



MINISTÈRES
AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

TITAN

Un modèle du système énergétique pour
planifier la transition vers la neutralité carbone



CGDD

Auteurs

Jules BOURGUEIL (SEVS)

Olivier DE GUIBERT (SEVS)

Boris LE HIR (SEVS)*

** en poste au CGDD au moment de la rédaction du document.*

CGDD, avril 2025

Coordination éditoriale et maquetage: Laurianne Courtier
Image de couverture générée par IA

Introduction

Le modèle TiTAN (trajectoire des technologies d'abattement vers la neutralité) permet d'identifier les leviers de décarbonation les plus efficaces économiquement pour tendre vers une économie neutre en carbone.

Développé par le Commissariat général au développement durable (CGDD), en partenariat avec la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et France Stratégie, ce modèle est destiné à tous les acteurs de la transition climatique qui s'intéressent à son analyse économique (État, mais aussi *think tanks*, ONG, monde académique ou encore entreprises).

Grâce à une représentation intégrée des secteurs qui composent le système énergétique en France métropolitaine (production d'énergie, bâtiment, transport, industrie) et des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées, ce modèle permet d'éclairer les choix d'investissement à réaliser pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de GES tout en tenant compte de l'interdépendance de ces choix.

TiTAN a vocation à être mobilisé pour l'élaboration de la Stratégie française pour l'énergie et le climat. Il est d'ores et déjà utilisé dans le cadre de l'élaboration de la valeur de l'action pour le climat, un indicateur de référence de l'intensité des efforts à faire pour la décarbonation.

TiTAN sera disponible en accès libre courant 2025.

Comment guider les choix d'investissement vers la neutralité carbone ?



Un impératif : optimiser les coûts de transition

Atteindre la neutralité carbone en 2050 nécessite des investissements d'ampleur avec un coût économique et social important dès la prochaine décennie¹, et qui sera d'autant plus élevé que la transition devra s'accélérer. Maîtriser ce coût est indispensable pour réussir la transition vers une économie bas-carbone. Le modèle TITAN permet d'apporter des éléments de réponse à certaines des questions liées à cet enjeu.

Comment répartir les efforts de réduction des émissions de GES ?

La maîtrise du coût de la transition bas-carbone repose largement sur un partage efficace des efforts entre les secteurs et dans le temps. Elle suppose aussi une bonne répartition entre les options technologiques permettant l'amélioration de l'efficacité énergétique et celles permettant la substitution vers des vecteurs énergétiques décarbonés.

Quel coût minimal les objectifs de décarbonation impliquent-ils ?

La trajectoire technologique économiquement optimale pour atteindre les objectifs donne une

mesure du coût « incompressible » de la transition. Ce coût intègre à la fois les dépenses d'investissement et les dépenses de fonctionnement, qui peuvent être en partie compensées par des économies d'énergie générées par ces investissements ou la maîtrise de la demande.

Quels sont les facteurs qui influencent le plus ces résultats ?

Les choix des investissements à réaliser et leur coût dépendent d'hypothèses sur lesquelles de fortes incertitudes peuvent peser. Par exemple, les perspectives sur les capacités des puits naturels de carbone, sur les prix des énergies fossiles ou encore sur les besoins futurs en services énergétiques jouent un rôle important dans ces prises de décision ainsi que sur le coût global de la transition. Le coût de la transition peut en outre être accru par des contraintes sur le déploiement des technologies. Identifier et quantifier l'impact de ces facteurs est primordial pour s'assurer de la résilience du chemin retenu.



Une approche intégrée du système énergétique français

Pour éclairer sérieusement les choix d'investissement pour la décarbonation, l'évaluation des coûts et des potentiels de chaque option au cas par cas ne suffit pas. Il est indispensable de tenir compte des interactions qui existent entre ces options : par exemple, il n'est possible d'évaluer la pertinence d'une électrification massive des parcs de logements et de véhicules qu'à condition d'en

évaluer l'impact simultané sur la capacité de production électrique décarbonée. Cela implique une approche à la fois cohérente et détaillée du système énergétique, qui est le fondement de TITAN. Cette approche fait aussi de TITAN un cadre pour une évaluation des coûts d'abattement qui tienne compte des effets « système ».

« La compréhension des effets de la transition nécessite d'articuler différents niveaux d'analyse : technique, micro-économique au niveau des sous-secteurs concernés, local parfois, macro-économique pour comprendre les enchaînements d'ensemble, internationale compte tenu des enjeux de compétitivité et de coordination. Il faut continuer à investir dans l'amélioration des outils utilisés pour apprécier les incidences économiques de l'action climatique dans toutes ces dimensions. »

Recommandation 12 du rapport
Pisani-Ferry-Mahfouz

¹ France Stratégie, Les incidences économiques de l'action pour le climat, Rapport de la Commission présidée par Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, 2023



Un modèle centré sur les technologies à déployer

Il existe trois grandes catégories de modèles visant à évaluer les politiques de lutte contre le réchauffement climatique, avec des objectifs différents et complémentaires.

Les modèles d'évaluation intégrée² représentent les rétroactions entre l'activité humaine et le climat, en combinant une modélisation économique simplifiée et une modélisation climatique. Le modèle **DICE** en est un exemple historique. Le modèle Vulcain du CGDD s'inscrit aussi dans cette approche. Ils permettent d'envisager une approche coût-bénéfice de l'action pour le climat à l'échelle mondiale, en mettant en regard le coût de l'action (impact économique des politiques de lutte contre le réchauffement climatique) et le coût de l'absence d'action (impact du réchauffement climatique sur l'économie).

Les modèles macro-économiques (ou *top-down*) se concentrent sur les conséquences économiques des politiques de réduction des émissions de GES. C'est le cas par exemple du modèle **ThreeME**, utilisé par la direction générale du trésor. Ces modèles sont les plus adaptés pour éclairer les choix sur le mix d'instruments de politiques publiques (taxes et subventions notamment) à mettre en place pour déclencher les leviers de décarbonation et pour évaluer les impacts macroéconomiques des politiques de décarbonation.

Les modèles technico-économiques (ou *bottom-up*) se concentrent quant à eux sur la dimension technologique de la décarbonation. Parmi eux, certains s'inscrivent dans une logique coût-efficacité, c'est-à-dire qu'ils ajustent le déploiement des leviers de décarbonation de sorte à atteindre un objectif climatique donné au moindre coût. C'est à cette catégorie que TiTAN appartient, tout comme la famille de modèles **TIMES** de l'IEA-ETSAP dont il est inspiré.

Les frontières entre ces catégories sont en pratique floues, beaucoup de modèles étant hybrides : par exemple, le modèle **ThreeME** intègre quelques modules technico-économiques et le modèle **TIMES** inclut un ajustement de la demande aux prix.

TiTAN s'inscrit lui dans une approche *strictement* technico-économique : **ses choix d'investissement sont entièrement fondés sur le critère « coût technique-efficacité »** et excluent tout comportement endogène des agents. Ainsi, les résultats ne sont pas troublés par des paramètres estimés sur des observations du passé, qui limitent de fait les possibilités d'évolution des comportements. L'intégralité du coût de la transition peut ainsi être décrit sans effet « boîte noire ».

TiTAN répond à la question « Quels sont les moyens à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction des émissions à moindre coût dans un cadre donné ? ».

« En suivant l'approche microfondée [des coûts d'abattement], il convient aussi de considérer les « coûts de système » : ce seront typiquement les coûts d'infrastructure de transport, de distribution et d'équilibrage des réseaux pour les vecteurs énergétiques décarbonés (électricité, gaz biosourcé, hydrogène, etc.). La détermination des coûts de système devra faire l'objet d'approches spécifiques, en l'absence de « valeurs tutélaires » préétablies. »

France Stratégie, *Les coûts d'abattement, Rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, juin 2021.*

² Souvent désignés par leur nom en anglais : *Integrated Assessment Models (IAM)*.

Comment fonctionne le modèle TiTAN ?



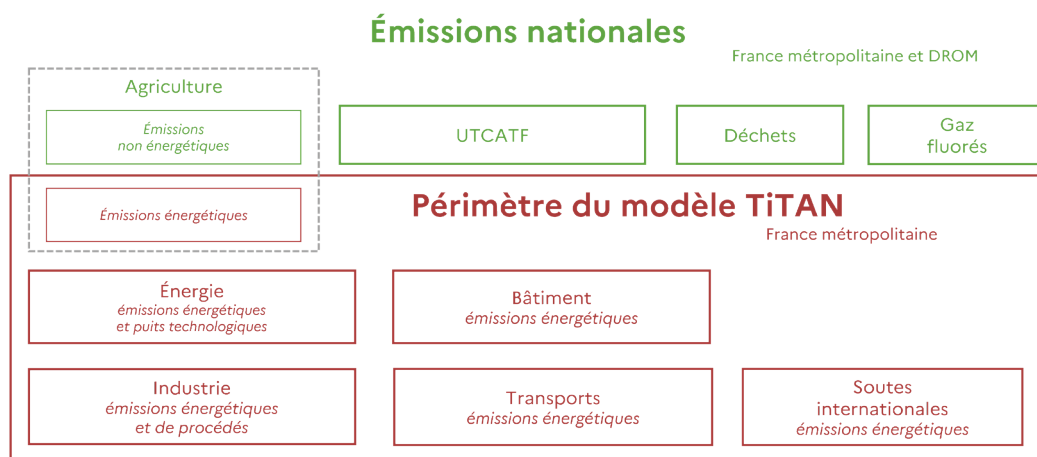
Périmètre d'analyse

Le périmètre des émissions du modèle couvre près de 80 % des émissions nationales⁴, hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF), soit 308 millions de tonnes équivalent CO₂ (MtCO₂e) d'émissions en 2023. Ce périmètre comprend les émissions du secteur de production et de distribution d'énergie (incluant les émissions négatives des puits technologiques), de l'industrie (émissions énergétiques et de procédés), des transports (dont les soutes internationales), du bâtiment, ainsi que les émissions énergétiques de l'agriculture (figure 1).

Les trajectoires des émissions non énergétiques de l'agriculture, des émissions relatives à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la forêt (UTCATF), des émissions des déchets et les émissions de gaz fluorés sont à ce jour exogènes.

Le périmètre géographique de TiTAN est la France métropolitaine. La modélisation est agrégée, sans décomposition spatiale explicite, néanmoins la dimension spatiale est indirectement prise en compte lorsqu'elle joue un rôle essentiel⁵.

Figure 1 : le périmètre des émissions modélisées par TiTAN



Source : CGDD



Structure et mécanismes

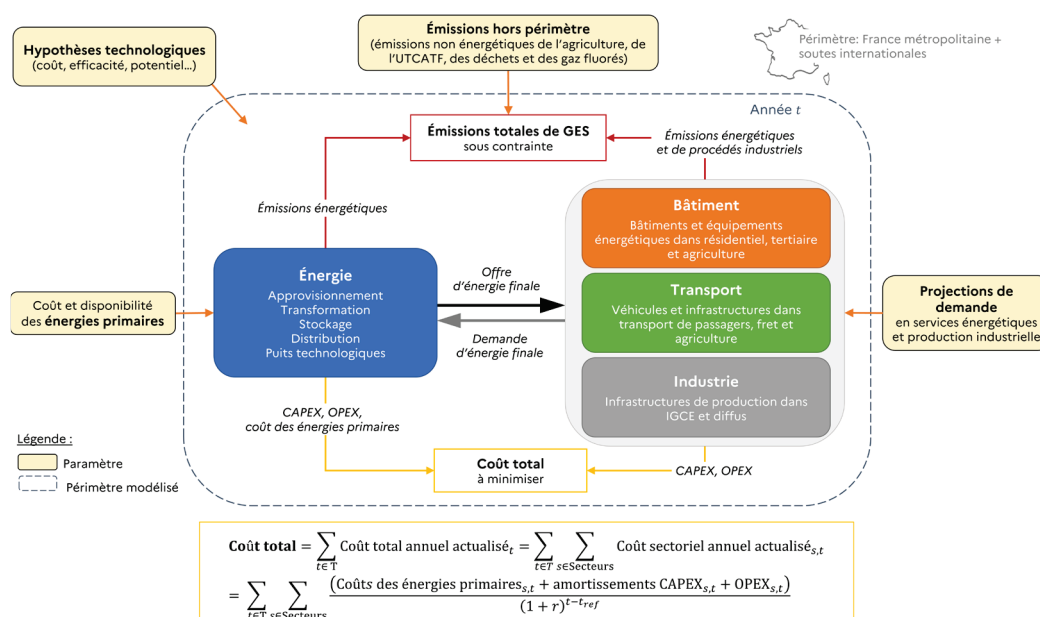
TiTAN représente le système énergétique sur la base de quatre secteurs (figure 2) : un secteur « amont » de production-stockage-distribution d'énergie et trois secteurs « aval », consommateurs d'énergie, que sont le bâtiment (résidentiel, tertiaire et agricole), le transport (passagers, marchandises, machines agricoles et soutes internationales) et l'industrie. L'investissement est optimisé dans tous les secteurs de sorte à minimiser le coût total. Les secteurs sont principalement reliés entre eux par l'équilibre énergétique :

l'offre d'énergie assurée par le secteur « amont » doit satisfaire la demande des trois secteurs « aval ». D'autres paramètres ou variables assurent aussi la cohérence entre les secteurs : par exemple, les équilibres entre les usages énergie et matière des bioressources ou de l'hydrogène sont pris en compte. Le secteur énergie est représenté avec un niveau élevé de détail, notamment en vérifiant l'équilibre du système électrique jour par jour, voire heure par heure.

⁴ Conformément aux objectifs climatiques français à date, le modèle ne traite que des émissions nationales et ne considère pas les émissions importées.

⁵ Par exemple, pour tenir compte de l'effet de la densité du bâti sur le déploiement des réseaux de gaz et de chaleur urbaine, on introduit pour ces technologies des catégories par zone de densité, caractérisées par des potentiels et des coûts différenciés.

Figure 2 : la structure du modèle TiTAN



Source : CGDD



Hypothèses

Les simulations de TiTAN reposent sur trois grandes catégories d'hypothèses.

- 1 Les hypothèses relatives aux paramètres technologiques :** trajectoires des coûts de production-installation des équipements et infrastructures ; des coûts d'opération et de maintenance de ces équipements et infrastructures ; des coûts des approvisionnements en énergie primaire ; des efficacités et consommations unitaires des technologies ; des potentiels de déploiement des technologies, etc. Ce paramétrage s'appuie principalement sur des données de la Commission européenne (CAPEX, OPEX, efficacités tirées de la base du modèle JRC-EU-TIMES), de l'Ademe (Base empreinte et Plans de transition sectoriels de l'industrie), de RTE (production électrique) et de la Stratégie française pour l'énergie et le climat (potentiels technologiques)
- 2 Les hypothèses relatives au contexte socio-économique :** la demande en services énergétiques et les prix mondiaux des énergies fossiles.
- 3 Les hypothèses relatives aux émissions hors périmètre de modélisation :** les émissions non énergétiques de l'agriculture et de l'UTCATF, mais aussi celles des gaz fluorés et du secteur des déchets.

Quelles simulations et enseignements tirer du modèle TiTAN ?

TiTAN permet de simuler trois formes de contraintes sur les émissions de GES

L'ampleur du réchauffement climatique est liée à la concentration de GES dans l'atmosphère, c'est-à-dire aux émissions cumulées passées de GES. La contrainte à appliquer sur les émissions de GES pour limiter le réchauffement climatique mondial sous un seuil donné doit, comme l'indique le GIEC, s'exprimer en budget d'émissions. **TiTAN permet ainsi d'évaluer le rythme optimal de consommation d'un budget carbone attribué à la France et d'identifier les leviers de décarbonation les moins coûteux pour ne pas dépasser ce budget.**

Toutefois, en pratique, en France comme dans la plupart des pays, les objectifs de réduction des

émissions sont exprimés en flux d'émissions annuels : objectifs de - 55 % d'émissions à l'horizon 2030 par rapport à 1990 et de neutralité carbone en 2050 par exemple. **TiTAN permet d'identifier la trajectoire technologique la moins coûteuse permettant de respecter ces objectifs exprimés en flux d'émissions de GES.**

Enfin, **TiTAN permet de déterminer, pour une valeur monétaire donnée des émissions de GES, le niveau de réduction des émissions qu'il serait rentable de réaliser du point de vue du décideur public.**

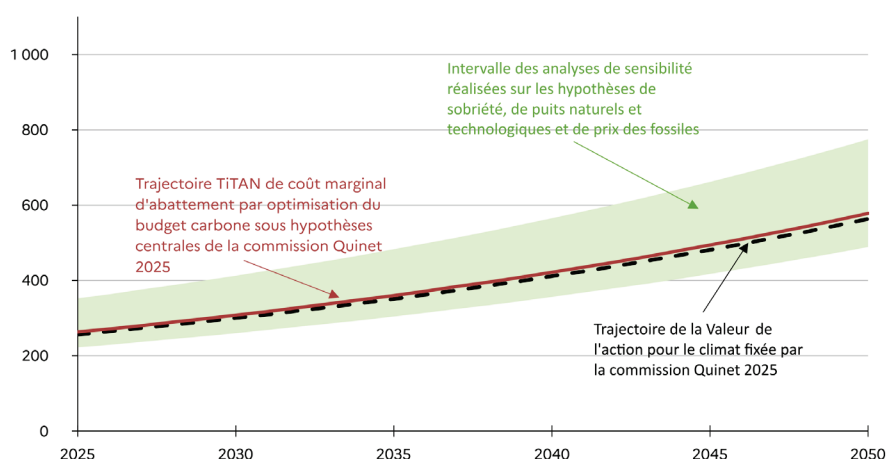
La trajectoire de coût d'abattement marginal : un indicateur phare de TiTAN

Cette variable du modèle décrit le coût de réduction des émissions de GES d'1 tCO_{2e} supplémentaire à un instant donné et constitue donc un indicateur de l'intensité des efforts à fournir pour l'action climatique. Par construction, les options de décarbonation mobilisées pour

atteindre l'objectif à moindre coût ont un coût d'abattement inférieur ou égal à sa valeur. La valeur de l'action pour le climat établie par la commission Quinet⁶ est en grande partie fondée sur cette variable (figure 3).

Figure 3 : la contribution de TiTAN à la Valeur de l'action pour le climat

Valeurs en €2023/tCO_{2e}



Note : la troisième commission sur la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat (VAC) s'est en partie appuyée sur des simulations de TiTAN respectant le budget carbone défini implicitement par la SNBC3. La trajectoire de VAC retenue est proche de la trajectoire du modèle sous les hypothèses retenues par la commission à l'horizon 2050.

Sources : CGDD, modèle TiTAN ; commission Quinet 2025.

⁶ La valeur de l'action pour le climat, Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, France Stratégie, 2025.

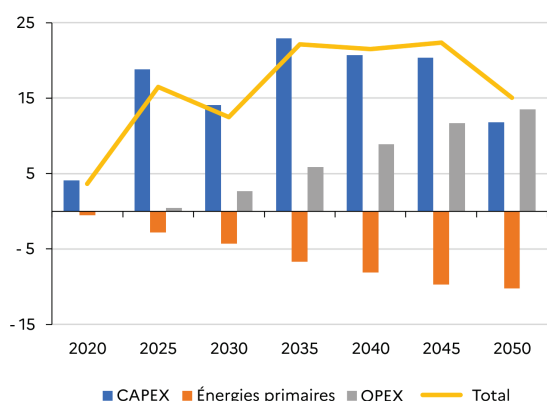


TiTAN permet une analyse fine du coût de la transition

Le coût de la transition peut être décomposé entre dépenses d'investissement et dépenses d'exploitation au niveau global (figure 4) ou par secteur.

Figure 4 : le surcoût généré par une contrainte sur les émissions de GES

En Md €2023



Lecture : le graphique représente le surcoût du scénario TiTAN en budget, réalisé pour la commission Quinet 2025, par rapport à un scénario identique sans contrainte carbone. Le surcoût d'investissement, représenté par les barres bleues (CAPEX), constitue la principale source de surcoût de la transition, tandis que les économies sur l'approvisionnement en énergie primaire compensent presque les surcoûts d'opération (OPEX).

Source : modèle TiTAN, CGDD

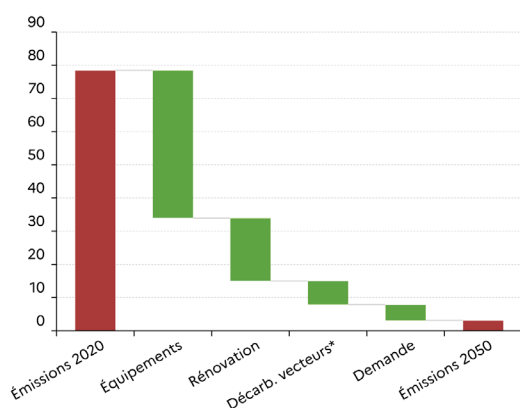


TiTAN permet une description détaillée de la transition sous plusieurs angles

Le modèle permet par exemple de décomposer les contributions de différents leviers de décarbonation (figure 5) ou de caractériser finement l'évolution de la consommation énergétique (figure 6).

Figure 5 : contributions des leviers de réduction des émissions du secteur du bâtiment entre 2020 et 2050

En MtCO₂eq/an



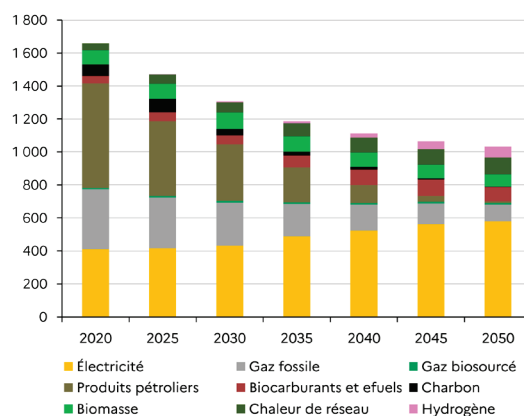
* réduction du contenu carbone des vecteurs énergétiques.

Lecture : le graphique représente la contribution des différents leviers de décarbonation du chauffage résidentiel dans un scénario illustratif avec contrainte de décarbonation.

Source : CGDD, modèle TiTAN

Figure 6 : une consommation d'énergie finale réduite et débarrassée des fossiles

En TWh ef/an



Lecture : le graphique montre l'évolution du niveau de consommation finale d'énergie et sa composition par vecteur énergétique dans un scénario illustratif avec une contrainte de décarbonation. Il met en évidence le nécessaire effort de maîtrise de la consommation et de sortie des fossiles.

Source : CGDD, modèle TiTAN

TITAN constitue un outil complet et rigoureux pour identifier les investissements les plus efficaces pour atteindre la neutralité carbone. Il est à disposition de l'administration et des acteurs qui souhaiteraient s'en emparer.

Les avantages de TiTAN sont :

- ◆ son approche intégrée du système énergétique français, qui considère les contraintes à la fois sur les productions et sur les consommations énergétiques ;
- ◆ son approche épurée des effets de comportement et concentrée sur les coûts des technologies ;
- ◆ sa capacité à optimiser la répartition des efforts dans le temps et entre les secteurs ;
- ◆ sa granularité d'analyse.

Il permet de pallier de nombreuses limites inhérentes aux approches par les coûts d'abattement (coût rapporté aux réductions d'émissions) qui hiérarchisent des actions de décarbonation isolées sans tenir compte de leurs interactions.

TiTAN à identifier les chemins technologiques les plus pertinents économiquement dans un cadre donné, pour être ensuite complété par d'autres outils permettant de calibrer les politiques publiques de transition vers la neutralité carbone. Il n'est évidemment pas dénué de limites (le secteur agricole et le secteur des terres ne sont pas modélisés, le progrès technologique est exogène...) et l'interprétation de ses résultats doit en tenir compte.

Le modèle a par ailleurs vocation à bénéficier de développements futurs qui pourront être favorisés par sa mise en accès libre courant 2025.

Pour en savoir plus

- ◆ J. Bourgueil, O. de Guibert, B. Le Hir, *TiTAN : un modèle technico-économique du système énergétique français pour une transition bas-carbone coût efficace*, CGDD, 2025
- ◆ *La valeur de l'action pour le climat*, Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, France Stratégie, 2025