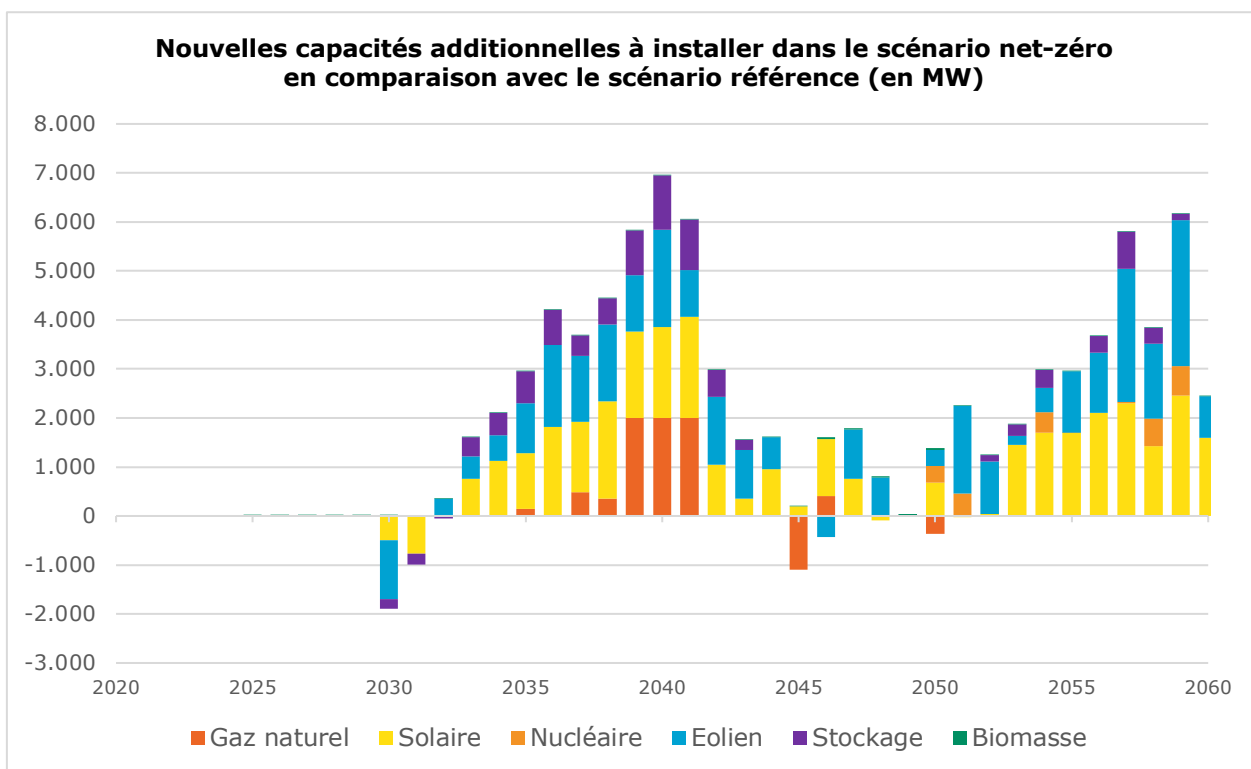




Si l'on compare le scénario net-zéro avec le scénario de référence, les capacités additionnelles à installer s'élèvent à environ 22 GW sur les deux décennies 2030 et 2040. Rappelons que la puissance totale installée en 2020 s'élève à 10,8 GW.

Tableau 13 Nouvelles capacités additionnelles à installer par technologie et par décennie dans le scénario net-zéro par rapport au scénario de référence (en MW)

	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2049	2050-60
Gaz naturel	0	2 987	3 319	6 306	-361
Nucléaire	0	0	0	0	2 400
Solaire	0	8 770	8 293	17 063	15 431
Éolien	0	6 911	7 347	14 257	14 426
Stockage	0	3 574	2 884	6 458	2 265
Biomasse	147	30	140	317	32
Total	147	22 272	21 983	44 401	34 194



4.2. Coûts d'investissement relatifs aux nouvelles capacités de production d'électricité

Les coûts d'investissement à prévoir pour la mise en place des nouvelles capacités de production d'électricité nécessaires à l'atteinte du net-zéro, y compris le stockage, sont estimés à plus de 83 milliards de dollars 2020 réels sur la période 2021-2049. Cela correspond en moyenne à 1,31% du PIB marocain sur la même période. On peut remarquer que dans le scénario de référence, l'effort à réaliser correspond à 1,17% du PIB marocain.

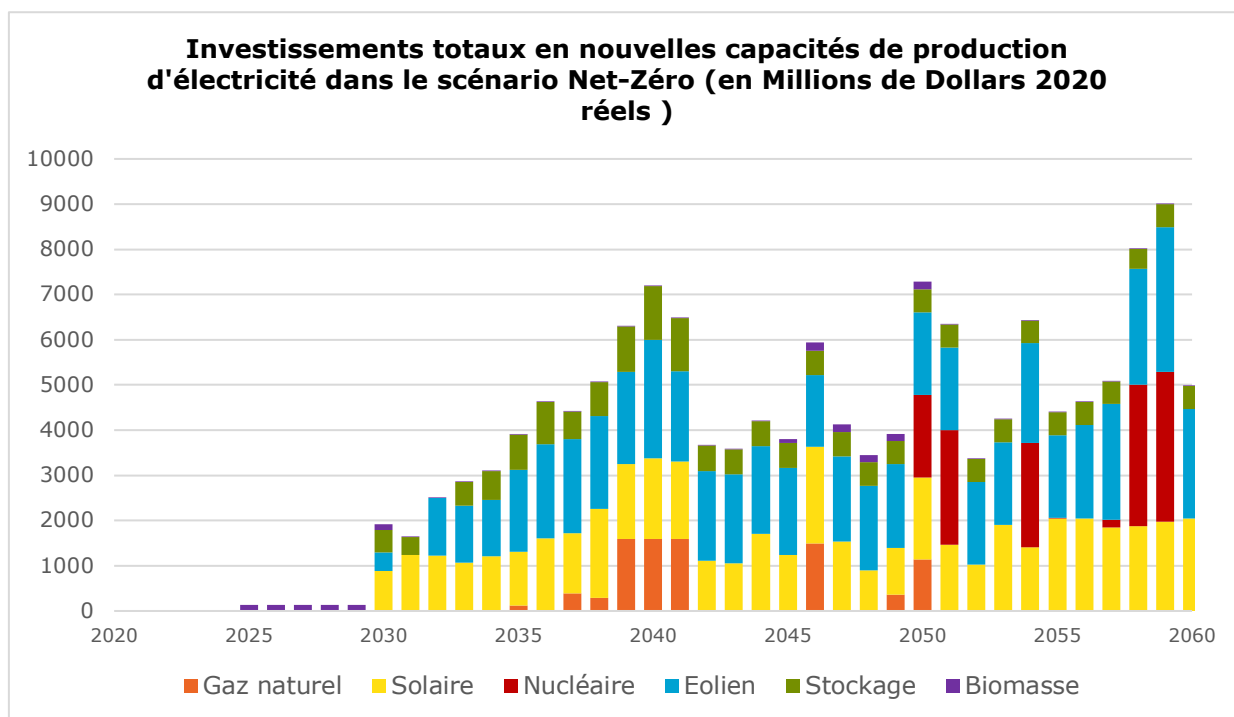
Ces chiffres n'incluent ni les coûts d'investissement dans le réseau de transport et de distribution d'électricité ni les coûts d'investissement dans les infrastructures d'approvisionnement en gaz naturel ou en hydrogène. Les coûts d'investissements pour la production d'hydrogène sont présentés dans la section suivante.

Tableau 14 Coûts d'investissement décennaux nécessaires à la mise en place de nouvelles capacités de production d'électricité dans le scénario net-zéro (en Millions de Dollars 2020 réels)

	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2050	2050-60
Gaz naturel	0	2 394	5 036	7 430	1 143
Nucléaire	0	0	0	0	13 279
Solaire	0	13 379	14 252	27 632	19 474
Eolien	0	14 245	19 607	33 852	24 181
Stockage	0	6 131	6 694	12 825	5 473
Biomasse	658	135	778	1 572	179
Total Net-Zéro	658	36 284	46 367	83 309	63 729
<i>Total Scénario Référence</i>	<i>0</i>	<i>17 438</i>	<i>29 087</i>	<i>74 690</i>	<i>28 164</i>

Tableau 15 Coûts d'investissement décennaux additionnels nécessaires à la mise en place de nouvelles capacités de production d'électricité dans le scénario net-zéro par rapport au scénario de Référence (en Millions de Dollars 2020 réels)

	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2050	2050-60
Gaz naturel	0	2 394	2 645	5 039	-275
Nucléaire	0	0	0	0	13 279
Solaire	0	6 019	5 406	11 425	9 305
Éolien	0	7 323	6 114	13 437	11 558
Stockage	0	2 975	2 336	5 311	1 520
Biomasse	658	135	778	1 572	179
Total	658	18 846	17 280	36 784	35 566



4.1. Coûts d'investissement relatifs à la production d'hydrogène vert

Les coûts d'investissement à prévoir pour la mise en place des nouvelles capacités de production d'hydrogène vert sont estimés à plus de 187 milliards de dollars 2020 réels sur la période 2021-2049¹⁹. Cela correspond en moyenne à 2,94% du PIB marocain sur la même période. Cette évaluation est basée sur le scénario « optimiste » de la feuille de route hydrogène vert du Maroc publiée en 2021.

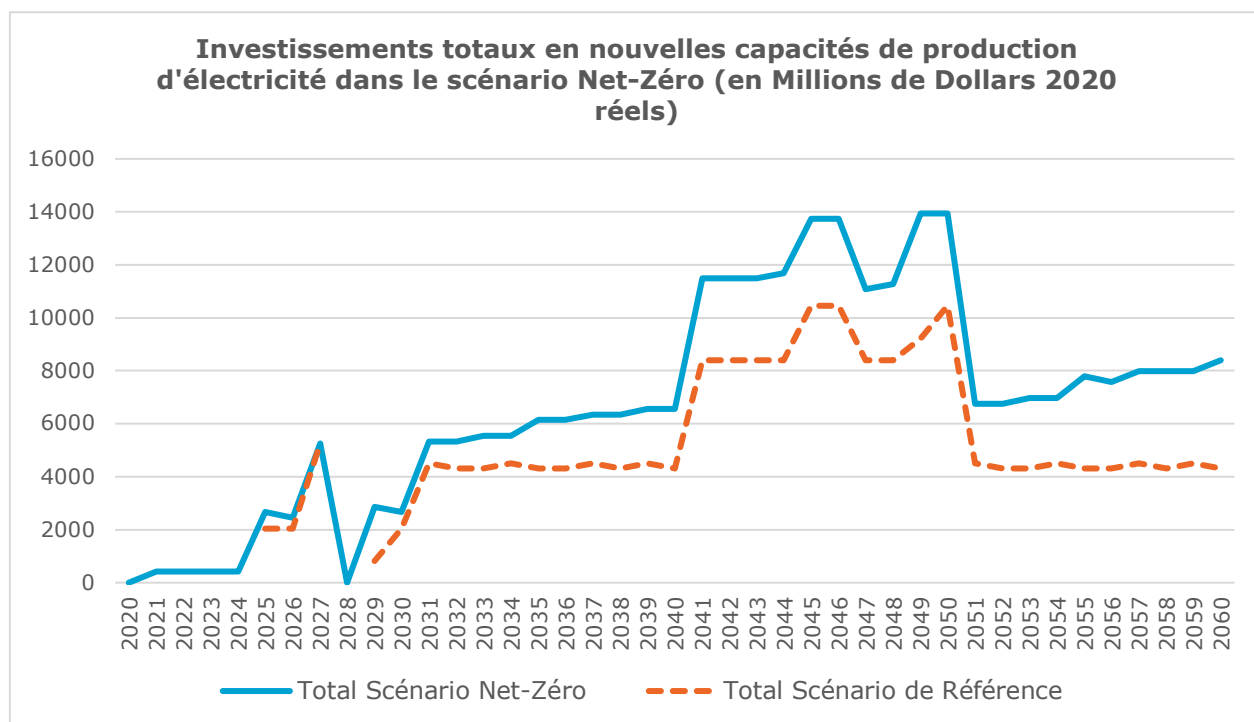
Tableau 16 Coûts d'investissement décennaux nécessaires à la mise en place de capacité de production d'hydrogène vert dans le scénario net-zéro (en Millions de Dollars 2020 réels)

	2020-29	2030-39	2040-49	Total 2020-2050	2050-60
Total Net-Zéro	14 891	55 965	116 440	187 296	89 175

La feuille de route prévoit qu'une partie très importante de la production d'hydrogène vert sera destinée à l'export (75% des volumes produits en 2050). Les coûts présentés ci-dessous correspondent donc à la mise en place d'une industrie de

¹⁹ Les coûts sont évalués sur la base des hypothèses suivantes : électrolyseurs d'une efficacité de 62% (« Power to Hydrogen »), panneaux solaire PV d'une efficacité de 20% et disponibilité maximale comprise entre 20 % et 30%. En termes de coûts complets (CAPEX + OPEX), la solution PV est plus compétitive que l'éolien ou un mix « éolien + PV ».

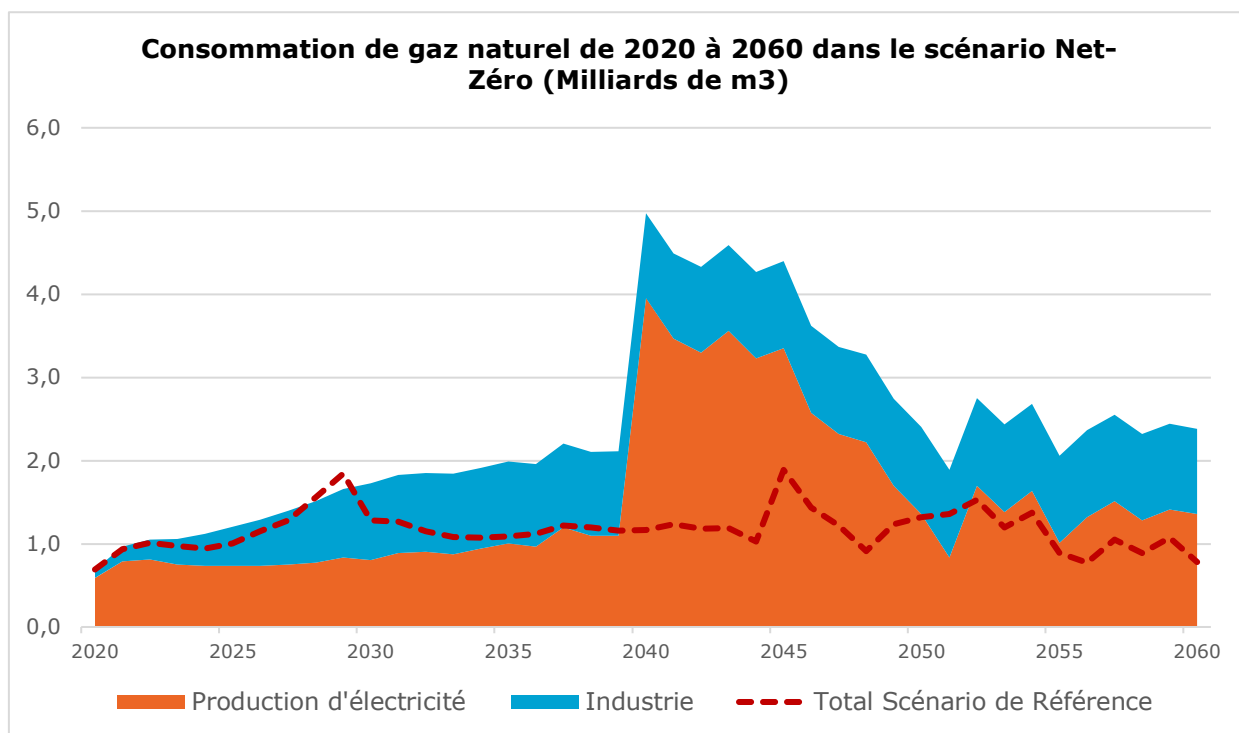
l'hydrogène qui va bien au-delà de la satisfaction des besoins du Maroc en hydrogène vert.



4.2. Volumes de gaz naturel à approvisionner

Le scénario net-zéro implique d'augmenter de manière significative le recours au gaz naturel dans la production d'électricité mais aussi dans l'industrie. La consommation totale de gaz atteindrait un pic en 2040 avec 5,0 milliards de m³ de gaz naturel à approvisionner contre 0,7 en 2020 (multiplication par 7). La quasi-totalité de ce volume de gaz sera à importer en l'absence de perspectives claires de montée en puissance de la production nationale marocaine.

Cela implique la mise en place d'infrastructure gazières additionnelles d'importation (gazoducs internationaux, terminal GNL) mais aussi de transport (gazoducs nationaux vers les centrales au gaz ou vers les centres industriels).



Le recours à l'hydrogène vert pour équilibrer le réseau pourrait être envisagé. Cela viendrait réduire les volumes de gaz naturel à approvisionner mentionnés ci-dessus.

Compte tenu de ses capacités excédentaires attendues de production d'hydrogène vert, le Maroc pourrait allouer une partie des volumes prévus pour l'export vers la production électrique à des fins d'équilibrage. Il pourrait de ce point de vue être judicieux de considérer la mise en place de centrales gaz pouvant fonctionner à l'hydrogène²⁰. On peut noter le scénario net-zéro n'a pas besoin de cette technologie pour décarboner le secteur électrique.

4.3. Empreinte spatiale de la production d'électricité dans le scénario net-zéro

Le recours massif aux énergies renouvelables dans le scénario net-zéro aura nécessairement un impact sur l'emprise au sol (et en mer) des infrastructures énergétiques. En effet, les énergies renouvelables telles que le solaire PV et l'éolien ont typiquement une densité énergétique spatiale inférieure à celle des centrales thermiques.

Une estimation de l'emprise au sol des nouvelles capacité de production installées dans le scénario net-zéro est donnée dans le tableau suivant. Les valeurs types

²⁰ Cette hypothèse est proposée à titre d'exemple mais n'a pas fait l'objet d'une modélisation dans le scénario net-zéro. Compte tenu du caractère incertain du développement massif de l'industrie de l'hydrogène vert à l'échelle mondiale, cette option reste largement de nature prospective. Les travaux futurs pourront explorer cette hypothèse et notamment la comparer avec une solution basée sur des piles à combustible hydrogène.

données pour l'emprise au sol en W/m² incluent la surface occupée par les infrastructures électriques elles-mêmes ainsi que les espaces réglementés autour ou entre les infrastructures électriques.

Tableau 16 Emprise au sol des nouvelles capacités de production dans le scénario net-zéro

	W/m ² ²¹	GW 2020	GW 2060	km ² 2020	km ² 2060	% de la surface totale du Maroc ²²
Biomasse	0,1	0	0,3	0	4 363	0,6
Éolien	1,5	1,6	45,1	1 074	30 268	4,3
Gaz naturel	350,0	0,8	14,4	2	41	0,0
Nucléaire	587,0	0	2,4	0	4	0,0
Solaire CSP	14,5	0,5	0,7	35	48	0,0
Solaire PV²³	9,1	0,3	51,9	33	5 685	0,8
Total	-	3,2	114,8	1 144	40 409	5,7

L'éolien terrestre pourrait représenter une emprise au sol de plus de 30 000 km² en 2060 soit près de 4,3% de la superficie totale du Maroc. En comparaison, le solaire PV représente une emprise au sol nettement inférieure en raison de la densité énergétique spatiale supérieure du PV par rapport à l'éolien.

Les résultats obtenus ci-dessus sont à relativiser dans la mesure où il est possible d'envisager une utilisation duale des espaces en particulier pour l'éolien terrestre et le solaire PV (agriculture entre les mâts ou les panneaux, utilisation des panneaux comme ombrières pour parkings automobiles, etc.)

Au total, atteindre le scénario net zéro impliquerait néanmoins de mobiliser directement ou indirectement approximativement 5,7% de la superficie totale du territoire marocain. Il serait utile que cette estimation fasse l'objet d'une analyse plus approfondie et basée sur des valeurs types de densité spatiale et des opportunités d'usages mixtes propres au Maroc.

²¹ Valeurs tirées de l'article « *Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide* » Jonas Kristiansen Nøland, Juliette Auxepaules, Antoine Rousset, Benjamin Perney, Guillaume Falletti. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25341-9>

²² 710 850 km²

²³ Il s'agit des fermes solaires de grande capacité et non du PV décentralisé (résidentiel ou services), évalué dans le Plan sectoriel de décarbonation des bâtiments.

Annexe 1 – Mesures d’atténuation prévues pour le secteur de la transformation d’énergie dans le scénario net-zéro

Source	Mesure	Impacts sur l’énergie / les émissions modélisés	Coûts modélisés
ONEE	Plan d’équipement de l’ONEE	Oui	Oui
Feuille de route biomasse	Cogénération à partir de la biomasse Les potentiels du scénario A pour la biomasse du secteur forestier, les potentiels du scénario C pour la biomasse d’autres secteurs	Oui	Oui
Feuille de route hydrogène vert	Feuille de route de l’hydrogène vert (scénario optimiste)	Oui	Oui
LT-LEDS, annonces du gouvernement, analyse LT-LEDS	Objectifs de production d’électricité sans carbone : plus de 52% en 2030, 96% en 2050	Oui	Oui
MTEDD / ONE	Élimination progressive de la production d’électricité à partir de charbon durant la décennie 2040	Oui	Oui
OCP	Décarbonation de l’approvisionnement en électricité de l’OCP	Oui	Oui

Annexe 2 – Programme annuel d'investissement en nouvelles capacités de production d'électricité de 2021 à 2050 dans le scénario net-zéro (en MW)

TYPE	Gaz naturel OCGT	Gaz naturel CCGT	CSP	PV	Éolien	Batteries	STEP	Bio-masse	Nuclé-aire	Total
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023	0	0	0	230	500	0	350	0	0	1 080
2024	0	0	0	743	580	0	0	0	0	1 323
2025	892	0	0	672	655	0	0	1	0	2 220
2026	0	469	190	985	290	0	0	1	0	1 935
2027	720	617	0	768	510	0	0	1	0	2 616
2028	0	0	0	0	0	0	300	1	0	301
2029	0	0	0	0	0	0	300	1	0	301
2030	0	0	0	1 208	319	0	574	1	0	2 103
2031	0	0	0	1 700	0	0	473	0	0	2 173
2032	0	0	0	1 700	1 000	0	0	0	0	2 700
2033	0	0	0	1 497	1 000	607	0	0	0	3 104
2034	0	0	0	1 700	1 000	750	0	0	0	3 450
2035	0	141	0	1 700	1 669	750	170	0	0	4 430
2036	0	0	0	2 306	2 000	750	367	0	0	5 423
2037	0	486	0	1 938	2 000	750	0	0	0	5 174
2038	0	360	0	2 884	2 000	750	171	0	0	6 166
2039	0	2 000	0	2 455	2 000	750	477	0	0	7 682
2040	0	2 000	0	2 672	2 729	750	700	0	0	8 852
2041	0	2 000	530	2 605	2 000	750	700	0	0	8 585
2042	0	0	0	1 700	2 000	750	0	0	0	4 450
2043	0	0	0	1 631	2 000	750	0	0	0	4 382
2044	0	0	0	2 654	2 000	750	0	0	0	5 405
2045	0	0	0	1 955	2 000	750	0	17	0	4 722
2046	0	1 932	190	3 400	1 575	750	0	34	0	7 881
2047	0	0	0	2 463	2 000	750	0	31	0	05 245
2048	0	0	0	1 461	2 000	750	0	29	0	4 241
2049	0	471	0	1 700	2 000	750	0	28	0	4 949
2050	0	1 496	0	3 005	2 000	750	0	32	309	7 592