



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE,
DE LA BIODIVERSITÉ
ET DES NÉGOCIATIONS
INTERNATIONALES
SUR LE CLIMAT ET LA NATURE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

TiTAN : la modélisation technico-économique au service de la transition bas-carbone

Conférence CGDD du 4 novembre 2025

**Mot d'introduction par Audrey Coreau,
cheffe du service de l'économie verte et solidaire (SEVS)
du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)**

Sommaire

1. Introduction

2. Présentation du modèle

1er temps de questions-réponses

3. L'utilisation de TiTAN pour la révision de la VAC

4. Ouverture sur les travaux futurs

2ème temps de questions-réponses et discussion



1. Introduction

“TiTAN” ? → “Trajectoire des Technologies d’Abattement vers la Neutralité”
→ un modèle d’optimisation *bottom-up* pour éclairer la décarbonation

L'approche d'optimisation *bottom-up*

- L'optimisation *bottom-up* (ou “technico-économiques”), une des principales approches de modélisation du système énergétique
- Approche *bottom-up* : représenter un système complexe par des interactions simples entre de nombreux composants élémentaires
- Optimisation : l'évolution du système est dictée par la minimisation (ou max.) d'une certaine quantité
- Un paradigme ancien et toujours en développement
- Quelques axes de recherche contemporains :
 - représentation des comportements de demande
 - traitement des incertitudes
 - construction de communautés *open-source*
 - application aux pays en développement
 - territorialisation
- Panorama rapide des acteurs en France :
 - CMA (Mines Paris) : modèle TIMES-FR
 - Centre PERSEE (Mines Paris) : modèle POMMES
 - IFPEN, CEA I-Tésé, Cired
 - RTE : modèle ANTARES
 - Entreprises de conseil spécialisées
 - CGDD : modèle TITAN

TiTAN, un modèle pour le ministère

TiTAN, un modèle très “classique”, et plutôt simple par rapport à l'état de l'art de l'optimisation *bottom-up* :

- demande fixe (non-élastique)
- périmètre France, avec interconnexions très simplifiées
- détail technologique intermédiaire
- etc.

Alors... pourquoi avoir développé un nouveau modèle similaire à ceux qui existaient déjà ?

→ ***Pour construire en interne une expertise en modélisation technico-économique***

→ ***Pour maîtriser pleinement le modèle et comprendre ses résultats***

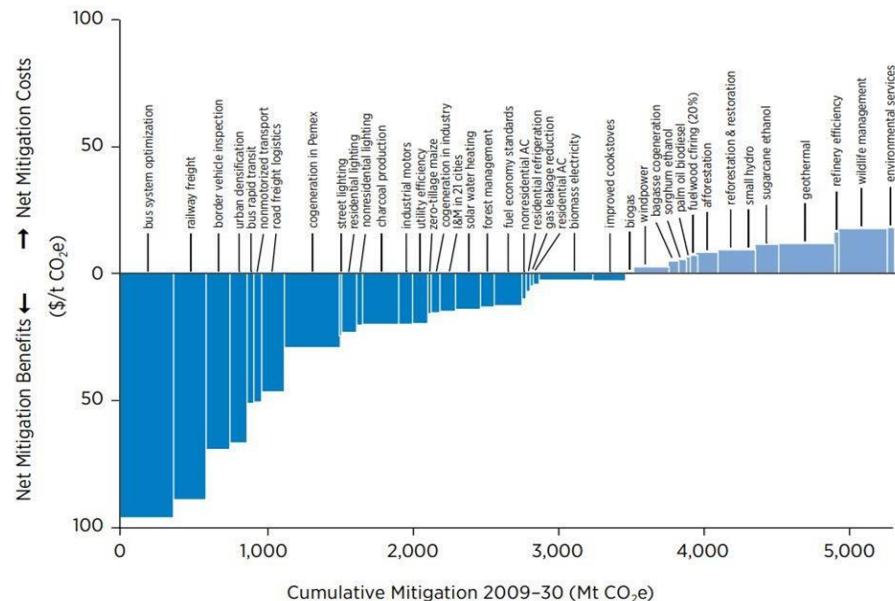
→ ***Pour l'adapter à nos besoins spécifiques : simplicité, transparence***

Les coûts d'abattement : un outil à dépasser

- Coût d'une mesure de décarbonation ramené aux émissions évitées ("abattues") (en €/tCO₂e)
- Un indicateur de l'efficacité des options de décarbonation, très utilisé
- Limites des coûts d'abattement
 - a. Un ajustement à la marge uniquement
 - b. Des mesures considérés isolément
 - c. L'évolution des technologies
- Les avantages des stratégies de long terme

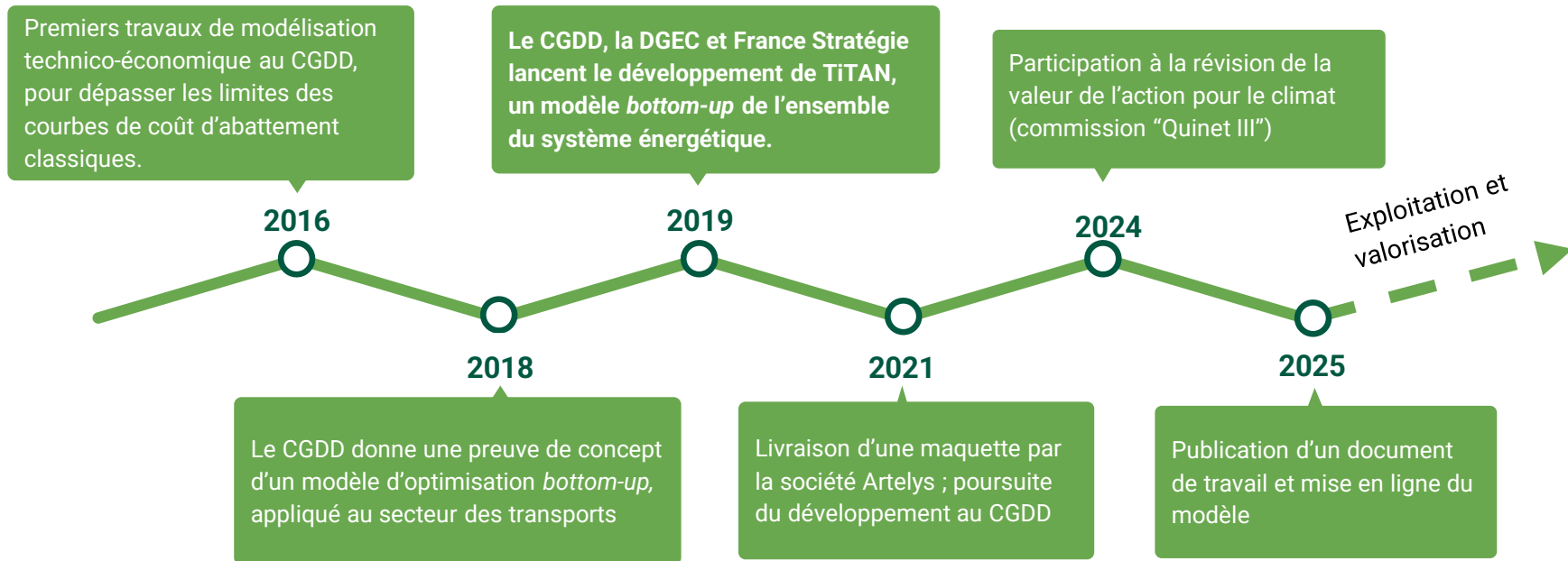
Cf. Vogt-Schilb, A., Hallegatte, S. (2014) « Marginal Abatement Cost Curves and the Optimal Timing of Mitigation Measures ».

Figure : exemple de courbe de coûts d'abattement marginaux.



Source : McKinsey

Historique du projet



Les publications



Document de travail : présentation la plus complète du modèle



Plaquette : présentation du modèle en quelques pages

CGDD Public / SEVS / Modèles évaluation de la transition énergétique / TITAN - Modèle technico-économique du système énergétique

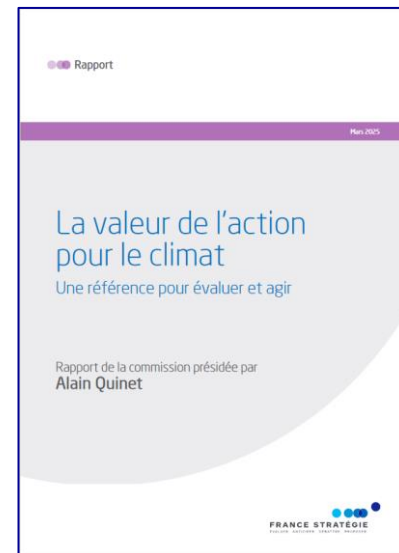
TITAN - Modèle technico-économique du système énergétique

maIn - TITAN Rechercher un fichier Code

JB SOLVEURS : ajout d'un exécutable de HIGHS 1.11.0
jean bourgeat autorisé il y a 3 semaines 1dF2Z75d Historique

Nom	Dernière validation	Dernière mise à jour
idea	Initialisation	il y a 3 semaines
Scripts	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
config	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
data	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
notices	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
output_Levantes2025_10_01_07h31...	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
solveurs	SOLVEURS : ajout d'un exécutable de H...	il y a 3 semaines
src	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
gllignore	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
Asdifython312TspPath.vbs	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
INSTALL.bat	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
LICENCE_cobc_source.txt	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines
LICENCE_paramétrage_et_notices.txt	Mise en ligne TITAN	il y a 3 semaines

Gitlab: code, paramétrage et mode d'emploi



Rapport de la commission "Quinet III" sur la révision de la valeur de l'action et le climat

2. Présentation du modèle

Un modèle d'optimisation du système énergétique

Minimisation du coût intertemporel actualisé du système (linéaire), en anticipation parfaite

Variables de décision :

1. investissement dans les équipements
2. activité des équipements disponibles
3. consommation d'énergie primaire

Sous **contraintes**:

- Satisfaction de la demande en services énergétiques (chauffage, climatisation, mobilité passagers et fret, production industrielle...)
- Contraintes technologiques : limites sur les gisements et importations d'énergies primaires, sur les potentiels des technologies, leurs vitesses de déploiement...
- Contraintes de politiques publiques : contrainte carbone, consommation d'énergie finale....

Figure : programme schématique de TITAN

$$\begin{aligned}
 \min \text{ Coût intertemporel actualisé} &= \sum_{t \in T} \frac{\text{Coût annuel}_t}{\text{facteur d'actualisation}} \\
 &= \sum_{t \in T} \frac{(\text{Coût des énergies primaires}_t + \text{amortissements CAPEX}_t + \text{OPEX}_t)}{(1 + r)^{t - t_{ref}}}
 \end{aligned}$$

avec :

- r : le taux d'actualisation (3.2 %)
- t_0 : année de calage du modèle
- t_{ref} : année de référence pour l'actualisation
- T : l'ensemble des années calculées

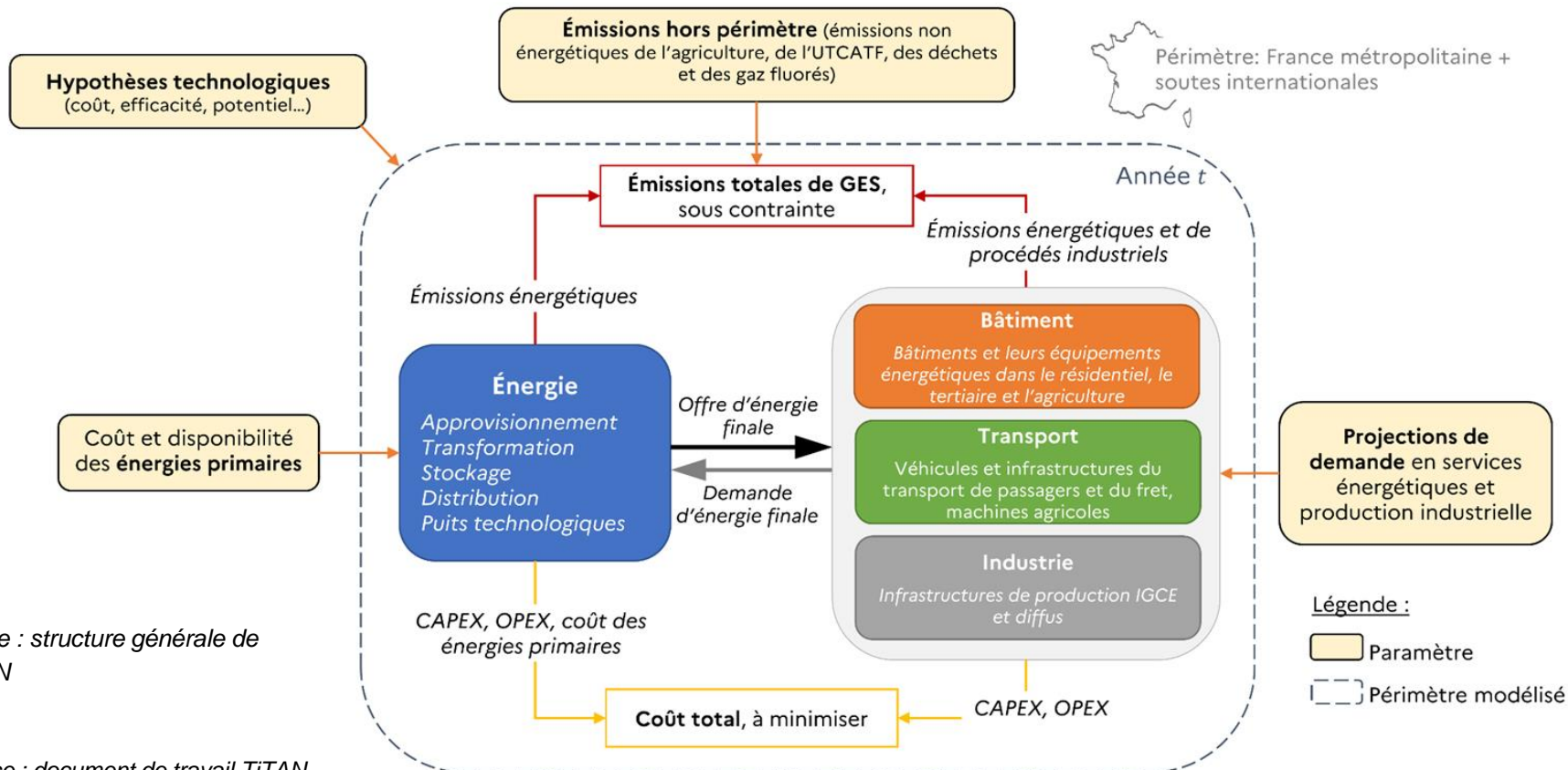


Figure : structure générale de TITAN

Source : document de travail TITAN

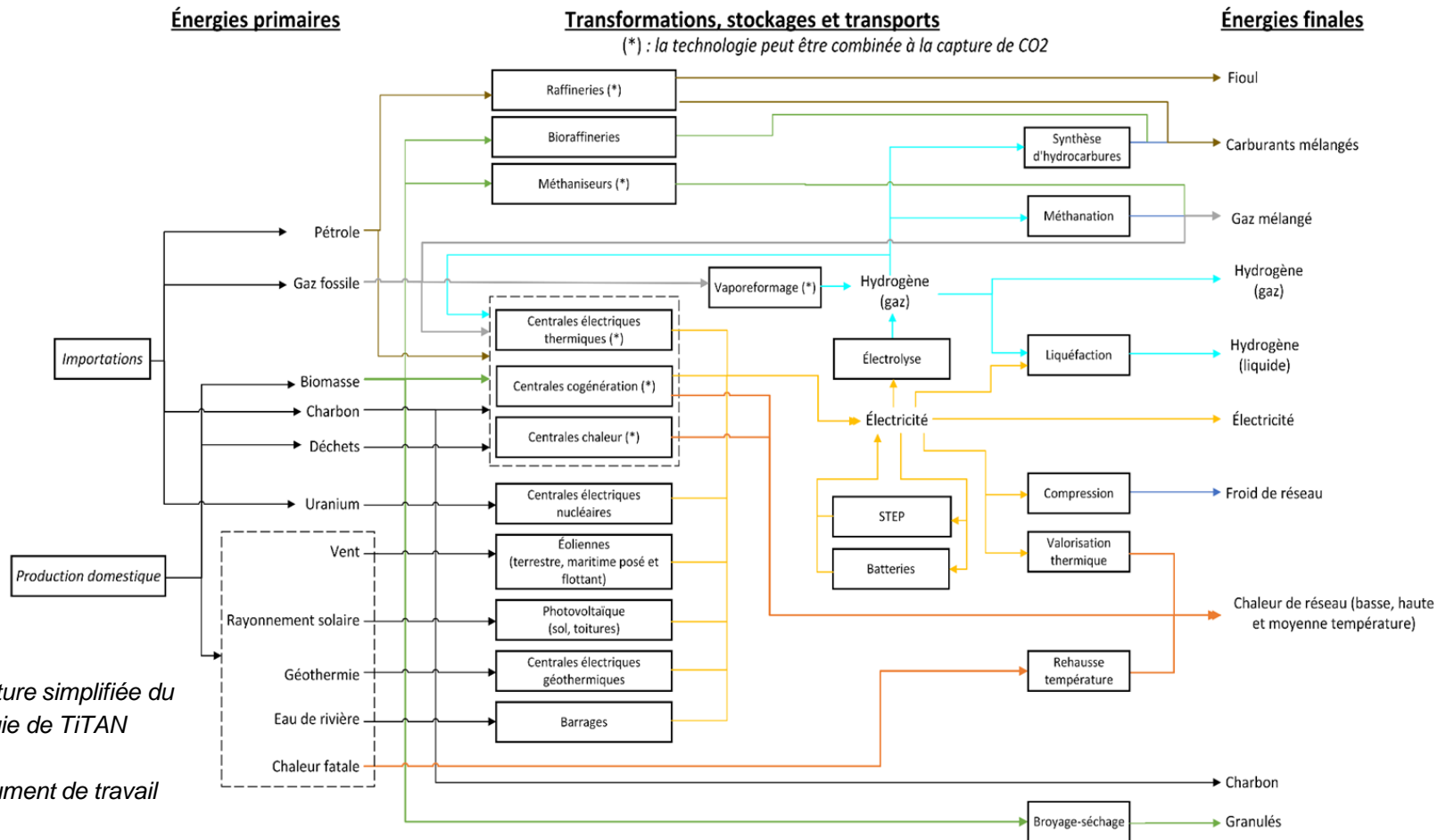


Figure : structure simplifiée du secteur énergie de TiTAN

Source : document de travail TiTAN

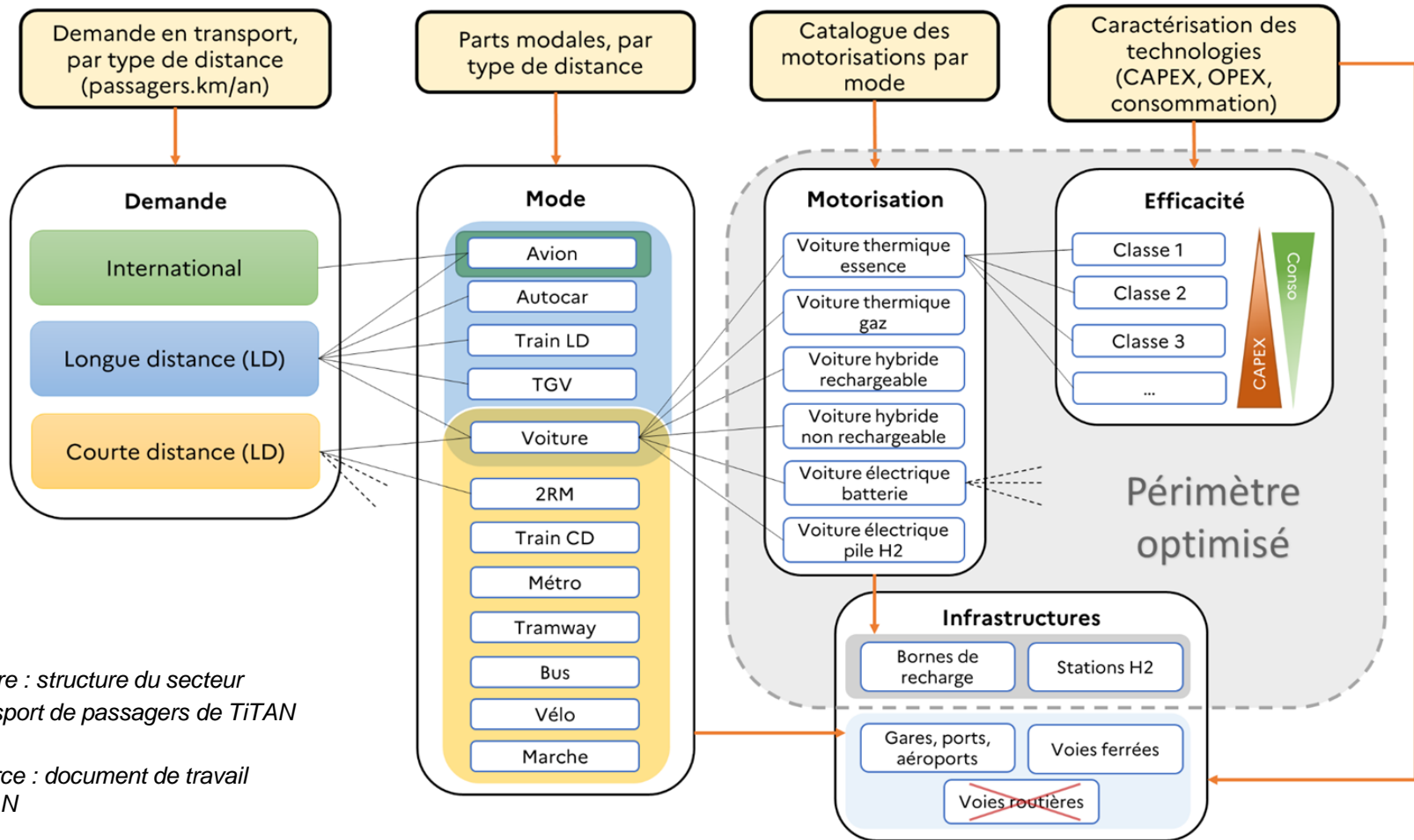


Figure : structure du secteur transport de passagers de TITAN

Source : document de travail TITAN

Domaine de pertinence

Ti TAN est centré sur :

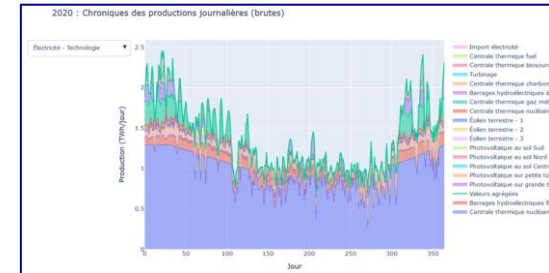
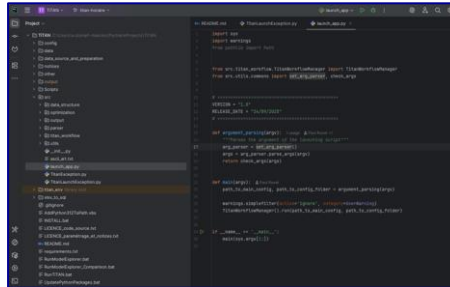
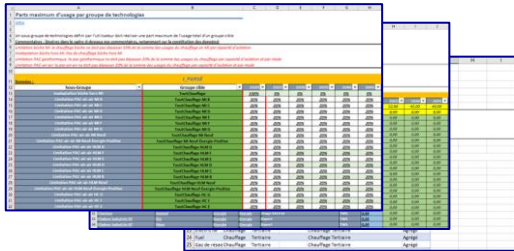
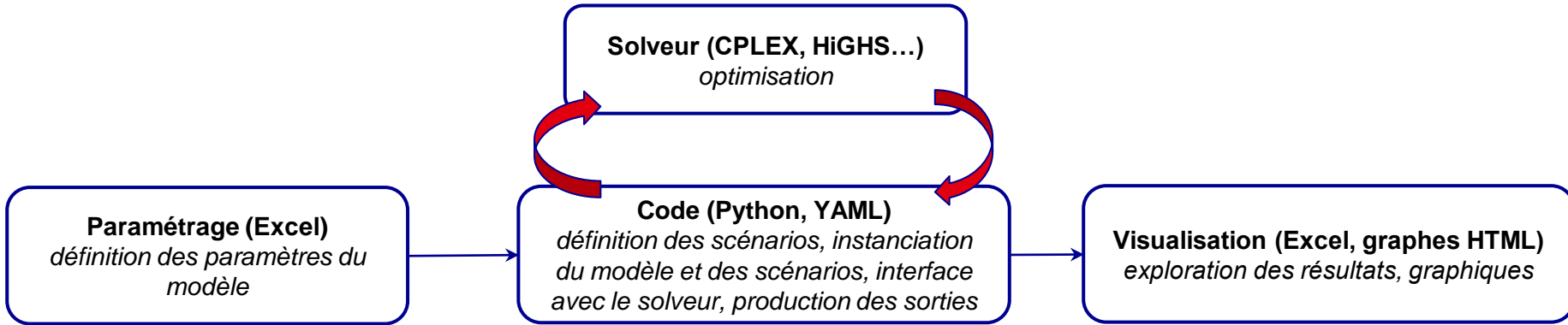
- L'atténuation du changement climatique
- Les technologies du système énergétique
- Les coûts techniques
- Le moyen et long termes
- La France métropolitaine

Il n'est pas adapté pour étudier :

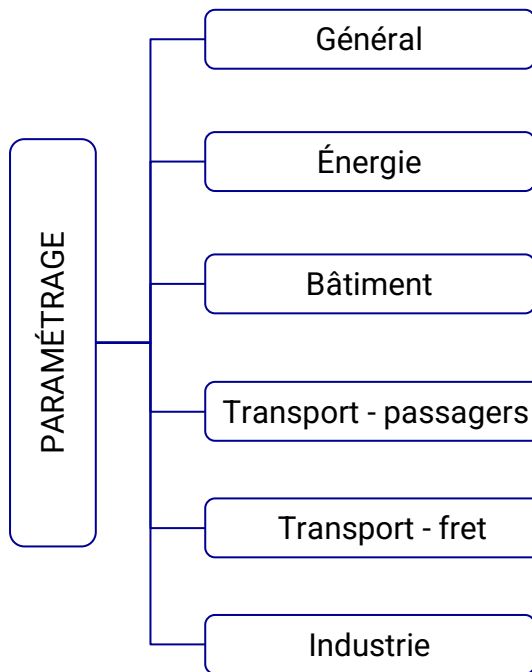
- Le court terme
- Les effets macro-économiques
- Les instruments des politiques publiques
- L'international
- L'adaptation au changement climatique et les autres limites planétaires

Périmètre	Inclus	Exclus
Géographique	France métropolitaine + soutes internationales	DROM, Reste du monde
Temporel	2020 à 2080, avec un pas de 5 ans	
Sectoriel	Énergie, Bâtiment (résidentiel et tertiaire), Transport (passagers et fret), Industrie	UTCATF, Agriculture hors consommation d'énergie, Déchets, Gaz fluoré
Économique	CAPEX : coûts de production-installation des équipements OPEX : coûts de maintenance et opération des équipements, hors énergie Coûts d'approvisionnement en énergie primaire	Progrès technologique Effets macroéconomiques Taxes et subventions Coût des externalités hors climat Coûts d'adaptation au changement climatique Coûts de financement des projets

Structure de l'outil



Structure du paramétrage

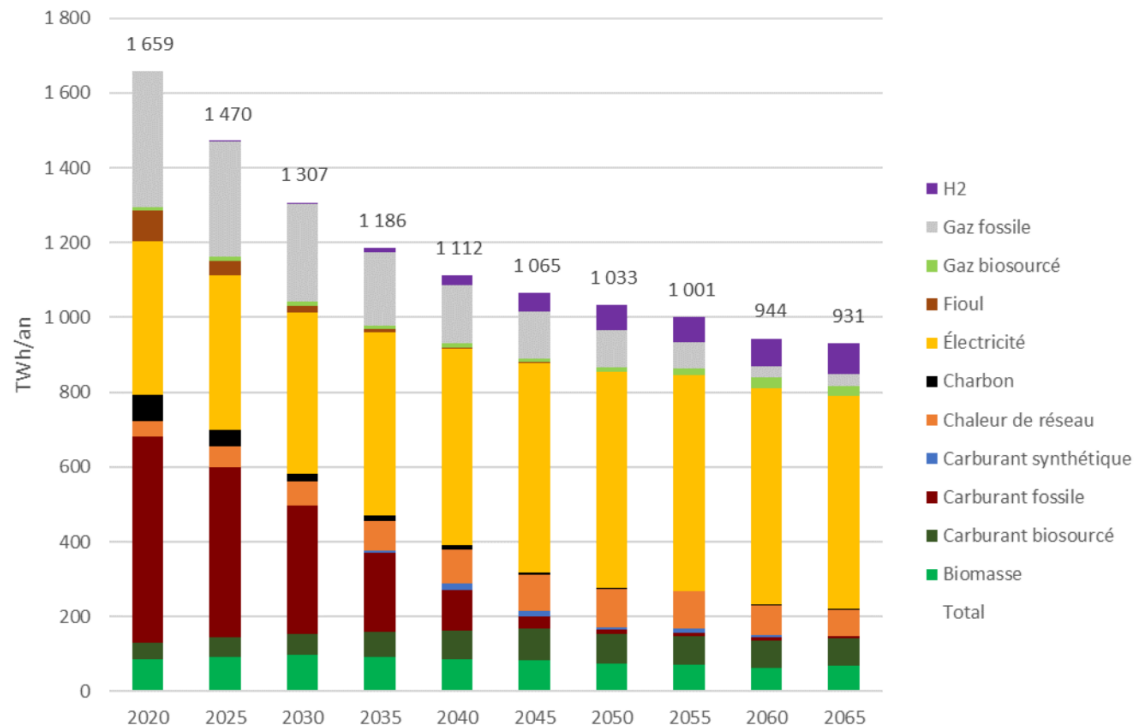


CAPEX DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION										
<p>retour intro</p> <p>Tableau des CAPEX pour les technologies de production, €/kW entrants. Les technologies virtuelles n'ont pas besoin d'être renseignées</p> <p>Commentaires : (insérez dans le cadre ci-dessous vos commentaires, notamment sur la constitution des données)</p>										
Données :										
Technologie	Unité	Est active ? (voir onglet Technocapamax)	Taux de risque sur l'investissement(%)	Source des données	2020	2025	2030	2035	2040	
Barrages hydroélectriques à grand réservoir	€/kW	Activé	0%	JRC	1 032	1 032	1 032	1 032	1 032	
Barrages hydroélectriques à petit réservoir	€/kW	Désactivé	0%	JRC	1 032	1 032	1 032	1 032	1 032	
Barrages hydroélectriques fluviaux	€/kW	Activé	0%	RTE	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	
Bioraffinage aérien	€/kW	Activé	0%	Autre	287	251	216	216	216	
Bioraffinage terrestre	€/kW	Activé	0%	Autre	133	123	112	112	112	
Broyage-séchage	Virtuelle									
Captage direct CO2	€/kW	Activé	0%	JRC	2 252	2 252	2 252	2 252	2 252	
CCGT H2	€/kW	Activé	0%	RTE	627	627	627	627	627	
Centrale chaleur MT biosourcée	€/kW	Activé	0%	JRC	427	415	404	404	404	
Centrale chaleur MT biosourcée CCS	€/kW	Activé	0%	JRC	1 259	1 250	1 240	1 240	1 240	
Centrale chaleur MT charbon	€/kW	Activé	0%	JRC	189	189	189	189	189	
Centrale chaleur MT charbon CCS	€/kW	Activé	0%	JRC	1 061	1 061	1 061	1 061	1 061	
Centrale chaleur MT fuel	€/kW	Activé	0%	JRC	116	116	116	116	116	
Centrale chaleur MT fuel CCS	€/kW	Activé	0%	JRC	549	549	549	549	549	
Centrale chaleur MT gaz mélangé	€/kW	Activé	0%	JRC	126	126	126	126	126	
Centrale chaleur MT gaz mélangé CCS	€/kW	Activé	0%	JRC	1 009	1 009	1 009	1 009	1 009	

Exemples de résultats : consommation d'énergie finale

Figure : consommation totale d'énergie finale dans un scénario de décarbonation

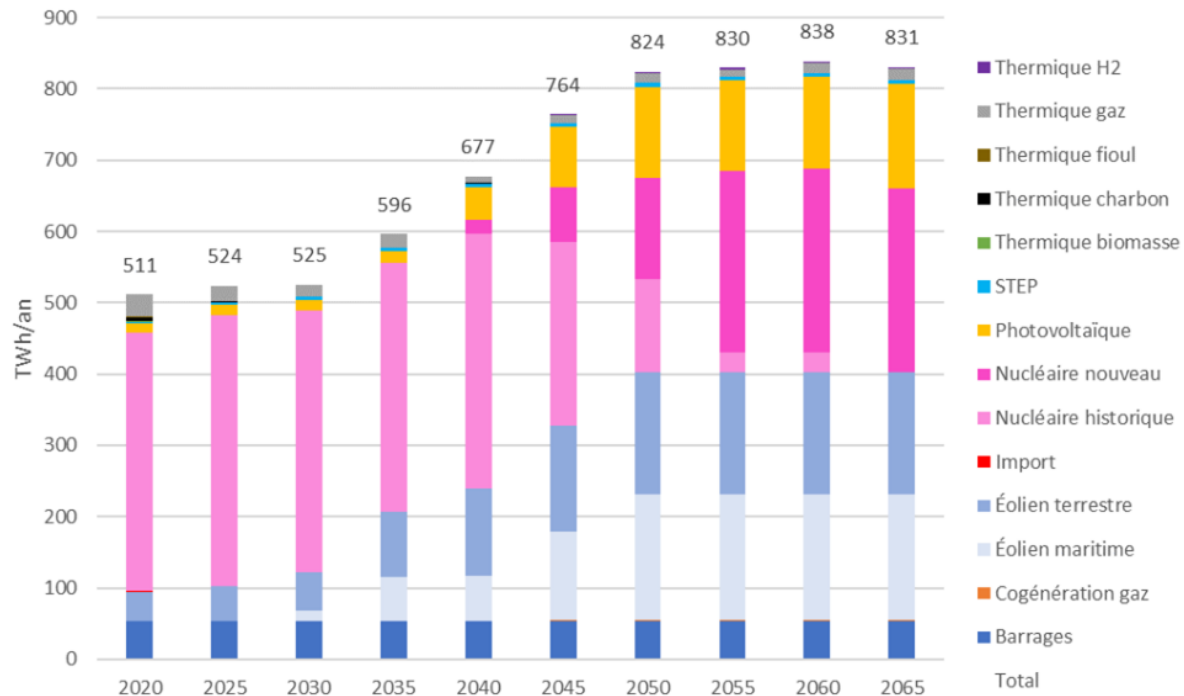
Source : document de travail TiTAN



Exemples de résultats : production d'électricité

Figure : production totale d'électricité, par familles de technologies, dans un scénario de décarbonation

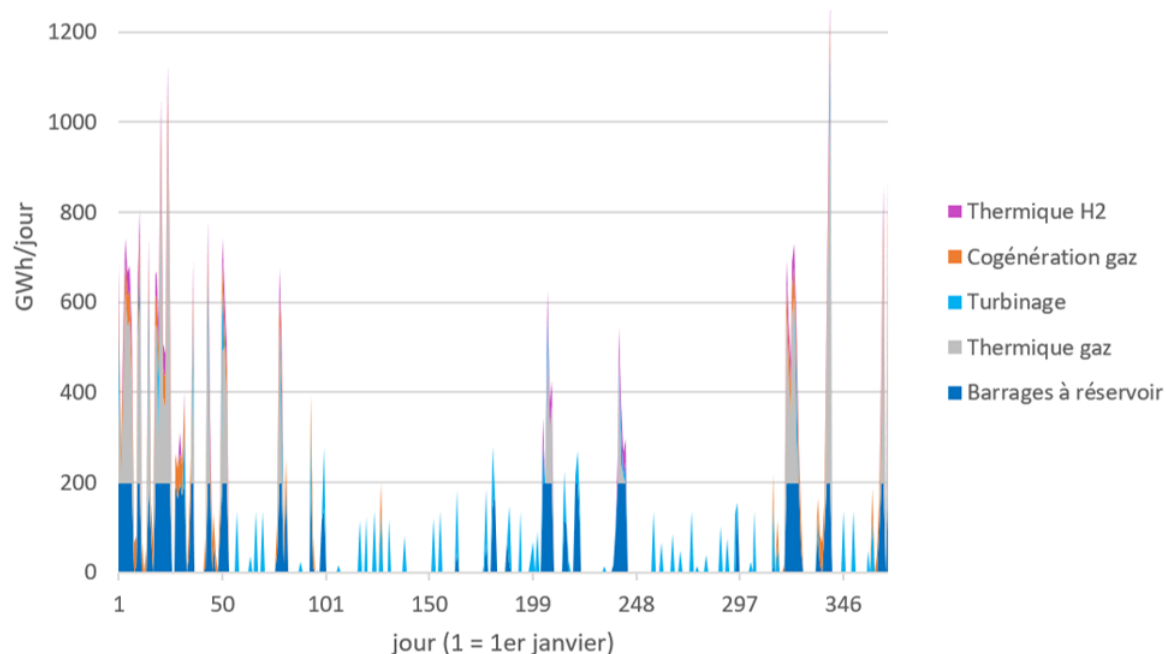
Source : document de travail TITAN



Exemples de résultats : production d'électricité pilotable

Figure : production d'électricité des moyens de production pilotables en 2050, par jour de l'année

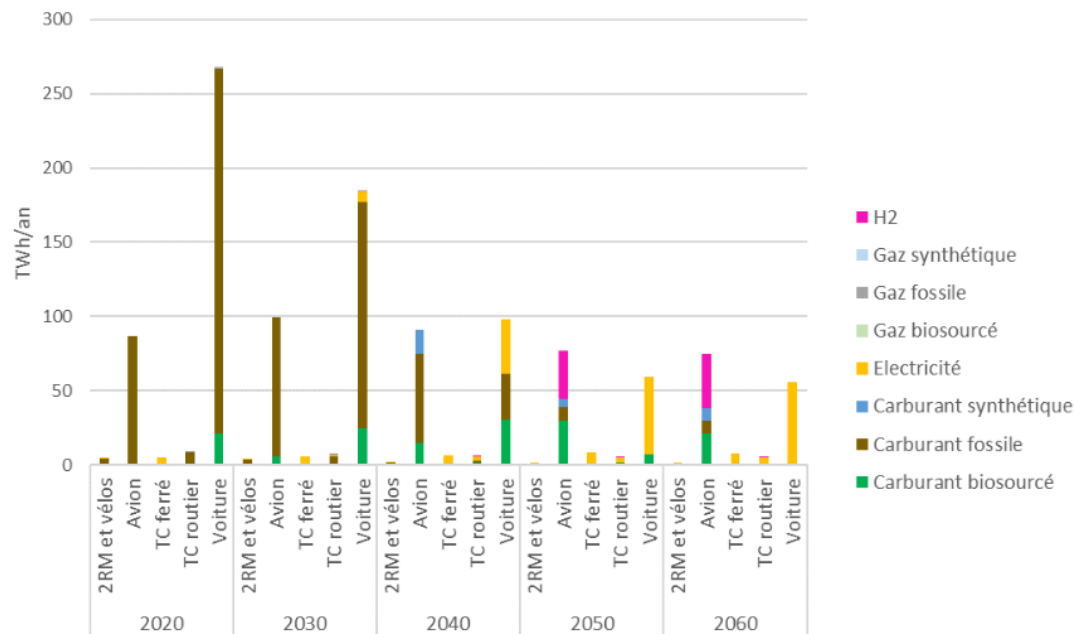
Source : document de travail TITAN



Exemples de résultats : consommation du secteur transport de passagers

Figure : consommation d'énergie finale par mode de transport et énergie dans un scénario de décarbonation

Source : document de travail TiTAN

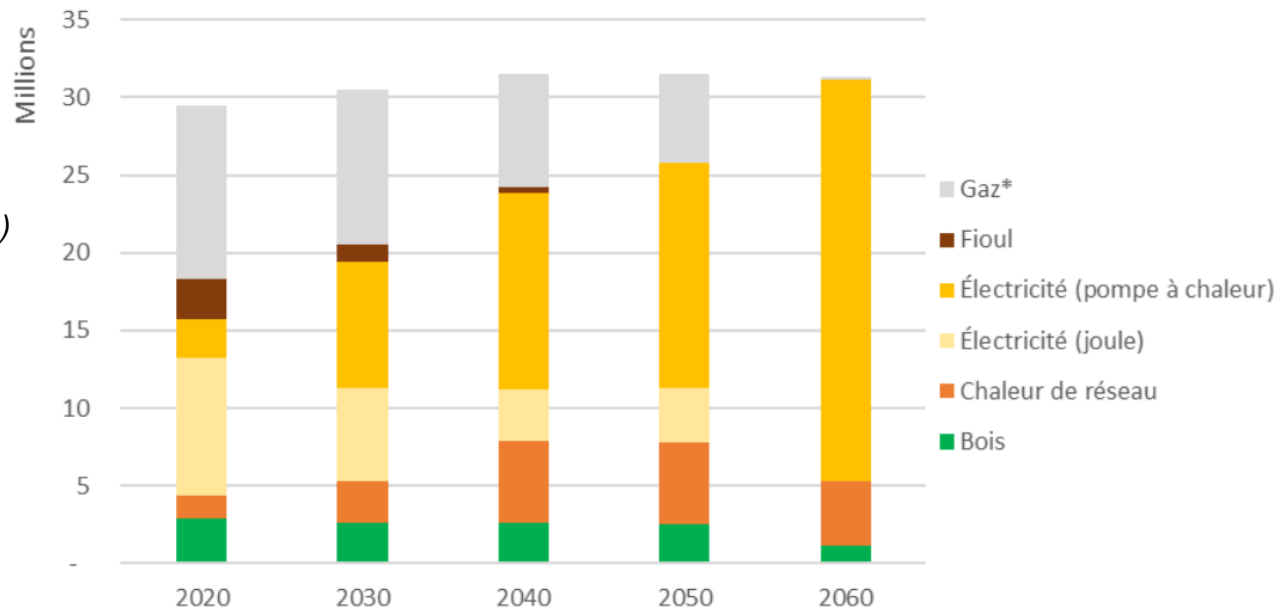


Note de lecture : "TC" signifie "transports en commun"

Exemples de résultats : systèmes de chauffage des logements

Figure : énergie de chauffage des logements dans un scénario de décarbonation (en million de logements)

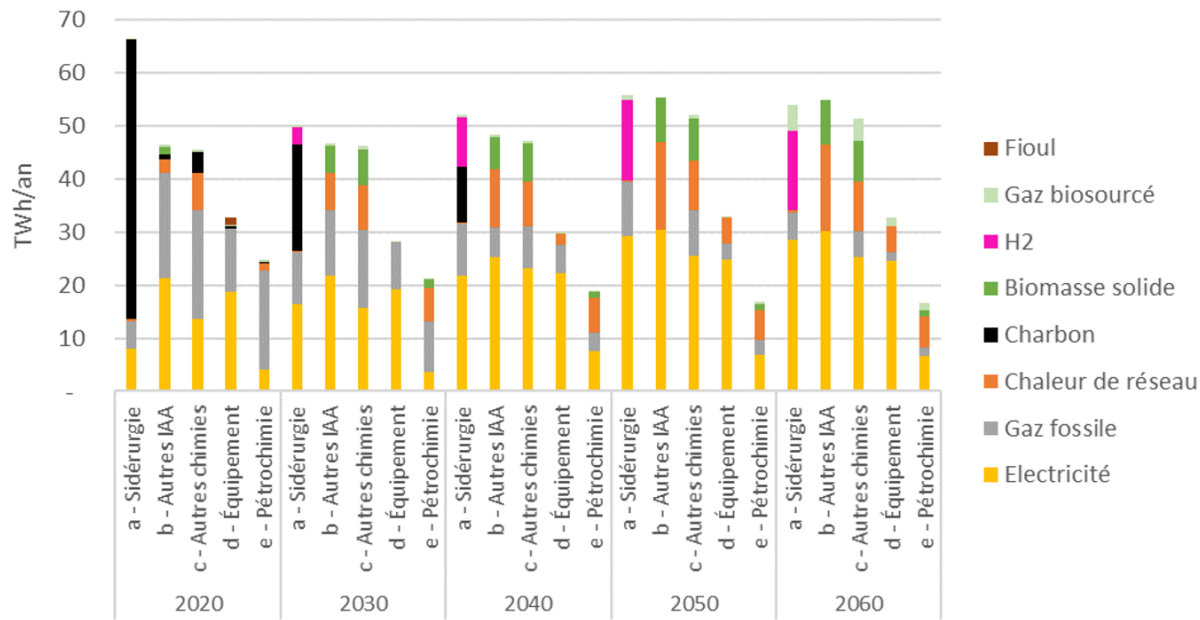
Source : document de travail TiTAN



Exemples de résultats : consommation des industries

Figure : consommation d'énergie finale de quelques filières industrielles dans un scénario de décarbonation

Source : document de travail TITAN



Exemples de résultats : coûts d'investissement

Figure : surplus d'investissement d'un scénario de décarbonation par rapport à un scénario identique sans contrainte carbone

Secteur	Principaux postes d'investissements (CAPEX)	Surplus moyen de CAPEX (Md€ ₂₀₂₃ /an)			
		2025-2030	2035-2050	2055-2065	2025-2065
Énergie	Capacités de production	+ 1,9	+ 11,5	+ 5,7	+ 7,4
	Réseaux	+ 1,6	+ 5,6	-0,3	2,7
	Stockage de l'énergie	-	-	-	-
Bâtiment	Isolation thermique	+ 4,6	-	-	+ 1,0
	Équipements de chauffage, climatisation et ECS	+ 1,8	+ 0,2	+ 8,9	+ 3,5
Transport	Véhicules	+ 5,8	+ 2,7	+ 2,0	+ 3,2
Industrie	Capacités de production	+ 0,3	-	+ 0,2	+ 0,1
Total		+ 16,0	+ 16,0	+ 20,0	+ 16,5

Source : document de travail TiTAN

Exemples de résultats : coûts d'approvisionnement en énergies primaires

Figure : surplus de coûts d'approvisionnement en énergies primaires d'un scénario de décarbonation par rapport à un scénario identique sans contrainte carbone

Énergie primaire	Surcoût d'approvisionnement moyen (Md€ ₂₀₂₃ /an)			
	2025-2030	2035-2050	2055-2065	2025-2065
Biomasse	+ 2,1	+ 5,2	+ 6,2	+ 4,8
Charbon	- 0,7	- 1,1	- 1,3	- 1,0
Produits pétroliers	- 2,8	- 3,4	- 0,8	- 2,4
Gaz fossile	- 2,2	- 9,4	- 13,2	- 9,1
Uranium	- 0,0	- 0,1	- 0,0	- 0,1
Total	- 3,5	- 8,7	- 9,3	- 7,6

Source : document de travail TiTAN

1er temps de questions-réponses (5')

Avez-vous des questions ?

3. L'utilisation de TiTAN pour la révision de la VAC

La valeur de l'action pour le climat (VAC)

Définition

“la valeur que la collectivité doit donner aux actions publiques et privées permettant d’abattre une tonne d’équivalent CO2e. [...]”

Elle s’inscrit dans une logique coût-efficacité, déterminant comment atteindre un objectif donné à moindre coût.”

“une référence que l’État et la société se donnent pour évaluer et concevoir les actions de décarbonation”

VAC \neq coût social du carbone (approche coût-bénéfice)

\neq taxe carbone

Usages

Aujourd’hui : utilisée surtout pour l’évaluation socio-économique des projets d’investissements publics (notamment transports)

En théorie : permet d’identifier les actions de décarbonation “rentables pour la société” par comparaison avec le coût d’abattement (CA) : si $CA \leq VAC$ à l’instant t , il faut lancer l’investissement

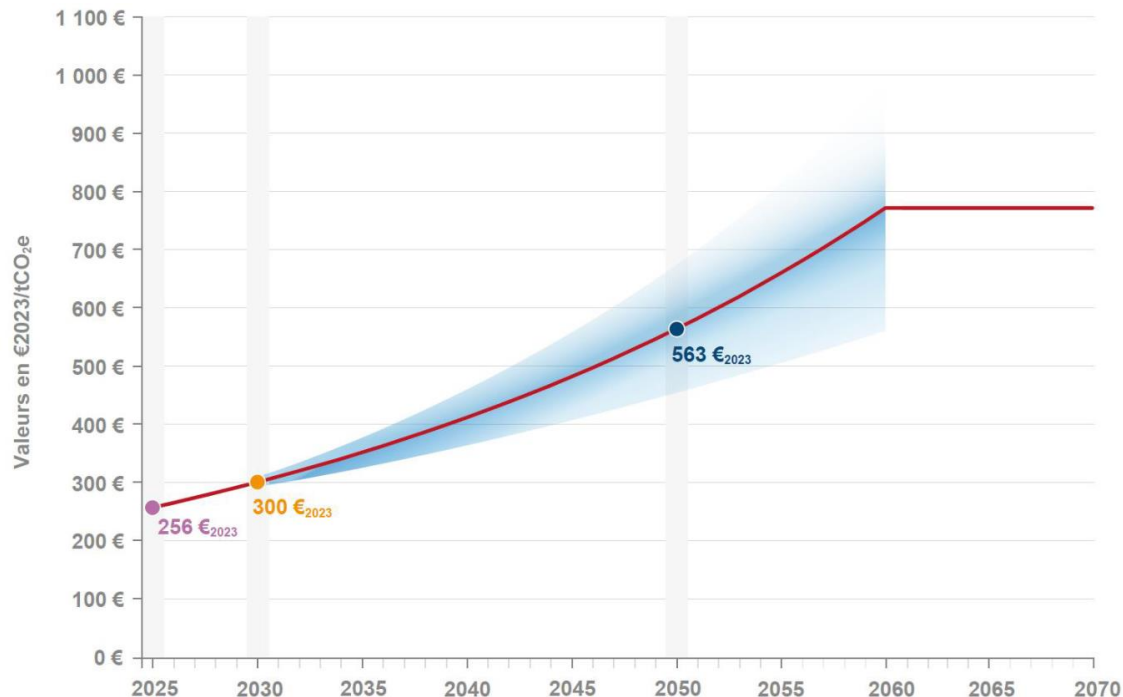
En pratique, comparaison délicate avec la CA d’une action privée :

- écarts “paramétriques” : différences de taux d’actualisation, comptage des taxes/subventions, des co-bénéfices...
- problèmes méthodologiques usuels des CA

La valeur de l'action pour le climat (VAC)

Figure : trajectoire de la valeur de l'action pour le climat telle qu'actualisée en 2025

Source : France Stratégie. 2025. *La valeur de l'action pour le climat - Une référence pour évaluer et agir.*



Contrainte carbone de TiTAN et coût d'abattement marginal

Possibilité d'optimiser TiTAN sous "contrainte carbone" : limite max sur les émissions de gaz à effet de serre (GES)

Forme flexible :

- en "flux" : une contrainte sur les émissions à chaque point temporel
- en "budget" : contrainte unique sur les émissions cumulées
- possibilité de combiner les deux

Une fois le modèle optimisé, on obtient :

variable duale associée à la contrainte carbone

= *coût d'abattement marginal*

= **coût pour le système de réduire les émissions de 1 tCO₂e supplémentaire**

→ pour le modélisateur : indicateur de la "tension" du système

→ sens proche de la VAC, peut servir à l'évaluer

Figure : les différentes formes de la contrainte carbone de TiTAN

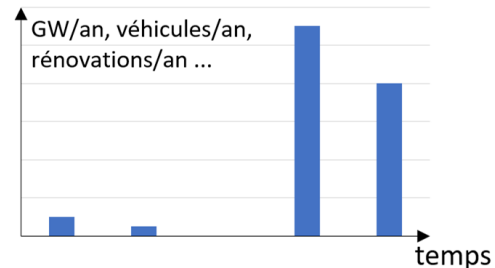
$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{contrainte carbone en flux : } \forall t > t_0, t \leq t_{fin}, \text{ Émissions de GES}_t \leq \text{Plafond d'émissions}_t \\
 \text{contrainte carbone en budget : } \sum_{t>t_0}^{t_{fin}} \text{ Émissions de GES}_t \leq \text{Budget}
 \end{array} \right.$$

TiTAN et la révision de la VAC : méthodologie

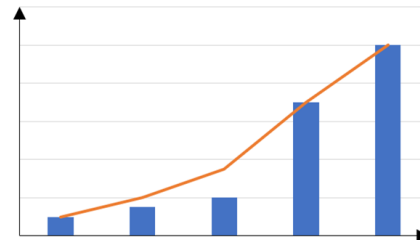
- Mobilisation de TiTAN et de modèles macroéconomiques (ThreeME, Vulcain)
- Trajectoire finale déterminée par concertation, sur la base des modélisations, de raisonnements théoriques et d'avis d'experts
- Simulations TiTAN : besoin d'hypothèse sur le vitesse de déploiement des technologies
→ alignement sur les trajectoires technologiques du scénario de référence de la SNBC3 (version non définitive)
- Tests de sensibilité avec TiTAN sur le niveau des puits naturels de carbone (UTCATF), le niveau des puits technologiques (CCS), le prix des énergies fossiles et la sobriété
- Pas de test sur le progrès technologique (hors CCS)

Figure : exemple d'une trajectoire d'investissement dans TiTAN selon les contraintes sur le déploiement des technologies

A - Sans contrainte (par défaut):
trajectoire optimisée librement,
potentiellement irrégulière



B - Avec contrainte "niveau max" (type commission Quinet) :
trajectoire imposée, non optimisée



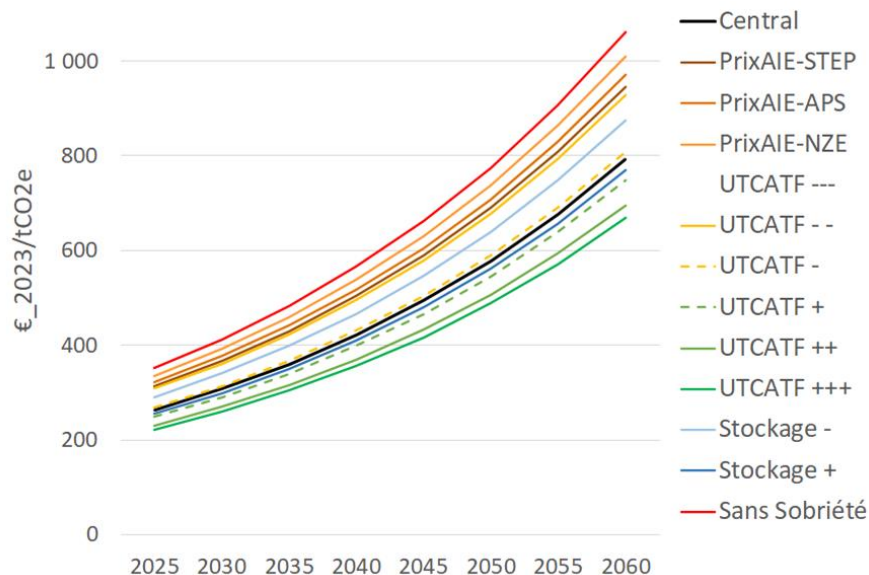
Source : CGDD

TiTAN et la révision de la VAC : bilan

Enseignements des modélisations TiTAN :

- Les objectifs climatiques de la France sont atteignables à des niveaux d'effort vraisemblables... sous des hypothèses favorables de progrès technologique, de sobriété et de maintien des puits de carbone naturels (UTCATF)
- pas atteignables si dégradation très importante du puits UTCATF
- difficilement atteignables sans sobriété généralisée
- difficilement atteignables sans capture et stockage technologique de carbone (CCS)

Figure : coût d'abattement marginal de TiTAN dans les tests de sensibilité réalisés pour la révision de la VAC



Source : France Stratégie. 2025. La valeur de l'action pour le climat - Une référence pour évaluer et agir.

4. Ouverture sur les travaux futurs

Quel usage des modèles dans l'élaboration des stratégies climatiques françaises ?

Scénarios SNBC2 (2018-2020) et SNBC3 construits par un "assemblage" de modèles sectoriels, résultats agrégés *a posteriori* des simulations

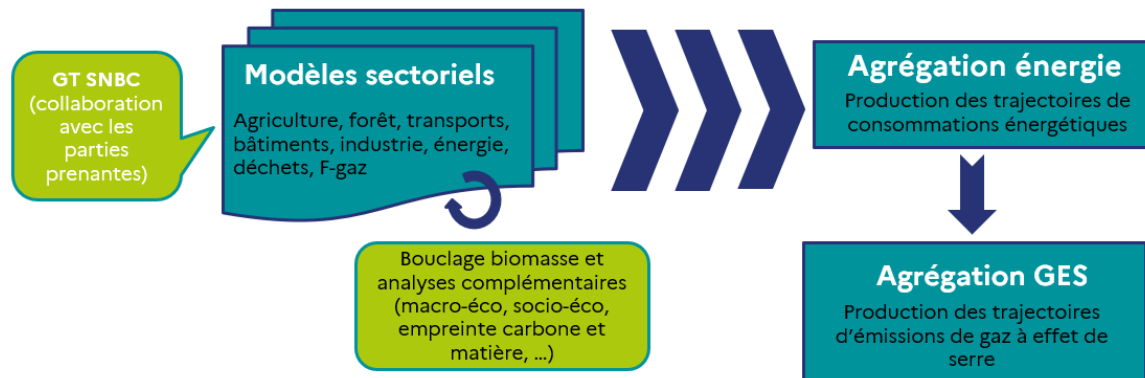
Pas de modèle multisectoriel mobilisé directement pour construire les scénarios SNBC

Modèles multisectoriels d'optimisation *bottom-up* (et autres) utilisés pour les révisions de la valeur de l'action pour le climat (TIMES-FR en 2008 et 2018 ; TITAN en 2024) → contributions variables à la SNBC

Cf. (Maïzi, Assoumou, Millot, 2024) et (Nadaï, Cassen, Lecocq, 2023)

Figure : architecture des modélisations de la SNBC3

Source : DGEC



Quels usages pour TiTAN aujourd'hui ?

Contribuer à la SNBC

TiTAN n'a pas vocation à remplacer l'assemblage de modèles, lequel :

- a montré son efficacité
- possède un niveau de détail élevé, qui permet l'engagement des parties prenantes

Mais TiTAN a des atouts qui complètent bien ces outils :

- critère de coût-efficacité
- représentation intégrée des différents secteurs
- production rapide de variantes

Quelle rôle dans l'élaboration de la SNBC4 ?

- en amont : suggérer de grandes orientations ?
- en cours de route : faire des tests de robustesse ?

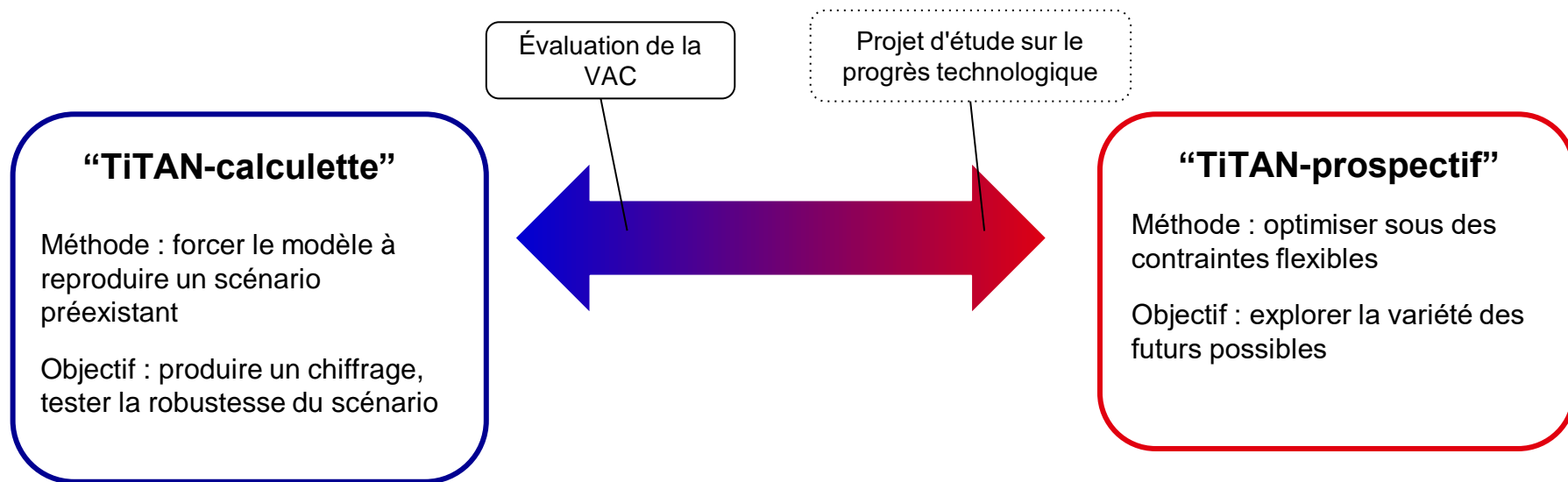
Publications du CGDD en autonome, collaborations...

Quelques exemples de sujets envisagés :

- Progrès technologique : *Qu'est-ce que les incertitudes sur le progrès technologique impliquent pour l'atteinte de nos objectifs climatiques ?*
- Sobriété
- Dépenses pour la transition énergétique → SPAFTE ?

Avez-vous des suggestions ?

Typologie des cas d'usage de TiTAN



Quels travaux sur TiTAN lui-même ?

- Beaucoup de points où raffiner la modélisation... mais priorité à la valorisation
 - quelques sujets identifiés, à traiter en priorité : industries, biomasse-énergie, stockage d'électricité
 - pour le reste : faire à l'occasion des sujets étudiés
- Base de données :
 - Besoin d'actualisation : coûteux car volumineuse et sources dispersées
 - Améliorer la qualité et la transparence
 - À développer en collaboration ?
- Améliorer l'interface pour favoriser utilisation hors CGDD : dans le ministère, et au-delà ?

À retenir

- Avec TiTAN, notre ministère s'est doté en interne d'une capacité d'analyse technico-économique poussée, jusque-là exclusive aux mondes de la recherche et des entreprises de conseil
- Une grande variété d'usages possibles, loin d'avoir été tous explorés
- Code et base de données en libre accès et *open source*
- Très preneurs de retours d'experts sur le paramétrage, la modélisation et la méthodologie
- CGDD très ouvert à des collaborations sur les études, les bases de données, le développement du modèle, la formation à l'utilisation de TiTAN...



Remerciements

Des questions ?

Détails sur la modélisation de TiTAN

Secteurs	Nombre de technologies	Sources du paramétrage
Énergie	67	Modèle JRC-EU-TIMES, RTE
Transport de passagers	61	Modèle PRIMES EU
Transport de fret	39	Modèle PRIMES EU
Bâtiment	38	Modèle JRC-EU-TIMES
Industrie	68 pour la filière aluminium 34 pour la filière sidérurgie 146 pour la filière ciment 4 ou 5 voies technologiques par filière	Données sources des PTS de l'Ademe pour les filières aluminium, sidérurgie et ciment. Comptabilité nationale et hypothèses <i>ad hoc</i> pour les autres filières