

LES SCÉNARIOS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE, QUEL IMPACT SUR L'EMPLOI ?

Chloé Raffin

CIRED

Philippe Quirion

CNRS, CIRED

Si la décarbonation de l'électricité constitue un objectif central de la planification énergétique française, les trajectoires possibles demeurent multiples et variées, notamment en ce qui concerne la répartition entre les énergies renouvelables et le nucléaire. Chaque trajectoire a des implications macroéconomiques, en particulier sur l'emploi. Pour traiter ce sujet, cet article analyse l'impact des scénarios de production électrique élaborés par RTE sur l'emploi en France, en utilisant le modèle entrées-sorties TETE et les hypothèses de coût de RTE. Les résultats démontrent que les scénarios qui tendent vers un mix 100 % renouvelable génèrent davantage d'emplois, et nécessitent également des investissements plus importants. Ainsi, le plus faible nombre d'emplois dans le secteur nucléaire y est plus que compensé par la création d'emplois dans les filières renouvelables. Cette dynamique varie selon les régions et certaines devront faire face à des enjeux de réorientation et de formation professionnelle. Enfin, la comparaison avec d'autres études utilisant des méthodes différentes confirme les tendances obtenues.

Mots clés : emploi, transition énergétique, scénario, énergies renouvelables, nucléaire.

Remerciements :

Nous remercions un relecteur anonyme de la *Revue de l'OFCE* ainsi que Vincent Touzé et Gaëlle Leloup pour leurs commentaires avisés qui nous ont permis d'améliorer nettement la rédaction de cet article, les participants au séminaire de discussion de ce travail organisé à RTE par Elie Bellevrat, ainsi que Marie-Alix Dupré la Tour, Mathilde Françon et Simon Mottet pour leur contribution à l'enrichissement de l'outil TETE, utilisé dans cet article.

Les trajectoires envisagées de transition énergétique sont nombreuses et présentent des niveaux d'ambition climatique et des choix technologiques variés. Parmi les nombreux critères étudiés pour décider d'une planification écologique nationale, la création d'emploi est un enjeu fréquemment mobilisé dans le débat public. Cette question des emplois se pose à de multiples échelles – au niveau territorial, de la filière économique, de la catégorie socioprofessionnelle ou de l'individu.

Dans ce contexte, il est intéressant de comparer l'impact des différentes trajectoires de transition énergétique sur l'emploi en France, pays dont le mix électrique repose fortement sur la production nucléaire. La filière nucléaire est spécifique, à la fois dans ses activités et sa temporalité, et le choix d'une trajectoire avec ou sans nucléaire peut entraîner des impacts différents sur l'emploi.

Pour cela, nous comparerons dans cette étude les six scénarios de production électrique publiés en 2021 et 2022 par le Réseau de transport d'électricité (RTE), l'entreprise publique responsable du réseau de transport d'électricité, scénarios qui visent tous à atteindre la neutralité carbone en 2050. Ces trajectoires diffèrent quant à la répartition des technologies utilisées, ainsi que leur distribution sur le territoire. Quel scénario crée le plus d'emplois, et quels sont les coûts ? Quel est le rôle du développement des filières renouvelables et du nucléaire dans ce processus de création d'emplois ? Quelles sont les branches de l'économie, ainsi que les catégories socioprofessionnelles les plus impactées ?

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour étudier l'effet des politiques environnementales sur l'économie et sur l'emploi. Certaines études estiment les emplois créés dans la branche de l'économie directement affectée (les emplois directs), à l'aide de ratios énergétiques comme [Emploi/Production d'électricité], ou [Emploi/Capacité de production] (ADEME, 2024 ; SFEN, 2021 ; Cameron et Van Der Zwaan, 2015) ou monétaires [Emploi/Dépenses]. Au contraire, d'autres études utilisent des modèles macroéconomiques ou d'équilibre général comme Three-ME (ADEME, 2022 ; Callonnec *et al.*, 2016) ou Imacim (Cassen *et al.*, 2018), afin de prendre en compte les rétroactions macroéconomiques. L'outil TETE adopte une méthode intermédiaire en calculant les emplois directs et indirects, c'est-à-dire les emplois

créés dans les branches qui produisent les consommations intermédiaires pour les activités étudiées, à l'aide d'un tableau entrées-sorties. Cependant, il ne prend pas en compte les rétroactions macroéconomiques. Cela constitue une limite, mais qui ne nous semble pas rédhibitoire : Perrier et Quirion (2018) comparent les mécanismes à l'œuvre et les résultats des approches entrées-sorties et d'équilibre général, et concluent que les deux fournissent des résultats sur l'emploi positifs et proches, pour un scénario de développement de l'énergie solaire en France. Par rapport à l'approche entrées-sorties, l'approche en équilibre général inclut à la fois des rétroactions positives et négatives, les deux se compensant approximativement dans le cas de figure testé.

Dans cet article, nous chercherons à répondre à ces questions en quantifiant les emplois directs et indirects générés en France par les six scénarios RTE, à l'aide de l'outil TETE. Cet outil, en accès libre, présente une méthodologie transparente utilisant le tableau entrées-sorties de la comptabilité nationale¹ (Quirion, 2022).

Nous appliquerons également le modèle TETE aux scénarios RTE région par région afin de détailler les dynamiques locales d'emploi. Il sera intéressant de comparer les impacts d'une technologie très localisée, comme le nucléaire, au développement plus diffus des renouvelables.

Dans une première section, nous décrirons la méthodologie utilisée afin de réaliser cette modélisation. Puis, nous détaillerons les résultats obtenus au niveau national (section 2), ainsi qu'au niveau régional (section 3). Pour finir, nous discuterons de la cohérence des estimations obtenues, en les comparant à des études basées sur des méthodes différentes mais portant sur des scénarios proches ou identiques (section 4). Par ailleurs, toutes les hypothèses utilisées pour la modélisation, ainsi que les résultats et les calculs, sont disponibles sur le site <https://zenodo.org/records/12759439>.

1. Il s'agit du TES symétrique en 139 branches pour l'année 2015, réalisé par l'INSEE.

1. Méthodologie

1.1. Cadre d'étude

Cette étude analyse le nombre d'emplois en France créés par les six scénarios de transition énergétique publiés par RTE (2022). Elle étudie les principales filières de production d'électricité, le développement du réseau électrique, ainsi que les capacités de stockage d'énergie en France (schéma 1). Certaines sources de production électrique mineures ou dont les trajectoires sont identiques pour les six scénarios RTE ont été exclues de l'analyse, notamment l'hydraulique et les bio-énergies. Les chiffres fournis n'incluent donc pas tous les emplois qui seraient générés par les scénarios étudiés. La période d'étude s'étend de 2020 à 2050, et prend en compte les infrastructures renouvelables installées depuis 2000, ainsi que l'intégralité du parc nucléaire existant.

Schéma 1. Activités étudiées

Énergies renouvelables	Énergie nucléaire
<ul style="list-style-type: none">– Éolien terrestre– Éolien en mer– Solaire au sol– Solaire sur petite toiture– Solaire sur grande toiture	<ul style="list-style-type: none">– Construction de nouvelles centrales– Fonctionnement des centrales existantes– Prolongation nucléaire– Démantèlement
Énergies fossiles	Stockage, réseau et flexibilité
<ul style="list-style-type: none">– Centrale à gaz fossile	<ul style="list-style-type: none">– Batteries stationnaires– Électrolyse– Réseau électrique français– Centrales décarbonées (gaz de synthèse)

Auteurs.

1.2. Les scénarios RTE

En 2019, RTE (2022) a lancé une vaste étude sur l'évolution du système électrique français intitulée *Futurs énergétiques 2050*. Cette étude présente les transformations nécessaires pour sortir des énergies fossiles et atteindre la neutralité carbone pour la production électrique française d'ici à 2050. Les scénarios ont été élaborés en concertation avec de nombreuses parties prenantes (Veyrenc, 2023). Les paramètres de l'étude sont pour la plupart accessibles et ont été discutés dans des groupes de travail.

L'étude présente six scénarios de production électrique qui permettent d'atteindre la neutralité carbone de l'énergie d'ici à 2050 (schéma 2). Les trois scénarios M0, M1 et M23 prévoient un développement important des capacités renouvelables et une sortie progressive du nucléaire. Au contraire, les scénarios N1, N2 et N03 envisagent la construction de nouveaux réacteurs nucléaires, accompagnés d'un développement des infrastructures renouvelables. Les répartitions des capacités de production électriques prévues par ces scénarios pour 2050 présentent alors de fortes différences. De plus, les scénarios favorisant le développement d'énergies renouvelables nécessitent proportionnellement de plus grandes capacités de production² pour compenser la réduction de la capacité électrique de la filière nucléaire (graphique 1). Ils nécessitent également d'importantes capacités de stockage et de production flexible pour faire face à leur variabilité (graphique 3).

Schéma 2. Principales caractéristiques des scénarios RTE

M0	<ul style="list-style-type: none"> – Sortie du nucléaire en 2050 – Rythme d'installation maximal des EnR – 100 % renouvelable en 2050 	N1	<ul style="list-style-type: none"> – Mise en service de 8 réacteurs nucléaires d'ici 2050 – Grands parcs d'EnR – Nucléaire = 26 % du mix électrique en 2050
M1	<ul style="list-style-type: none"> – Sortie du nucléaire en 2060 – Répartition diffuse des EnR – Principalement la filière photovoltaïque 	N2	<ul style="list-style-type: none"> – Mise en service de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2050 – Installation des EnR plus lente que N1 – Nucléaire = 37 % du mix électrique en 2050
M23	<ul style="list-style-type: none"> – Sortie du nucléaire en 2060 – Grands parcs d'EnR – Principalement la filière éolienne 	N03	<ul style="list-style-type: none"> – Mise en service de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2050 – Prolongation maximale des réacteurs existants – Nucléaire = 50 % du mix électrique en 2050

Auteurs, à partir de RTE (2022).

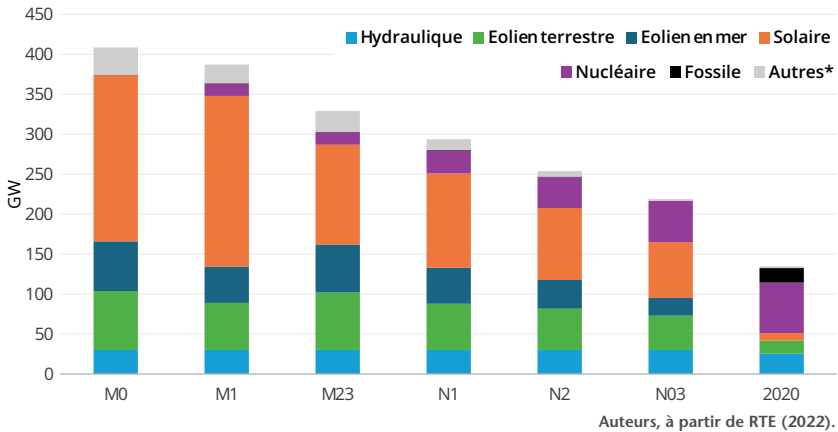
Les six scénarios étudiés ici permettent finalement de générer une production électrique similaire, légèrement supérieure à la consommation d'énergie estimée en 2050 par la trajectoire de référence de RTE (graphique 2).

RTE (2022) a aussi présenté des variantes de ces six scénarios pour des niveaux de demande plus faible (« sobriété renforcée ») et plus élevée (« réindustrialisation profonde ») mais tester ces variantes avec l'outil TETE apporterait peu d'informations pertinentes : comme nous

2. La capacité de production mesure la quantité d'électricité produite par un générateur lorsqu'il fonctionne à plein régime. En comparaison d'un réacteur nucléaire dont le fonctionnement à plein régime est en partie contrôlable, la capacité électrique basée sur l'énergie solaire et l'éolien dépend de facteurs variables (vitesse du vent, ensoleillement), ce qui nécessite le déploiement d'une capacité plus importante que dans le cas du nucléaire pour garantir une production d'électricité donnée.

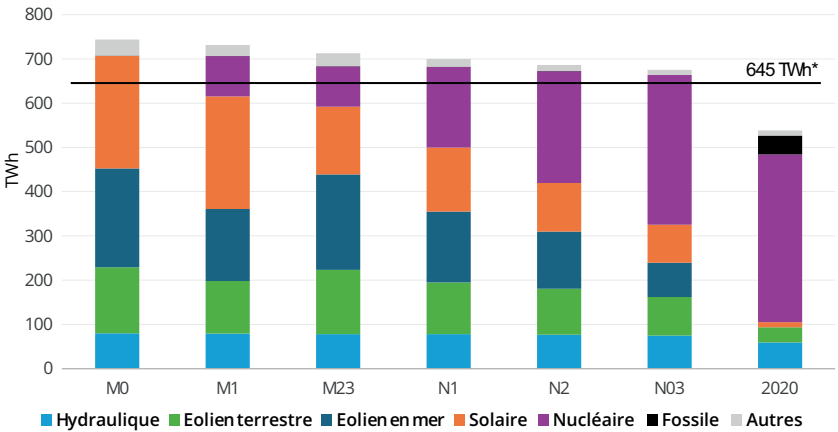
nous limitons au secteur énergétique, par construction, nous aboutissons à moins d’emplois dans la première variante et davantage d’emplois dans la seconde.

Graphique 1. Capacités électriques en 2020 et 2050



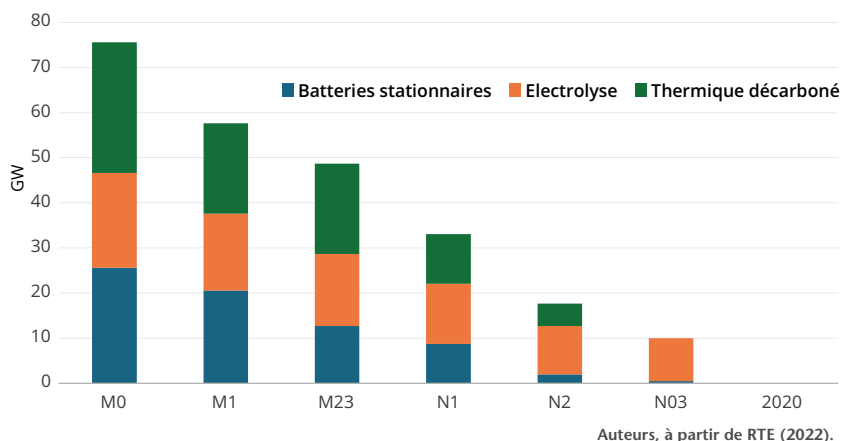
* Autres = hydrogène + bioénergies + énergies marines + déchets.

Graphique 2. Production électrique en 2020 et 2050



* Consommation intérieure d’électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh. Autres = hydrogène + bioénergies + énergies marines + déchets.

Graphique 3. Bouquet de flexibilités en 2020 et 2050



Le rapport *Futurs énergétiques 2050* (RTE, 2022) détaille également la répartition des capacités renouvelables par région métropolitaine, ainsi que la localisation des six prochains réacteurs nucléaires. Ces données nous permettront ainsi d'estimer les emplois des filières renouvelables et nucléaires pour chaque région.

Il est important de noter que ces scénarios RTE ne fournissent pas de quantification monétaire des externalités (conséquences sur la biodiversité, risque d'accident nucléaire...). En revanche, RTE fournit des estimations du coût de ces scénarios et de certaines de leurs conséquences pour l'environnement.

1.3. L'outil TETE

L'impact des scénarios RTE sur l'emploi a été calculé à l'aide de l'outil TETE³, présenté en détail dans un autre article de cette revue (Quirion, 2022). Cet outil permet de calculer l'effet de certaines activités (installation d'infrastructures énergétiques, construction et rénovation de bâtiments, mobilité...) sur l'économie à l'aide du tableau entrées-sorties symétrique en 139 branches, élaboré par l'INSEE.

Dans cette étude, les variables d'entrée sont des indicateurs physiques de capacité énergétique ou de production d'énergie, qui sont ensuite traduits en dépenses monétaires pour chaque activité

3. « Transition Écologique Territoire Emploi ». Développé par l'ADEME et le Réseau Action Climat, cet outil est disponible en libre accès sur le site <https://territoires-emplois.org/>.

énergétique, lesquelles sont décomposées par branche de l'économie. Le taux d'importation moyen de chaque branche permet d'obtenir les dépenses nationales par branche. Le tableau entrées-sorties de la comptabilité nationale est alors appliqué afin de calculer l'impact direct et indirect sur les 139 branches de l'économie. Pour finir, les dépenses nationales de chaque branche de l'économie sont multipliées par leur contenu en emplois (en euros par emploi équivalent temps plein, ETP). Cette méthode permet de calculer les emplois nationaux directs et indirects par branche de l'économie, ainsi que la répartition par catégorie socioprofessionnelle (schéma 3).

L'utilisation d'un modèle basé sur le tableau entrées-sorties de la comptabilité nationale impose des hypothèses assez contraignantes, ce qui constitue la contrepartie de la simplicité et de la transparence de la méthode. En particulier, les branches sont supposées homogènes et les coefficients techniques ne changent pas au cours du temps. En revanche, nous supposons que la productivité du travail croît au rythme de 0,5 % par an, ce qui est proche des tendances récentes (Cette, Corde et Lecat, 2017).

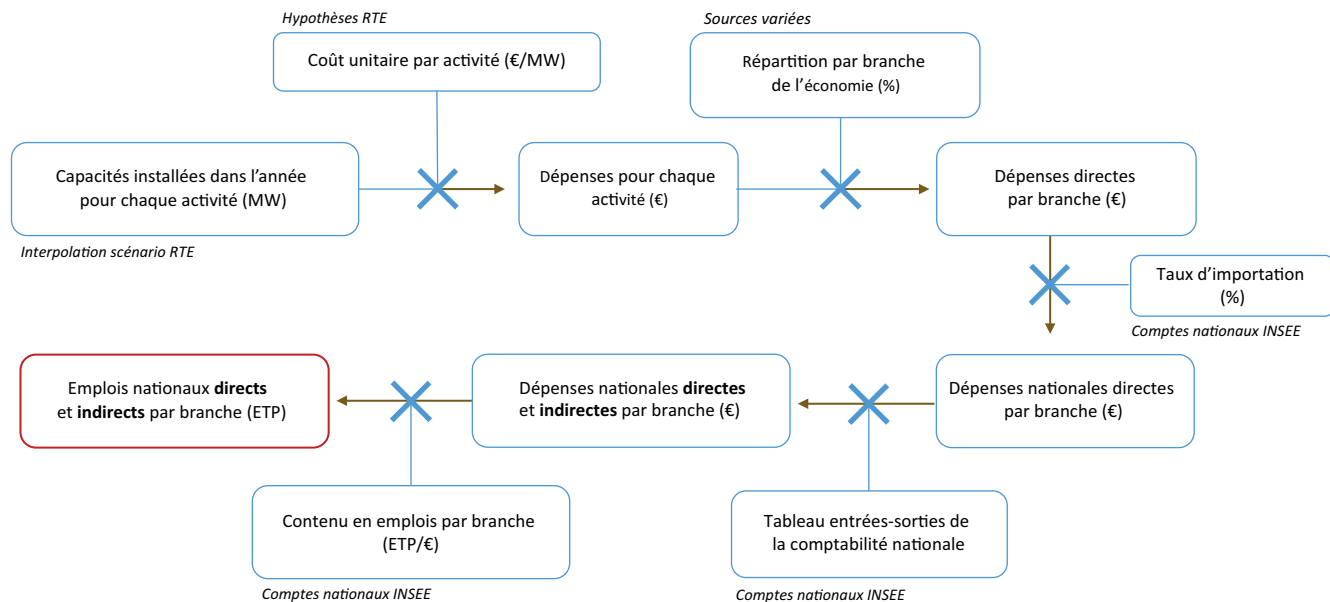
Ce modèle repose également sur l'hypothèse que tous les effets économiques de la transition peuvent être décrits par la matrice de Leontief. Ainsi, nous négligeons les rétroactions macroéconomiques de la transition énergétique. Pour étudier ces effets, les modèles macroéconomiques, tels que ThreeMe ou Imacim, peuvent être utilisés. Dans la discussion, nous comparons nos résultats à ceux obtenus par l'étude de scénarios proches à l'aide du modèle macroéconomique ThreeMe.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs activités ont été ajoutées à l'outil TETE, notamment les centrales thermiques décarbonées et le fonctionnement des centrales nucléaires. Pour cela, nous avons ajouté aux tableaux de la comptabilité nationale une branche de l'économie spécifique à la main-d'œuvre nucléaire, en nous basant sur des estimations de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN, 2021).

Les hypothèses de coûts des technologies ont également été modifiées afin de s'aligner sur les hypothèses de coût du rapport *Futurs énergétiques 2050* (RTE, 2022)⁴, alors que dans la version initiale de l'outil TETE, ces hypothèses se basaient en particulier sur les estimations

4. Certes, ces hypothèses sont critiquables sur plusieurs points importants (Quirion et Shirizadeh, 2022), mais comme elles ont servi de base à l'élaboration des scénarios de RTE que nous évaluons ici, ce choix nous semble plus cohérent.

Schéma 3. Fonctionnement du modèle TETE



Auteurs.

de l'ADEME, qui sont toutefois proches. Conformément à ces hypothèses, les coûts des principales technologies mobilisées (nucléaire, éolien et solaire) diminuent au cours du temps.

1.4. Décomposition des dépenses

Pour étudier dans quelle mesure l'écart d'emploi entre les scénarios provient de ces différences de dépenses, la méthode de décomposition LMDI (*Logarithmic Mean Divisia Index*) a été utilisée. Cette méthode d'analyse de décomposition d'indice logarithmique, développée par B. W. Ang en 2001, permet de quantifier la contribution de différents facteurs aux variations d'une estimation. L'un des principaux avantages de cette décomposition est qu'elle ne laisse pas de terme résiduel, contrairement aux autres méthodes de décomposition largement utilisées (Ang, 2004).

Le nombre d'emplois moyen E sur une période de n années est calculé à partir de la somme des emplois E_i créés chaque année (ETP), obtenus par le produit des dépenses D_i (M€) et du contenu en emploi global CE_i (ETP/M€).

$$E = \frac{1}{n} \sum_i E_i$$

$$E_i = D_i \times CE_i$$

Pour chaque scénario, ΔE représente la différence d'emplois moyenne par rapport au scénario $N03^5$ sur la période 2020-2050. Cette différence s'explique par des effets associés aux dépenses ΔE_D , ainsi que des effets associés aux contenus en emplois ΔE_{CE} .

$$\Delta E = E^{\text{scénario}} - E^{N03} = \Delta E_D + \Delta E_{CE}$$

$$\Delta E_D = \frac{1}{n} \sum_i \frac{E_i^{\text{scénario}} - E_i^{N03}}{\log(E_i^{\text{scénario}}) - \log(E_i^{N03})} \times \log\left(\frac{D_i^{\text{scénario}}}{D_i^{N03}}\right)$$

$$\Delta E_{CE} = \frac{1}{n} \sum_i \frac{E_i^{\text{scénario}} - E_i^{N03}}{\log(E_i^{\text{scénario}}) - \log(E_i^{N03})} \times \log\left(\frac{CE_i^{\text{scénario}}}{CE_i^{N03}}\right)$$

5. Nous avons choisi de comparer les cinq autres scénarios à celui-ci car cela permet de faire apparaître graphiquement l'effet « dépense » avec le même signe pour tous ces scénarios.

2. Résultats au niveau national

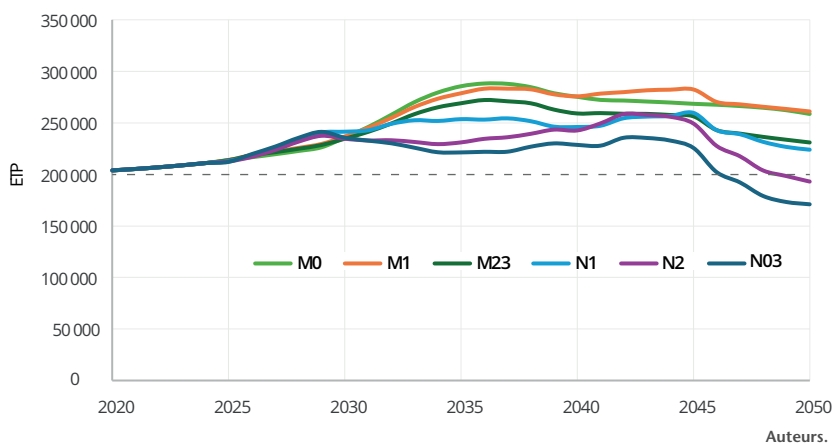
2.1. Davantage d'emplois dans les scénarios qui tendent vers un mix 100 % renouvelable

Les simulations réalisées avec TETE (graphique 4) indiquent que le nombre d'emplois créés par les activités considérées dans notre analyse est important – entre 170 000 et 300 000 ETP selon les scénarios –, sans compter les emplois dans les bioénergies et l'hydroélectricité, dont le développement est identique dans chacun des scénarios. Cela représente une augmentation qui atteint au maximum +40 % (dans les scénarios M0 et M1) par rapport aux 200 000 ETP de 2020.

Les scénarios M, ceux qui recourent le plus à la production électrique renouvelable, créent davantage d'emplois. Les différences sont très marquées à partir de 2030, période avec de nombreuses constructions d'infrastructures. Ainsi, le scénario M0 crée 65 000 emplois de plus que le scénario N03 en 2035 (+30 %), ce qui représente le plus grand écart sur la période d'étude.

Les trajectoires d'emplois se stabilisent à l'horizon 2050 avec entre 28 000 et 58 000 ETP supplémentaires par rapport à 2020 pour les scénarios M et N1, et environ 30 000 ETP de moins pour le scénario N03.

Graphique 4. Emplois liés à la production électrique



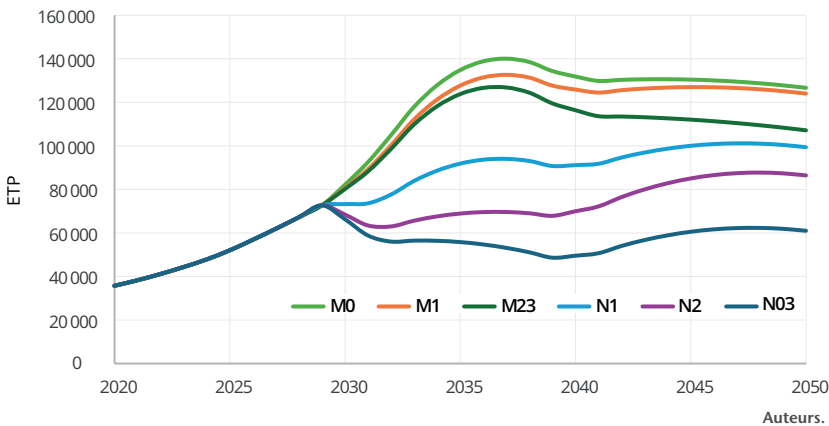
Activités étudiées : production électrique éolienne, solaire, nucléaire, thermique décarbonée et fossile (méthane), ainsi que le réseau électrique et les capacités de stockage par batterie stationnaire et électrolyse. Ces chiffres n'incluent pas les filières de l'hydraulique, des énergies marines et des bioénergies.

Filières renouvelables

Les filières renouvelables sont à l'origine de ces fortes différences entre les scénarios (graphique 5). Pour les scénarios M, qui prévoient un fort développement des productions renouvelables et une fermeture progressive des centrales nucléaires, ces filières créent près de 100 000 ETP de plus qu'en 2020⁶. Soulignons qu'il s'agit là des emplois directs et indirects créés par le développement des énergies renouvelables en France et non des emplois directs dans le secteur des énergies renouvelables, tel qu'il est quantifié aujourd'hui par l'ADEME (2024).

À partir de 2040, les rythmes d'installation des renouvelables se stabilisent, ainsi que les emplois générés par ces filières, avec un volume d'emplois deux fois plus important pour le scénario M0 que pour le scénario N03. Nous remarquons également une légère baisse des emplois entre 2037 et 2040 pour les scénarios M, liée à une réduction du rythme d'installation des capacités renouvelables après le pic de 2035.

Graphique 5. Emplois liés à la transition énergétique pour les filières renouvelables



Activités étudiées : production électrique éolienne et solaire.

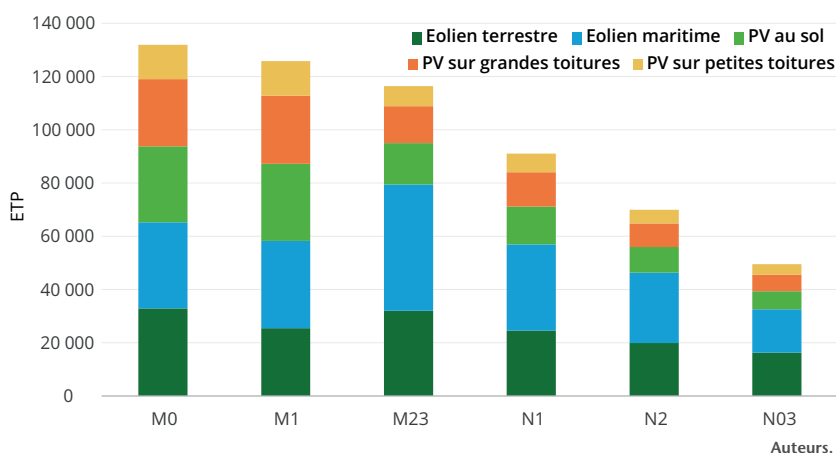
Par ailleurs, en analysant la décomposition des emplois par technologie (graphique 6), nous remarquons que la filière de l'éolien offshore représente une part importante des emplois du renouvelable, en particulier pour le scénario M23 (40 % des emplois du renouvelable en

6. Le maximum est atteint en 2037 par le scénario M0 avec 140 000 emplois dans les filières renouvelables.

2040). Cette part importante, au regard de la part de l'offshore dans le mix électrique (graphique 1), peut s'expliquer par des coûts d'installation relativement élevés, atteignant 2 600 €/kW pour l'éolien offshore posé contre 1 300 €/kW pour l'éolien terrestre en 2020. En effet, de forts coûts d'installation entraînent des dépenses relativement élevées pour l'éolien offshore, et par conséquent, toutes choses égales par ailleurs, un nombre d'emplois créés important.

Remarquons que le cap des 20 000 ETP pour l'éolien en mer est dépassé en 2035 pour tous les scénarios modélisés, à l'exception de N03. Ce résultat est cohérent avec les prévisions de l'Observatoire des énergies de la mer (Fondation OPEN-C et Cluster Maritime Français, 2024), qui estime que les parcs éoliens en mer créeront 20 000 emplois en France en 2035.

Graphique 6. Emplois des filières renouvelables en 2040

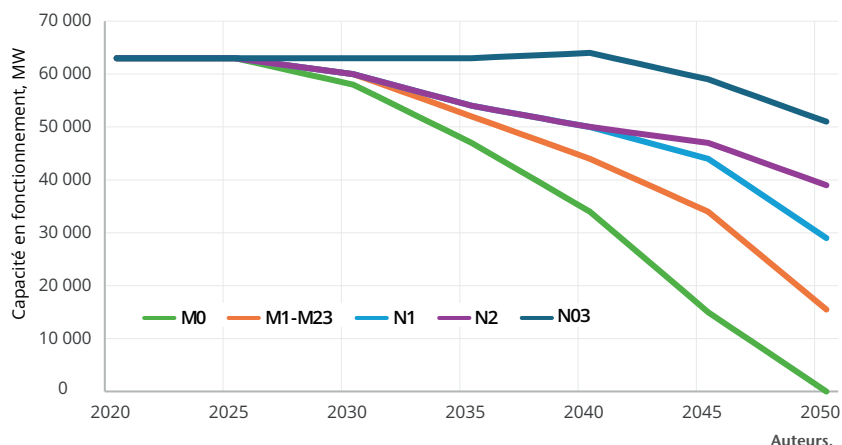


Activités étudiées : production électrique éolienne et solaire.

Filière nucléaire

Tandis que les scénarios M prévoient une sortie progressive du nucléaire, avec une trajectoire d'arrêt accélérée pour M0 (sortie du nucléaire en 2050 contre 2060 pour les deux autres scénarios M ; voir graphique 7), les scénarios N incluent la construction de nouveaux réacteurs. Ainsi, la filière nucléaire crée considérablement plus d'emplois dans les scénarios N, en particulier sur la période 2035-2045, période de construction des nouveaux réacteurs (graphique 8). En 2040, le nucléaire du scénario N03 crée plus de 120 000 ETP, plus de trois fois plus que pour le scénario M0.

Graphique 7. Capacité de nucléaire en fonctionnement

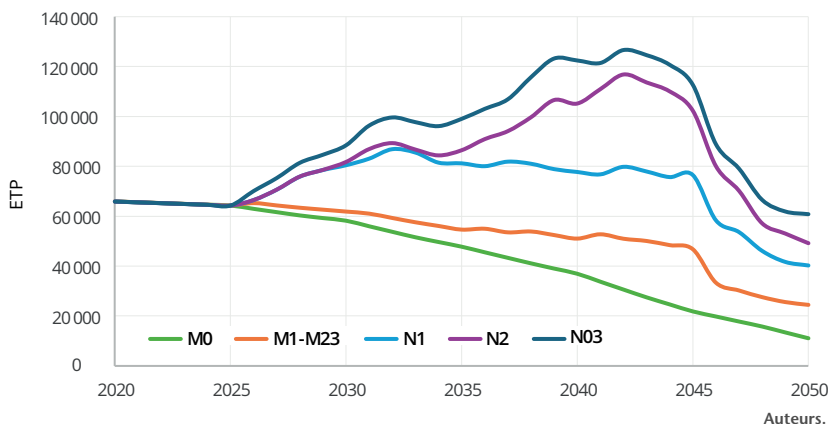


La dynamique de trajectoire des emplois du nucléaire est différente de celle des renouvelables. En effet, tous les scénarios entraînent une réduction d'emplois entre 2020 et 2050. Les scénarios M0 font face à une réduction progressive des emplois de la filière nucléaire. Au contraire, les scénarios N2 et N03 permettent une création massive d'emplois avant 2040, puis le nombre d'emplois décroît fortement. Cette trajectoire soulève des enjeux de réorientation de la main-d'œuvre nucléaire après le pic d'emploi.

Après la phase de construction des nouveaux réacteurs nucléaires, le nombre d'emplois de la filière se stabilise entre 10 000 et 60 000 ETP, en baisse par rapport à 2020. Ainsi, pour tous les scénarios énergétiques, la filière nucléaire fait face à une réduction du nombre d'emplois entre 2020 et 2050.

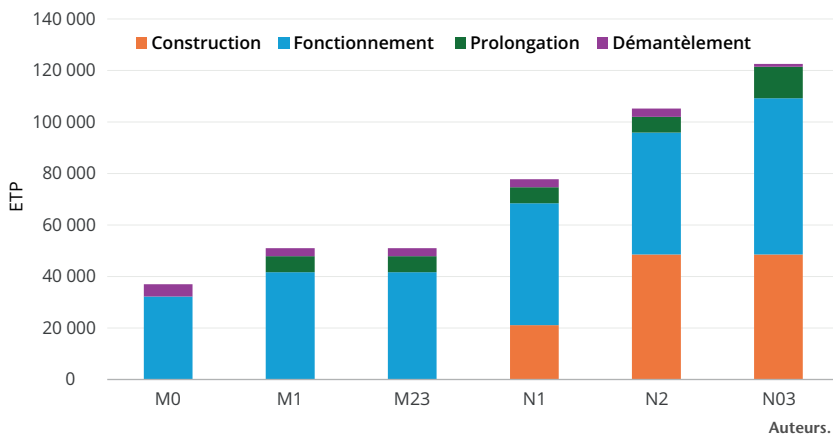
Par ailleurs, la majorité des emplois du nucléaire sont liés au fonctionnement des centrales nucléaires, et même lors de la période de construction des nouveaux réacteurs, le fonctionnement représente près de 50 % des emplois (graphique 9). La réduction des capacités de production nucléaire explique alors en partie les trajectoires d'emplois décroissantes. De plus, quel que soit le scénario, le démantèlement demeure très minoritaire parmi les emplois liés au nucléaire, en tout cas jusqu'en 2040.

Graphique 8. Emplois liés à la transition énergétique pour la filière nucléaire



Activités étudiées : production électrique nucléaire.

Graphique 9. Emplois de la filière nucléaire en 2040



Activités étudiées : production électrique nucléaire.

Encadré 1. L'influence de la réindustrialisation

Le rapport *Futurs énergétiques 2050* de RTE montre qu'une réindustrialisation profonde augmenterait la consommation d'électricité mais permettrait également de réduire l'empreinte carbone française. L'outil TETE permet d'étudier l'influence du taux d'importation sur les estimations d'emplois directs et indirects nationaux, notamment pour la construction des infrastructures renouvelables. Quel serait l'impact économique de la réindustrialisation de la production des équipements pour la production renouvelable ?

Une étude de sensibilité des taux d'importation est réalisée pour le scénario N1. Elle permet d'observer qu'une réduction de 10 points de pourcentage du taux d'importation des équipements renouvelables entraînerait une augmentation de près de 5 % des emplois nationaux dans les filières renouvelables et de 1,5 % des emplois générés par les scénarios, toutes filières confondues.

Ainsi, la réindustrialisation de la production des équipements utilisés dans les infrastructures renouvelables permettrait d'augmenter les emplois nationaux de la transition, mais quantitativement, l'effet reste modéré, rapporté à l'ensemble des emplois générés par le scénario.

2.2. Un impact sur les catégories socioprofessionnelles peu différencié entre scénarios

Les créations d'emplois entre 2020 et 2040 concernent principalement les catégories socioprofessionnelles (CSP) des ouvriers, des professions intermédiaires et des cadres (graphique 10). Par ailleurs, la tendance selon laquelle plus le scénario implique le développement des énergies renouvelables, plus il crée d'emplois, est valable pour toutes les CSP.

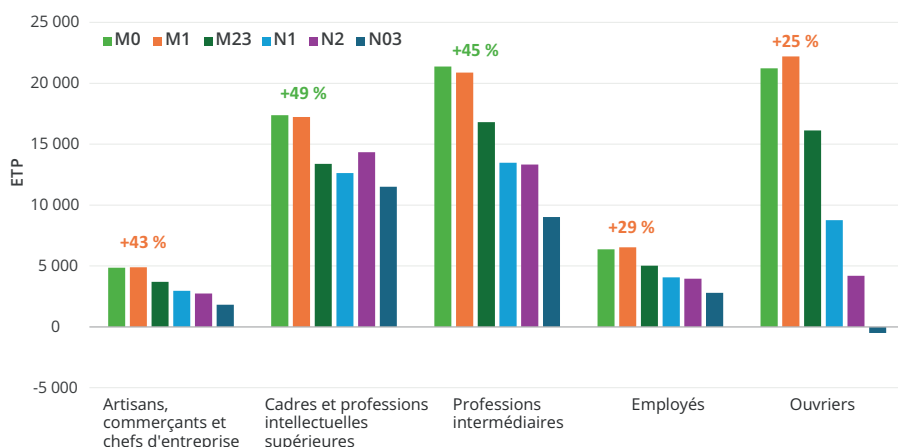
Les dynamiques relatives sont assez similaires pour les différentes CSP, avec une augmentation entre 25 et 50 % pour les scénarios M0 et M1, entre 2020 et 2040. Ces augmentations relatives sont légèrement plus fortes pour les cadres et professions intermédiaires que pour les ouvriers et les employés. Les six scénarios de transition énergétique proposés par RTE modifieraient ainsi légèrement la répartition des emplois de la transition entre les CSP, en faveur des emplois les plus qualifiés.

Les différences entre scénarios sont les plus marquées pour les emplois ouvriers, avec une augmentation de 25 % pour le scénario M1

et une réduction de 1 % du nombre d'emplois entre 2020 et 2040 pour N03. En analysant les niveaux 2 et 3 des CSP, nous remarquons que cet écart concerne surtout les emplois ouvriers industriels, notamment parce que les emplois de réparation et d'installation d'équipements et de génie civil sont très intensifs pour ce type d'emplois – respectivement 30 % et 35 %.

La transition vers la neutralité du système électrique français créera globalement des emplois pour toutes les CSP, à l'exception des ouvriers dans le scénario N03, mais notons que cette augmentation ne modifiera que légèrement la répartition actuelle. Dans le rapport *Métiers en 2030*, Sciberras *et al.* (2022) soulignent des tendances similaires lorsqu'il s'agit de l'intégralité de la transition énergétique – notamment que la création d'emploi sera favorable aux diplômés de l'enseignement supérieur.

Graphique 10. Évolution des emplois par CSP entre 2020 et 2040



Auteurs.

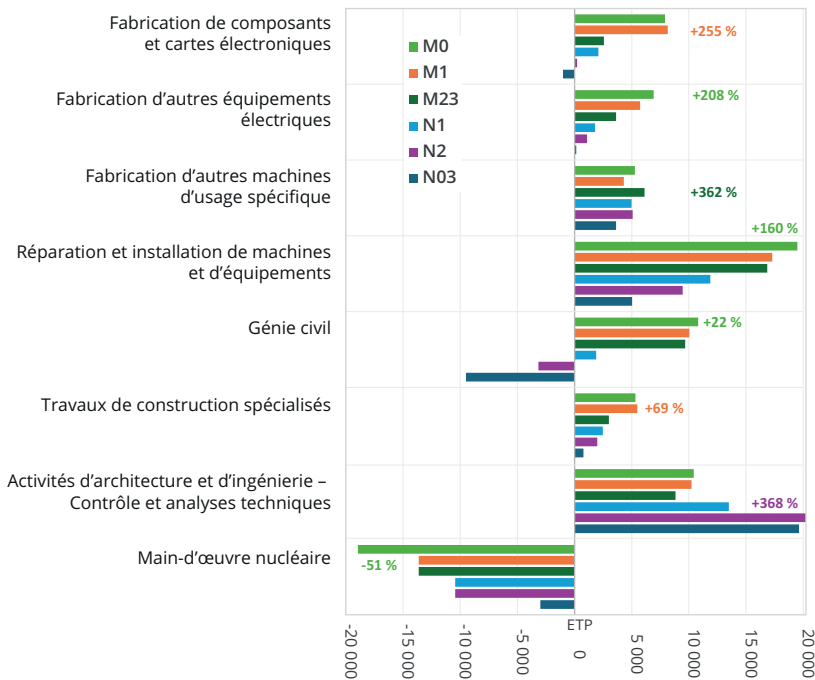
Activités étudiées : production électrique éolienne, solaire, nucléaire, thermique décarbonée et fossile (méthane), ainsi que le réseau électrique et les capacités de stockage par batterie stationnaire et électrolyse. Ces chiffres n'incluent pas les filières de l'hydraulique, des énergies marines et des bioénergies.

2.3. Un impact contrasté entre les branches de l'économie

Les scénarios de transition énergétique de RTE modifient fortement la répartition des emplois entre les 139 branches de l'économie française et les dynamiques observées diffèrent selon les scénarios (graphique 11).

Certaines branches de l'économie sont fortement créatrices d'emplois dans les six scénarios, telles que la branche réparation et installation des machines, ainsi que les activités d'architecture et d'ingénierie. Au contraire, la branche main-d'œuvre du nucléaire voit son nombre d'emplois fortement réduit, en raison de la réduction des capacités de production nucléaire dans tous les scénarios, et de l'hypothèse d'une hausse générale de la productivité du travail.

Graphique 11. Évolution des emplois entre 2020 et 2040 par branche de l'économie



Auteurs.
Activités étudiées : production électrique éolienne, solaire, nucléaire, thermique décarbonée et fossile (méthane), ainsi que le réseau électrique et les capacités de stockage par batterie stationnaire et électrolyse. Ces chiffres n'incluent pas les filières de l'hydraulique, des énergies marines et des bioénergies.

D'autres branches présentent des dynamiques opposées selon les scénarios. Les scénarios avec une large part de renouvelables créent beaucoup d'emplois dans les filières de génie civil et de fabrication de composants électriques, tandis que les scénarios privilégiant la construction de centrales nucléaires détruisent des emplois dans ces branches de l'économie.

Ces dynamiques d'emplois soulèvent des enjeux de formation et de réorientation afin de pourvoir l'ensemble des emplois nécessaires pour réaliser la transition (Tutenuit et Mayol, 2024).

2.4. Dépenses totales

Le fait que les scénarios en faveur des renouvelables (M) créent plus d'emplois que les scénarios nucléaires (N) s'explique-t-il par le fait que les premiers seraient plus coûteux, plus intensifs en emploi (en termes d'emplois créés par euro dépensé), ou par les deux⁷ ? Pour le savoir, nous avons calculé les dépenses totales (investissement et fonctionnement) associées à chacun des scénarios sur la période 2020-2050. Ces dépenses comprennent les investissements, les coûts de fonctionnement ainsi que les coûts de financement de l'investissement. Ces derniers sont calculés en utilisant un taux d'actualisation de 4 % pour toutes les technologies, valeur utilisée dans l'étude *Futurs énergétiques 2050* de RTE (2022), en supposant que les coûts d'investissements sont répartis de manière uniforme pendant la durée de construction. À des fins de comparaison, il est nécessaire de transformer le coût total d'investissement en équivalent de dépense annuelle pendant la durée d'utilisation du générateur, ce qui implique la formule suivante de calcul de l'annuité (Shirizadeh et Quirion, 2020) :

$$\text{annuité} = \frac{DR \times CAPEX (DR \times ct + 1)}{1 - (1 + DR)^{-lt}}$$

où DR est le taux d'actualisation, $CAPEX$ le coût d'investissement *overnight*, ct la durée de construction et lt la durée de vie de chaque technologie.

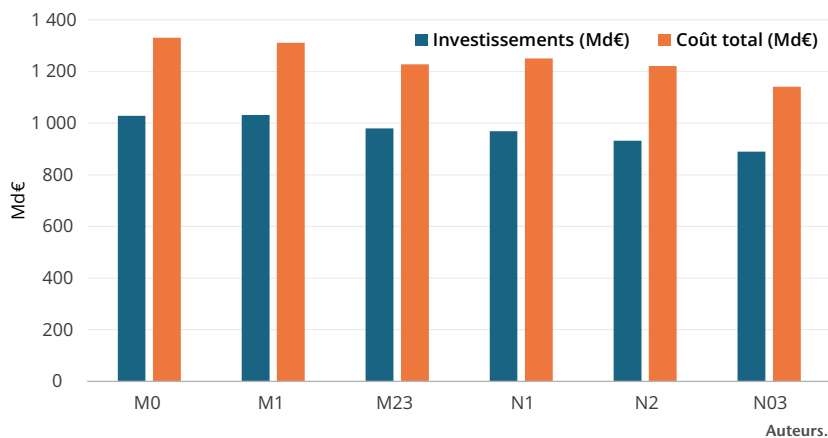
Le graphique 12 compare la dépense d'investissement et le coût total de chaque scénario, incluant le coût du financement. Les scénarios M impliquent des coûts plus importants pour réaliser la transition énergétique, pouvant atteindre près de 200 milliards d'euros de plus que le scénario N03 en coûts cumulés sur la période 2020-2050, soit environ une augmentation de 15 %. Cet écart de 200 milliards d'euros est approximativement celui obtenu par RTE⁸ (2022) pour l'investissement seul, mais sur la période 2020-2060 et hors coût du financement.

7. Perrier et Quirion (2017) présentent les différents facteurs qui expliquent que certaines activités sont plus intensives en emploi que d'autres, ainsi qu'une décomposition de l'écart de contenu en emplois entre branches, en fonction de ces différents facteurs.

8. Dans le rapport *Futurs énergétiques 2050*, RTE calcule une différence de 174 milliards d'euros d'investissement entre le scénario M0 et N03 sur la période 2020-2060.

Cette proximité est logique puisque nous avons retenu les estimations de RTE pour le coût et la durée de vie des différentes technologies. RTE ne fournit pas le coût total cumulé sur la période 2020-2050, mais seulement les coûts annualisés à l'horizon 2060, ce qui ne permet pas de comparer précisément notre évaluation à la leur, mais le classement des scénarios en termes de coût va dans le même sens.

Graphique 12. Investissements et coût total sur la période 2020-2050



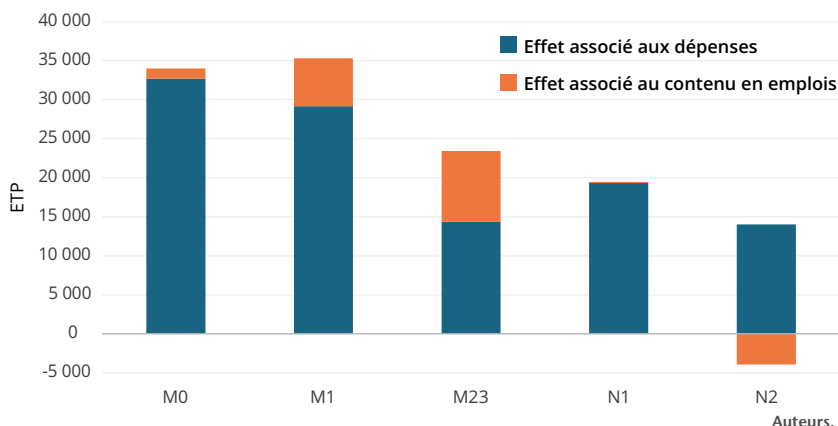
Notes : Le coût total inclut les investissements, le fonctionnement, ainsi que les coûts du financement. Activités étudiées : production électrique éolienne, solaire, nucléaire, thermique décarbonée et fossile (méthane), ainsi que le réseau électrique et les capacités de stockage par batterie stationnaire et électrolyse. Ces chiffres n'incluent pas les filières de l'hydraulique, des énergies marines et des bioénergies.

En s'appuyant sur la décomposition LMDI, il est alors possible d'identifier les effets des dépenses totales et des contenus en emplois dans le nombre total d'emplois (graphique 13).

Ces cinq scénarios nécessitent des dépenses plus élevées que pour le scénario N03, favorisant ainsi la création d'emplois relativement à celui-ci. Ces variations de dépenses entre les scénarios expliquent une part importante des variations d'emplois, jusqu'à 99 % de la différence d'emplois pour N1 et 96 % pour M0.

Par ailleurs, pour les quatre premiers scénarios, le contenu en emplois est plus élevé que dans le scénario N03, et favorise alors la création d'emplois. Au contraire, le contenu en emplois du scénario N2 est plus faible que pour N03, ce qui entraîne une création d'emplois plus faible. Finalement, l'effet des dépenses permet de compenser cette réduction et d'obtenir une création d'environ 10 000 ETP par rapport à N03.

Graphique 13. Différence du nombre d'emplois moyen avec N03



Activités étudiées : production électrique éolienne, solaire, nucléaire, thermique décarbonée et fossile (méthane), ainsi que le réseau électrique et les capacités de stockage par batterie stationnaire et électrolyse. Ces chiffres n'incluent pas les filières de l'hydraulique, des énergies marines et des bioénergies.

Ainsi, l'effet des dépenses est plus important que celui du contenu en emplois pour tous les scénarios. Cependant, le scénario M23 crée plus d'emplois que le N1 bien qu'il soit moins coûteux, ce qui montre que le contenu en emplois est aussi un facteur important pour expliquer les différences dans le nombre d'emplois.

3. Résultats au niveau régional

Quel est l'impact de la transition énergétique sur les emplois par région ? Quelles sont les régions qui profiteront le plus d'une création d'emplois et celles qui devront faire face à une destruction d'emplois ?

Dans cette partie, les estimations d'emplois ont été calculées pour chaque région française, à partir de la localisation prévue par RTE (2022) pour les énergies renouvelables et par EDF pour la construction de six nouveaux réacteurs nucléaires. Nous calculons ici uniquement les emplois liés à la production d'électricité renouvelable et nucléaire. De plus, les résultats se limitent à la période 2020-2040, puisque la localisation des éventuels futurs réacteurs nucléaires est incertaine après 2045.

Les estimations par région ont été réalisées uniquement pour les scénarios M23 et N1, qui nous semblent actuellement les scénarios avec et sans nucléaire dont la réalisation est le plus probable. En effet, le

gouvernement français a réaffirmé la priorité au développement de l'éolien maritime, comme dans M23, tandis que le déploiement de l'éolien terrestre est pour le moment nettement plus lent que dans M0 et M1. En parallèle, le développement du nucléaire a pris du retard depuis la publication des scénarios RTE et le projet Nuward de petit réacteur nucléaire modulaire a « rencontré des difficultés techniques telles qu'il doit être profondément réorienté » (Wajsbrot, 2024), rendant les scénarios N2 et surtout N03 moins vraisemblables.

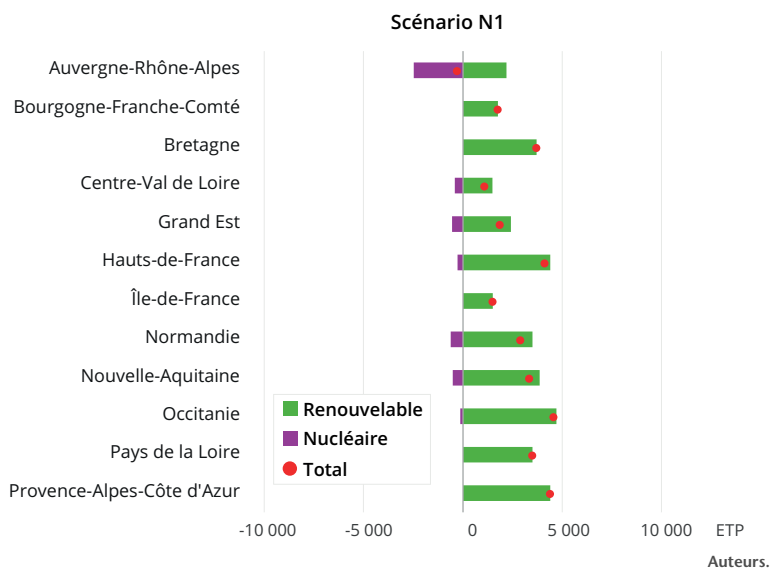
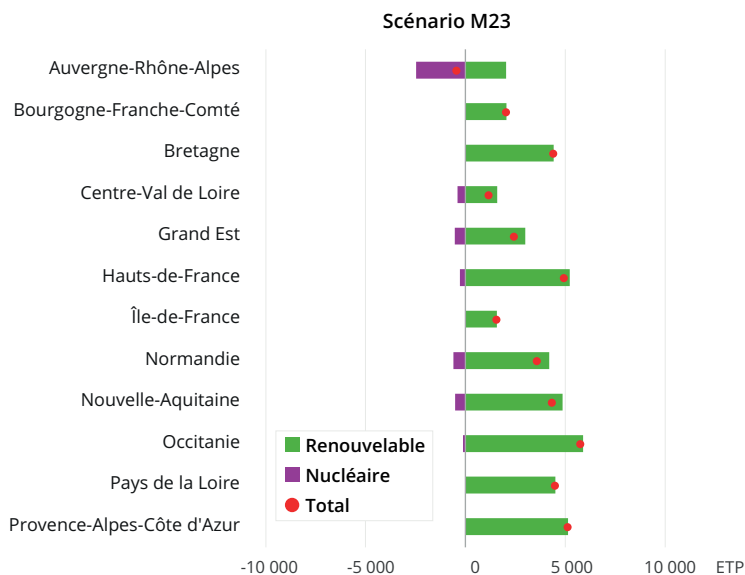
3.1. Comparaison entre régions

Le développement des énergies renouvelables crée des emplois dans toutes les régions françaises, surtout sur la période 2020-2030 avec des augmentations entre 1 500 et 6 000 ETP (graphique 14). Par ailleurs, les emplois du nucléaire ne sont quasiment pas modifiés avant 2030 puisque le parc nucléaire n'évolue que très peu, avec la fermeture, selon nos hypothèses, d'un seul réacteur nucléaire, situé en Auvergne-Rhône-Alpes. Notons également que les différences entre les scénarios sont très faibles avant 2030.

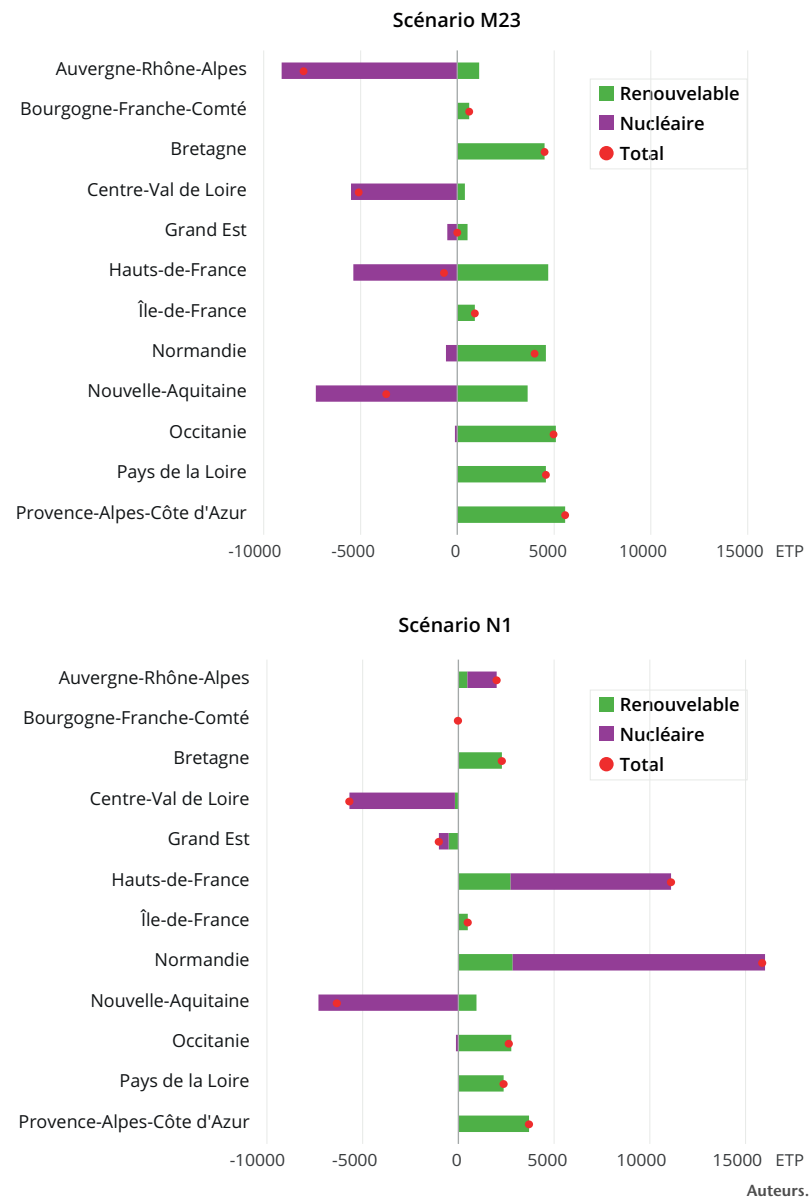
Concernant la période 2030-2040, les différentes régions françaises doivent faire face à des situations variées, selon le scénario choisi (graphique 15). Dans le cas d'un scénario sans construction nucléaire (M23), les régions où auront lieu des fermetures de réacteurs nucléaires, telles que Auvergne-Rhône-Alpes, le Centre-Val de Loire, les Hauts-de-France et la Nouvelle-Aquitaine, devront faire face à une réduction significative d'emplois dans cette filière, pouvant atteindre -9 000 ETP.

Ce phénomène est compensé dans certaines régions par le développement d'énergies renouvelables, comme pour les Hauts-de-France où le bilan est presque nul. Pour les autres régions, l'impact de la transition énergétique sur l'emploi est nettement positif avec une création importante d'emplois liés au développement des filières renouvelables. Pour le scénario N1, la construction des six nouveaux réacteurs nucléaires génère beaucoup d'emplois dans les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Hauts-de-France et Normandie. Cependant, le rythme d'installation des renouvelables étant plus faible, la création d'emplois dans les régions sans nucléaire est inférieure au scénario M23. Ainsi, les emplois sont plus localisés autour des nouveaux réacteurs nucléaires pour ce scénario, ce qui renforce les différences d'emplois entre les régions.

Graphique 14. Évolution des emplois par région entre 2020 et 2030



Graphique 15. Évolution des emplois par région entre 2030 et 2040



Dans la suite de cette étude au niveau régional, nous allons analyser plus en détail les dynamiques d'emplois par CSP dans deux cas spécifiques.

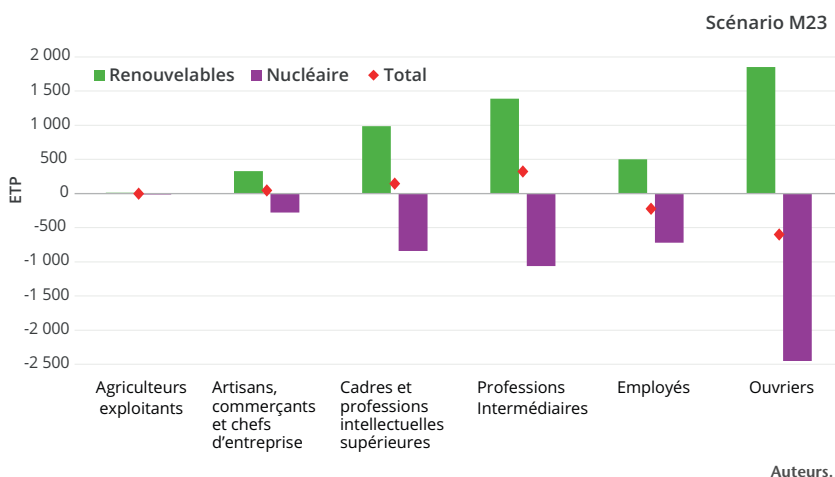
3.2. Cas n° 1 : Hauts-de-France – Scénario M23

La situation des Hauts-de-France dans le scénario M23 permet d'étudier les effets sur les CSP de la compensation des pertes d'emplois du nucléaire par la création d'emplois des renouvelables. Est-ce que les emplois créés sont similaires à ceux détruits par la sortie progressive du nucléaire ?

Globalement, la perte d'emplois dans le nucléaire est compensée par la création dans les renouvelables pour toutes les CSP (graphique 16). Notons tout de même qu'il y a une perte de plus de 500 ETP pour les emplois ouvriers, compensés principalement par des créations d'emplois de professions intermédiaires et de cadres.

Ainsi, les filières de production renouvelable emploient des profils similaires à la filière nucléaire avec une part légèrement inférieure d'ouvriers.

Graphique 16. Évolution des emplois entre 2030 et 2040 en Hauts-de-France



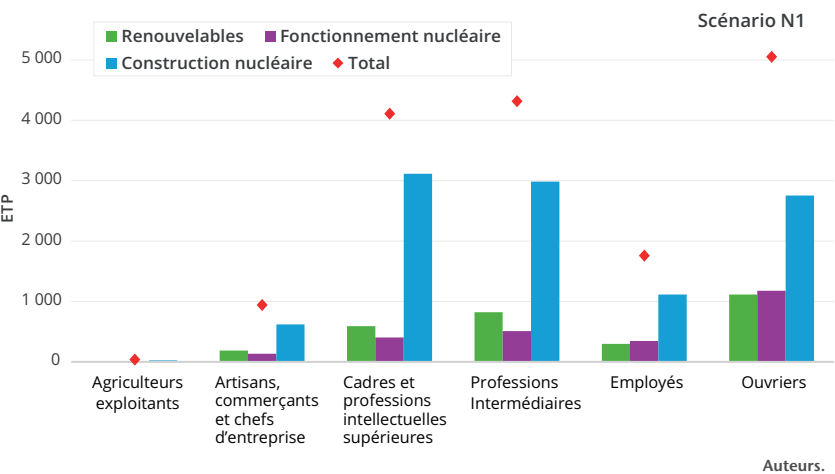
3.3. Cas n° 2 : Normandie – Scénario N1

Dans le scénario N1, la Normandie est la région avec la création d’emplois la plus forte – atteignant plus de 15 000 ETP – principalement grâce à la construction de deux nouveaux réacteurs nucléaires. Ce cas permet d’identifier les CSP dont le volume d’emplois est en plus forte hausse dans un cas de développement des parcs nucléaire et renouvelable (graphique 17).

Les emplois ouvriers sont les plus concernés par la création d’emplois, suivis par les professions intermédiaires ainsi que les cadres et professions intellectuelles supérieures. Ces deux dernières catégories sont principalement dynamisées grâce à la construction des deux nouveaux réacteurs nucléaires. Par ailleurs, l’étude des CSP de niveau 2 permet de montrer que la création d’emplois ouvriers concerne surtout des emplois d’ouvriers qualifiés avec une augmentation de +3 000 ETP entre 2030 et 2040.

Ainsi, les régions avec une dynamique similaire à la Normandie, telles que les Hauts-de-France et l’Auvergne-Rhône-Alpes, bénéficient d’une création d’emplois massive et vont devoir faire face à un enjeu de formation pour subvenir à ces nouveaux besoins en emplois qualifiés en cas de mise en œuvre des scénarios N.

Graphique 17. Évolution des emplois entre 2030 et 2040 en Normandie



4. Discussion

L'outil TETE présente quelques limites, du fait de l'absence de boucle de rétroaction macroéconomique, que l'on retrouve dans les modèles tels que Three-ME (ADEME, 2022 ; Callonnec *et al.*, 2016) ou Imacim (Cassen *et al.*, 2018). De plus, il ne prend pas en compte des changements structurels de l'économie, tels que l'évolution des intensités en énergie et en matière, puisque la structure du tableau entrées-sorties de la comptabilité nationale est figée au cours de la modélisation. Toutefois, les estimations du modèle TETE sont cohérentes avec les résultats obtenus par d'autres études.

De nombreux articles montrent que les énergies renouvelables ont une intensité en emplois plus élevée que les énergies fossiles et le nucléaire, à la fois sur le territoire européen (Fragkos et Paroussos, 2018) et sud-américain (Nasirov *et al.*, 2021). Cependant, les effets induits du développement des énergies renouvelables sont complexes, comme aux États-Unis où le bilan en emplois est différent selon les États (Saboori *et al.*, 2022).

Toutefois, les tendances obtenues entre les scénarios avec et sans nucléaire sont similaires dans les différentes études françaises (tableau 1). Les résultats de la présente modélisation indiquent qu'un scénario sans nucléaire (M23) entraîne la création de plus de 38 000 emplois directs et indirects en 2050 par rapport à un scénario prévoyant la construction de nouveaux réacteurs (N2).

Le feuillet « Macroéconomie » de l'ADEME (2022) détaille l'impact de quatre scénarios de transition prévus pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 sur l'économie, et donc sur la variable emploi, avec deux variantes pour le scénario S3 « Technologies vertes ». Ce dernier est intermédiaire entre le scénario S4, dans lequel l'atteinte de la neutralité climatique repose essentiellement sur des solutions technologiques, et les scénarios S1 et S2, dans lesquels la sobriété joue un rôle très important. Le scénario S3 aboutit ainsi à une consommation d'électricité très proche de celle des scénarios de RTE que nous étudions. Cette évaluation est menée à l'aide du modèle macroéconomique ThreeMe, et prend en compte les emplois directs et indirects. Les résultats indiquent que les variantes S3EnR-offshore et S3Nuc, qui considèrent respectivement un développement massif de la filière éolienne offshore ou la construction de nouveaux réacteurs nucléaires, ont des effets macroéconomiques quasi similaires. Le

scénario S3EnR-offshore crée alors près de 10 000 emplois de plus que S3Nuc en 2050.

L'étude *Mix 100 % renouvelable ?* (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE et ÉNERGIES DEMAIN, 2016), compare également les impacts macroéconomiques d'un scénario 100 % renouvelable et d'un scénario 80 % renouvelable sur l'ensemble de l'économie, toujours à l'aide du modèle ThreeMe. Le scénario 100 % renouvelable crée 30 000 ETP de plus que le scénario 80 % renouvelable en 2050, mais cette étude souligne l'importance de l'acceptabilité des énergies renouvelables.

L'avis de la SFEN (2021) compare les emplois directs générés par les scénarios M23 et N03 à partir du contenu en emplois des technologies. Elle conclut qu'à horizon 2050, le scénario avec une part majoritaire de renouvelables multiplie par six les emplois directs des filières renouvelables, tout en diminuant d'environ 100 000 ETP les emplois du nucléaire. Au total, le scénario sans nouveau nucléaire (M23) crée 60 000 emplois directs de plus (SFEN, 2021). Notre étude indique que, pour ces mêmes scénarios, la différence d'emplois directs est de l'ordre de 22 000 ETP.

Ainsi, ces études menées avec des méthodes très différentes aboutissent qualitativement au même résultat : les scénarios sans nouveau nucléaire créent plus d'emplois que les scénarios avec construction de nouveaux réacteurs nucléaires, mais quantitativement, les écarts sont faibles : l'écart maximal, 62 000 emplois, soit le résultat obtenu par la SFEN, ne représente que 0,2 % de l'emploi total en France.

Tableau 1. Synthèse des résultats pour l'emploi en 2050

	Différence d'emplois entre le scénario sans nucléaire et le scénario avec nucléaire (ETP)
Emplois directs et indirects	
ADEME - Transitions 2050 Comparaison des scénarios S3EnR et S3Nuc	+ 10 000
ADEME – Mix 100 % renouvelable Comparaison des scénarios 100 % et 80 % EnR	+ 30 000
C. Raffin & P. Quirion, 2024 Comparaison des scénarios M23 et N2	+ 38 000
Emplois directs	
SFEN 2021 Comparaison des scénarios M23 et N03	+ 62 000
C. Raffin & P. Quirion, 2024 Comparaison des scénarios M23 et N03	+ 22 000

Auteurs.

5. Conclusion

La transition du système de production électrique français, qui permet d'atteindre une neutralité carbone en 2050, peut générer une création d'emplois importante. La création d'emplois serait plus forte pour les scénarios qui intègrent une part importante d'énergies renouvelables, avec une croissance pouvant atteindre 58 000 ETP entre 2020 et 2050 pour les activités étudiées.

Certaines branches de l'économie sont fortement impactées, et les dynamiques peuvent être différentes selon les scénarios. Par exemple, les emplois dans les activités de réparation et d'installation des machines, d'ingénierie, de génie civil et de fabrication de composants électriques, augmentent fortement dans les scénarios de transition. Elles doivent alors faire face à des enjeux de formation et de réorientation afin de pourvoir tous les emplois. De plus, le nombre d'emplois augmente entre 2020 et 2040 pour toutes les CSP dans presque tous les scénarios, mais leur répartition varie entre les scénarios.

Par ailleurs, cet article montre à l'aide d'une décomposition factorielle (LMDI) que la création d'emplois est fortement liée au coût du scénario. Ce résultat est cohérent : plus il y a d'investissements, plus le scénario déploie d'infrastructures et plus il crée de l'emploi. Toutefois les enjeux d'efficacité se posent alors, puisque les scénarios générant le plus d'emplois sont également les plus coûteux – en tout cas si l'on se base, comme nous le faisons ici, sur les hypothèses centrales de RTE, qui sont bien sûr discutables (Quirion et Shirizadeh, 2022). Néanmoins, le volume d'emplois n'est pas strictement proportionnel à leur coût, et les scénarios qui recourent davantage aux renouvelables présentent un contenu en emplois (en emplois par euro dépensé) légèrement supérieur à ceux qui prévoient le développement de nouvelles centrales nucléaires.

Nous avons également montré que les régions françaises sont impactées très différemment selon la distribution des énergies renouvelables et nucléaire sur le territoire. Les scénarios qui prévoient la construction de nouveaux réacteurs nucléaires génèrent des emplois plus localisés et renforcent alors les différences entre les régions, d'où des enjeux de formation importants.

Cette étude met en lumière la pertinence de l'utilisation de l'outil TETE pour quantifier le nombre d'emplois générés par un scénario, avec une totale transparence qui permet d'étudier les détails par

branches de l'économie et par CSP. La comparaison avec des études françaises utilisant des méthodes différentes permet de confirmer les tendances obtenues.

Références

- ADEME, 2021, *Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans les secteurs du bâtiment, des transports terrestres, des énergies renouvelables*, Angers, ADEME.
- ADEME, 2022, *Feuilleton. Les effets macroéconomiques. Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*, Angers, ADEME.
- ADEME, 2024, *Marchés et emplois concourant à la transition énergétique. Dans les secteurs des énergies renouvelables et de récupération, des transports terrestres et du bâtiment résidentiel*, Angers, ADEME.
- ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE et ÉNERGIES DEMAIN, 2016, *Mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations*, Angers, ADEME.
- Ang B. W., 2004, « Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? », *Energy Policy*, vol. 32, n° 9, pp. 1131-1139, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4).
- Callonnec G., G. Landa Rivera, P. Malliet, A. Saussay et F. Reynès, 2016, « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME : un cahier de variantes », *Revue de l'OFCE*, n° 149, pp. 47-99, <https://doi.org/10.3917/reof.149.0047>.
- Cameron L. et B. Van Der Zwaan, 2015, « Employment factors for wind and solar energy technologies: A literature review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 160-172, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.001>.
- Cassen C., M. Hamdi-Chérif, G. Cotella, J. Toniolo, P. Lombardi et J.-C. Hourcade, 2018, « Low carbon scenarios for Europe: An evaluation of upscaling low carbon experiments », *Sustainability*, vol. 10, n° 3, pp. 848.
- Cette G., S. Corde et R. Lecat, 2017, « Stagnation of productivity in France: A legacy of the crisis or a structural slowdown? », *Économie et Statistique / Economics and Statistics*, n° 494-495-496, pp. 11-38, https://www.persee.fr/doc/estat_0336-1454_2017_num_494_1_10778.
- COMED et Evolen, 2022, *Compétences et métiers des énergies décarbonées. Rapport COMED*, Puteaux, Evolen.
- Cour des comptes, 2020, *L'arrêt et le démantèlement des installations nucléaires. Communication à la commission des finances du Sénat*, Paris, Cour des comptes.

- Fondation OPEN-C et Cluster Maritime Français, 2024, « 8ème édition de l'Observatoire des énergies de la mer. La construction des premiers parcs éoliens en mer bat son plein : 8 300 emplois et près de 3,5 Mds€ générés », communiqué de presse, 26 juin.
- Fragkos P. et L. Paroussos, 2018, « Employment creation in the EU related to renewables expansion », *Applied Energy*, vol. 230, pp. 935-945, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.032>.
- Nasirov S., A. Girard, C. Peña, F. Salazar et F. Simon, 2021, « Expansion of renewable energy in Chile: Analysis of the effects on employment », *Energy*, vol. 226, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120410>.
- Perrier Q. et Quirion P., 2017, « La transition énergétique est-elle favorable aux branches à fort contenu en emploi ? Une analyse input-output pour la France », *Revue d'économie politique*, vol. 127, n° 5, pp. 851-887, <https://doi.org/10.3917/redp.275.0851>.
- Perrier Q. et P. Quirion, 2018, « How shifting investment towards low-carbon sectors impacts employment: Three determinants under scrutiny », *Energy Economics*, vol. 75, pp. 464-483, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.023>.
- Quinet É., 2013, *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Tome 1, Paris, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, <https://www.strategie.gouv.fr/publications/levaluation-socioeconomique-investissements-publics-tome1>.
- Quirion P., 2022, « TETE, un outil en libre accès pour estimer les emplois générés par la transition écologique. Présentation et application au scénario négawatt 2022 », *Revue de l'OFCE*, n° 176, pp. 329-346, <https://doi.org/10.3917/reof.176.0329>.
- Quirion P. et B. Shirizadeh, 2022, « Un nouveau programme électronucléaire est-il justifié pour la France ? », *The Conversation*, 14 avril, <https://theconversation.com/un-nouveau-programme-electronucleaire-est-il-justifie-pour-la-france-178728>.
- RTE, 2022, *Futurs énergétiques 2050. Rapport complet*, février, La Défense, RTE, <https://rte-futursenergetiques2050.com/documents>.
- Saboori B., H. F. Gholipour, E. Rasoulinezhad et O. Ranjbar, 2022, « Renewable energy sources and unemployment rate: Evidence from the US states », *Energy Policy*, vol. 168, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113155>.
- Sciberras J.-C. et al., 2022, *Métiers en 2030. Quels métiers en 2030 ?*, Paris, France Stratégie et Dares.
- SFEN, 2021, « Emplois liés à la production d'électricité par l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables en France. Avis de la Sfen », 1^{er} décembre, <https://www.sfen.org/app/uploads/2021/11/Avis-emploi.pdf>.

- Shirizadeh B. et P. Quirion, 2022, « Do multi-sector energy system optimization models need hourly temporal resolution? A case study with an investment and dispatch model applied to France », *Applied Energy*, vol. 305, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117951>.
- Transitions, In Numeri et Smash, 2019, *Étude d'impact de la filière biogaz sur l'emploi en France de 2018 à 2030*, juillet.
- Tutenuit C. et P. Mayol, 2024, *Mobiliser les acteurs de l'emploi et du travail pour réussir la planification écologique. Avis du Conseil économique, social et environnemental sur proposition des commissions Environnement et Travail et emploi*, Paris, Conseil économique, social et environnemental.
- Veyrenc T., 2023, « Retours sur les Futurs énergétiques 2050 », *Annales des Mines - Responsabilité & environnement*, n° 109, pp. 9-13, <https://doi.org/10.3917/re1.109.0009>.
- Wajsbrot S., 2024, « Mini-réacteur nucléaire : EDF change ses plans pour son projet Nuward », *Les Echos*, 1^{er} juillet.

ANNEXES

A1. Comparaison avec des observations

Les résultats obtenus avec TETE pour l'année 2021 sont assez proches des observations de l'étude *Marchés et emplois* (ADEME, 2021) et de l'Observatoire des énergies de la mer (Fondation OPEN-C et Cluster Maritime Français, 2024) (tableau A1).

L'étude de l'ADEME analyse les investissements et les emplois dans les filières renouvelables des dernières années. Elle ne calcule que les emplois directs liés au développement des infrastructures renouvelables, contrairement au modèle TETE qui mesure également les emplois générés par les activités en amont, et se base sur des hypothèses légèrement différentes concernant les taux d'importation ou les intensités en emplois. Notons également que les emplois générés par les exportations et les emplois dans les départements et régions d'outre-mer sont pris en compte dans l'étude de l'ADEME, et non dans TETE.

Les résultats de l'Observatoire des énergies de la mer ne considèrent aussi que les emplois directs de la filière offshore. Leurs observations sont légèrement supérieures à nos estimations puisqu'ils prennent en compte les emplois liés aux exportations.

Tableau A1. Comparaison des estimations TETE avec les observations de l'ADEME et de l'Observatoire des énergies de la mer

	ADEME Emplois directs en 2021	Observatoire des énergies de la mer Emplois directs 2023	TETE Emplois directs & indirects	Différence
Éolien terrestre	9 100		9 600 (en 2021)	+500
Éolien en mer		8 300	6 800 (en 2023)	-1 500
Photovoltaïque	15 500		9 500 (en 2021)	-6 000

Auteurs.

A2. Estimation des activités non comptabilisées

Cette partie vise à estimer un ordre de grandeur des emplois générés par les activités que nous n'avons pas prises en compte dans l'étude, puisqu'elles étaient communes aux six scénarios ou alors négligeables.

Concernant l'hydraulique, l'étude *Marchés et emplois* (ADEME, 2021) calcule le nombre d'emplois directs dans la filière qui s'élève alors à 13 160 ETP. Les scénarios de RTE prévoient tous le même développement des infrastructures hydrauliques, de 25,5 gigawatts (GW) en 2019 à 30,1 GW en 2050. Le nombre d'emplois de la filière hydraulique ne devrait que peu augmenter sur la période d'étude.

Le développement des bioénergies est également identique dans les six trajectoires RTE, avec une augmentation de 1,6 à 1,9 GW entre 2019 et 2030. Cette catégorie regroupe la biomasse, les déchets, ainsi que le biogaz, qui représente une part importante des emplois, estimée entre 17 000 et 53 000 ETP à horizon 2030 (Transitions, In Numeri et Smash, 2019). Les filières des biocarburants et de la biomasse créeraient également 7 000 ETP et 12 000 ETP (COMED et Evolen, 2022). Soulignons toutefois que seulement une partie de ces énergies est utilisée pour la production d'électricité, le reste sert alors à l'alimentation des moteurs des véhicules et au chauffage au gaz ou au bois.

Les énergies marines, regroupant l'énergie hydrolienne, marémotrice, houlomotrice ou thermique des mers, représentent une part très faible de la production dans les scénarios M et sont absentes des scénarios N.

A3. Détails de méthodologie

Trajectoires d'interpolation

Les trajectoires de développement des différentes activités de production ont été estimées par interpolation polynomiale à partir des capacités en fonctionnement en 2020, 2030, 2040 et 2050. L'interpolation Spline utilisée se base sur la méthode d'interpolation de Hermite, qui assure la continuité de la fonction et de la dérivée, à l'aide de fonctions polynomiales d'ordre 3 par morceaux. Cette méthode permet d'obtenir un rythme d'installation continu pour toutes les trajectoires. Les estimations réalisées prennent en compte le renouvellement des infrastructures qui atteignent leur fin de vie entre 2020-2050.

Répartition de la production photovoltaïque

Afin de décomposer les capacités de production solaire, cette étude considère que les répartitions entre le solaire au sol et sur toiture restent constantes entre 2020 et 2050 pour les six scénarios (tableau A2). Puis, elle s'appuie sur l'hypothèse que la part de production sur petite et grande toiture est la même pour tous les scénarios et égale à la répartition actuelle du parc photovoltaïque français, c'est-à-dire 16 % de solaire sur petite toiture et 84 % sur grande toiture⁹.

Tableau A3-1. Répartition des infrastructures photovoltaïques selon les scénarios

	M0	M1	M23	N1	N2	N03
Solaire au sol	59 %	50 %	64 %	65 %	59 %	58 %
Solaire sur toiture	41 %	50 %	36 %	35 %	41 %	42 %

Auteurs.

Démantèlement des centrales nucléaires

Pour le démantèlement des centrales nucléaires, l'étude s'aligne avec les objectifs fixés par la Loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, qui définit le principe de démantèlement dit « immédiat ». Elle institue une nouvelle procédure permettant d'initier un démantèlement trois ans après l'arrêt définitif de la centrale (Cour des comptes, 2020). Cette modélisation considère alors que le démantèlement des centrales nucléaires débute trois ans après la fin de la production électrique.

9. Sources : RTE (aperçus électriques mensuels) et ENEDIS (données trimestrielles).

Calcul du coût total

Les dépenses totales (en équivalent annuel) sont estimées à l’aide de la formule d’annuité développée par Shirizadeh et Quirion (2022), en supposant que les infrastructures sont construites dans l’année :

annuité = (DR × CAPEX (DR × ct + 1)) / (1 - (1 + DR)^{-lt})

où DR est le taux d’actualisation, que l’on estime à 4,5 % pour toutes les technologies (Quinet, 2013), ct est la durée de construction et lt est la durée de vie de chaque technologie.

Les annuités sont calculées pour tous les investissements annuels des filières éolienne, photovoltaïque, nucléaire, ainsi que pour les batteries stationnaires et les électrolyseurs. Elles sont ensuite cumulées sur la durée de vie des technologies.

Répartition par région

La répartition régionale des infrastructures électriques renouvelables est supposée constante sur la période d’étude.

Tableau A3-2. Répartition des énergies renouvelables par région

	M23			N1		
	Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer
Auvergne-Rhône-Alpes	13 %	4 %	0 %	13 %	7 %	0 %
Bourgogne-Franche-Comté	6 %	10 %	0 %	7 %	9 %	0 %
Bretagne	5 %	7 %	15 %	5 %	9 %	14 %
Centre-Val de Loire	4 %	8 %	0 %	4 %	9 %	0 %
Grand Est	5 %	18 %	0 %	5 %	16 %	0 %
Hauts-de-France	4 %	13 %	16 %	5 %	10 %	18 %
Île-de-France	10 %	3 %	0 %	10 %	3 %	0 %
Normandie	3 %	6 %	16 %	3 %	5 %	18 %
Nouvelle-Aquitaine	15 %	11 %	8 %	14 %	14 %	4 %
Occitanie	11 %	13 %	15 %	11 %	10 %	16 %
Pays de la Loire	6 %	7 %	15 %	5 %	7 %	14 %
Provence-Alpes-Côte d’Azur	18 %	1 %	15 %	18 %	2 %	16 %

Nous prenons en compte dans notre étude les réacteurs français existants, ainsi que les six réacteurs prévus avant 2045. La durée de vie des réacteurs nucléaires est supposée de 50 ans pour les réacteurs de première génération et de 60 ans pour les réacteurs de deuxième génération.

Tableau A3-3. Réacteurs français existants et prévus avant 2045

Région	Listes des réacteurs nucléaires	Capacité MW
Auvergne-Rhône-Alpes	Bugey	3 600
	Bugey (nouveaux réacteurs 2042)	3 340
	Cruas	3 600
	Saint-Alban	2 600
	Tricastin	3 600
Centre-Val de Loire	Belleville	2 600
	Dampierre	3 600
	Saint-Laurent	1 800
Grand Est	Cattenom	5 200
	Chooz-B	2 900
	Nogent	2 600
Hauts-de-France	Gravelines	5 400
	Gravelines (nouveaux réacteurs 2038)	3 340
Normandie	Flamanville	2 600
	Flamanville	1 650
	Paluel	5 200
	Penly	2 600
	Penly (nouveaux réacteurs 2035)	3 340
Nouvelle-Aquitaine	Blayais	3 600
	Chinon-B	3 600
	Civaux	2 900
Occitanie	Golfech	2 600

RTE 2022.

Concernant la construction des réacteurs nucléaires, l'estimation du nombre d'emplois est une moyenne sur les 10 ans de construction qui précèdent la mise en service.

