

Projet « Analyse Physique et Economique des Scénarios Energétiques »

*Sandra Bouneau, Laurent Audouin, Xavier Doligez, Marc Ernoult, Lise Eychène,
Abdoul-Aziz Zakari-Issoufou*

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay – Université Paris Sud / IN2P3 – CNRS

Gaël Giraud, Fatma Rostöm

Centre d'économie de la Sorbonne – INSHS / CNRS

Anthony Dufour, Marie-Noëlle Pons, Jean-François Portha

Laboratoire Réactions & Génie des Procédés – Université de Lorraine / INSIS – CNRS

Fabien Perdu, Arthur Clerjon

CEA Liten – Grenoble

Olivier Vidal, Cyril François

Is Terre – Université Grenoble Alpes / CNRS

- **Projet issu de la collaboration économistes/physiciens**
 - ▣ Approche commune et partagée pour analyser le rôle de l'énergie dans l'économie
 - ▣ Volonté de construire un couplage innovant entre l'énergie et l'économie compréhensible par les deux communautés
- **Point de départ**

Utiliser le scénario de transition énergétique pour coupler l'énergie et l'économie, et analyser leurs impacts mutuels
- **Le scénario = secteur de production énergétique**
 - ▣ Installations mettant en œuvre différentes technologies ↔ capital
 - ▣ Maintien des installations existantes et déploiement de nouvelles ↔ investissement
 - ▣ Production d'énergie ↔ production de biens de consommation

Objectif du projet

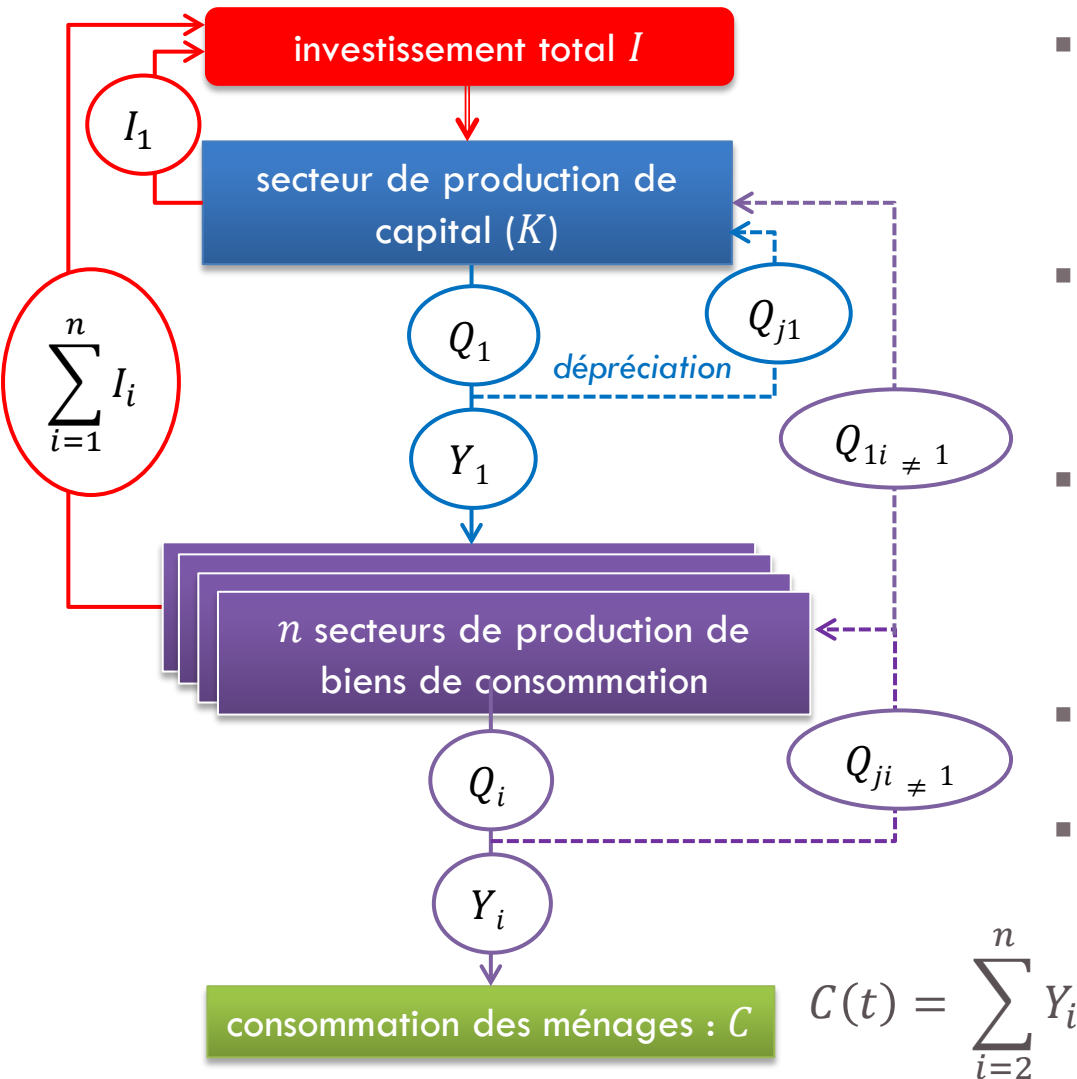
Elaboration d'un modèle dynamique unique capable :

- ✓ de décrire avec les mêmes grandeurs le secteur de production énergétique, le secteur de production économique et leurs interactions
- ✓ de mener une analyse comparative des scénarios sur des critères strictement « physiques » et d'en évaluer les impacts sur l'économie

Elaboration d'un modèle commun

3

- Modèle dynamique macro-économique multi-sectoriels avec un formalisme « entrée/sortie » de Leontief



- 1 secteur unique dédié à la construction du capital K utilisé par les n secteurs de production de biens de consommation
- Production brute de chaque secteur i par unité de temps : $Q_i = \frac{K_i}{v_i}$
- Une part de la production brute Q_i est consommée par le secteur i lui-même et par tous les autres : Q_{ji}
- Production nette de chaque secteur i : Y_i
- Investissement de chaque secteur i par unité de temps : $I_i = \dot{K}_i + \delta K_i$

$$C(t) = \sum_{i=2}^n Y_i$$

- Transposer les grandeurs économiques (capital, investissement, productions brute et nette) en grandeurs énergétiques pour décrire la transition d'un scénario

Economie	Energie
n secteurs de production	technologies appelées par les scénarios de transition combustibles fossiles → électricité biomasse → bio-carburant solaire → chaleur basse température
Capital K	installations énergétiques (K_E) fonctionnant au maximum de leurs capacités pour produire une énergie totale brute (E) $E = \frac{K_E}{v_E} \quad \text{with } \frac{1}{v_E} : \text{énergie produite / unité de capital}$
Investissement I	énergie nécessaire (I_E) pour construire de nouvelles installations (\dot{K}_E) pour augmenter la production brute d'énergie et /ou remplacer les anciennes (δK_E) : $I_E = \dot{K}_E + \delta K_E$
Nette production Y	énergie nette (Y_E) produite par le capital K_E obtenue une fois l'énergie consommée par la transition elle-même déduite de l'énergie brute

- Etape 1 : analyse strictement « physique » d'un scénario basée sur la modélisation du secteur de production énergétique indépendamment de toute hypothèse économique
 - Données d'entrée issues d'un scénario
 - Evolution de la capacité installée pour chaque technologie (nucléaire, éolien, hydraulique,...)
 - Production brute d'énergie sous la forme des principaux vecteurs (électricité, carburant, chaleur haute-température pour les procédés industriels, chaleur basse-température pour le résidentiel/tertiaire)
 - Energie consommée par chaque secteur de consommation (industrie, résidentiel/tertiaire, transport)
 - Paramètres d'entrée
 - Énergie consommée pour la construction de chaque type d'installation : $J/W_{\text{installé}}$
 - Energie consommée par chaque type d'installation pour produire l'énergie : J/J_{produit}
 - Résultats
 - Energie consommée par la transition énergétique elle-même sous la forme de différents vecteurs pour la construction des installations appelées par le scénario (investissement énergétique) et pour leur fonctionnement = coût énergétique de la transition
 - Production nette d'énergie sous la forme des différents vecteurs finalement disponible pour l'économie (ménages, industrie)
- ⇒ analyse de la « faisabilité » physique d'un scénario et de sa capacité réelle à satisfaire les besoins spécifiques des différents secteurs de consommation

Modélisation du secteur énergie/ Analyse d'un scénario

6

□ Scénario de transition

□ Modélisation du secteur énergétique

évolution des installations

- ✓ déclin : $K_i \searrow$
- ✓ renouvellement : $K_i = \text{Cte}$
- ✓ déploiement : $K_i \nearrow$
- ⇒ investissement énergétique fixé par le scénario

production de vecteurs

Quantité de vecteur j produit par chaque technologie i fixée par le scénario

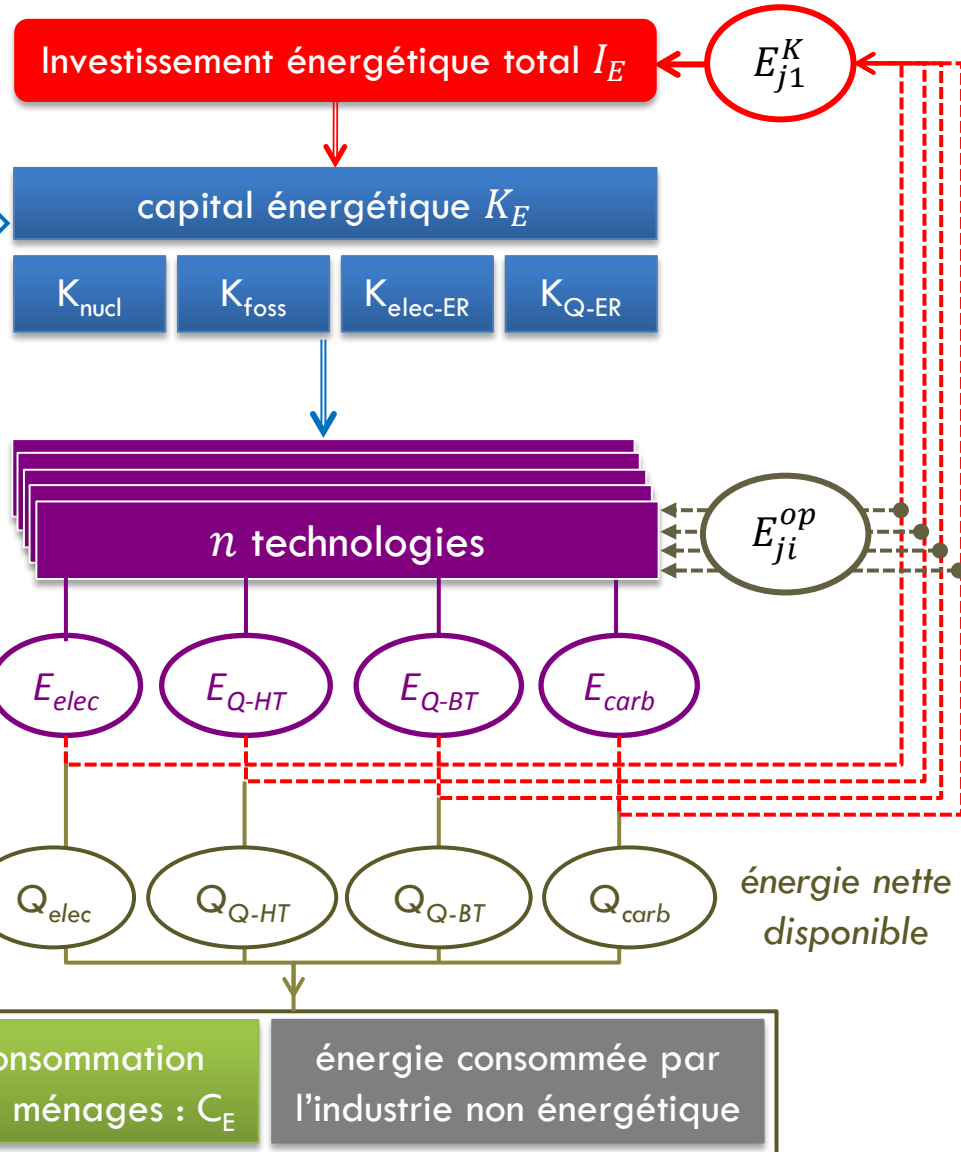
$$E_j = \sum_i \eta_{ji} E_i$$

énergie consommée par les ménages et l'industrie non énergétique

données d'entrée

données d'entrée

= ?



- Etape 2 : décrire le secteur de production d'énergie comme un secteur économique en attribuant à chaque technologie un prix à l'énergie vendue, un rendement du capital, un taux d'emploi, ...
- Etape 3 : couplage entre le secteur de production d'énergie défini par un scénario et le secteur de production économique

Option 1

Investissement énergétique fixé par le scénario

→ n technologies = secteur unique produisant comme bien de consommation l'énergie nette Q_E consommée pour la construction du capital et la production de biens de consommation non énergétiques
⇒ Y_E l'énergie finalement disponible pour les ménages

Option 2

Investissement énergétique fixé par la capacité de l'économie à investir dans la transition énergétique

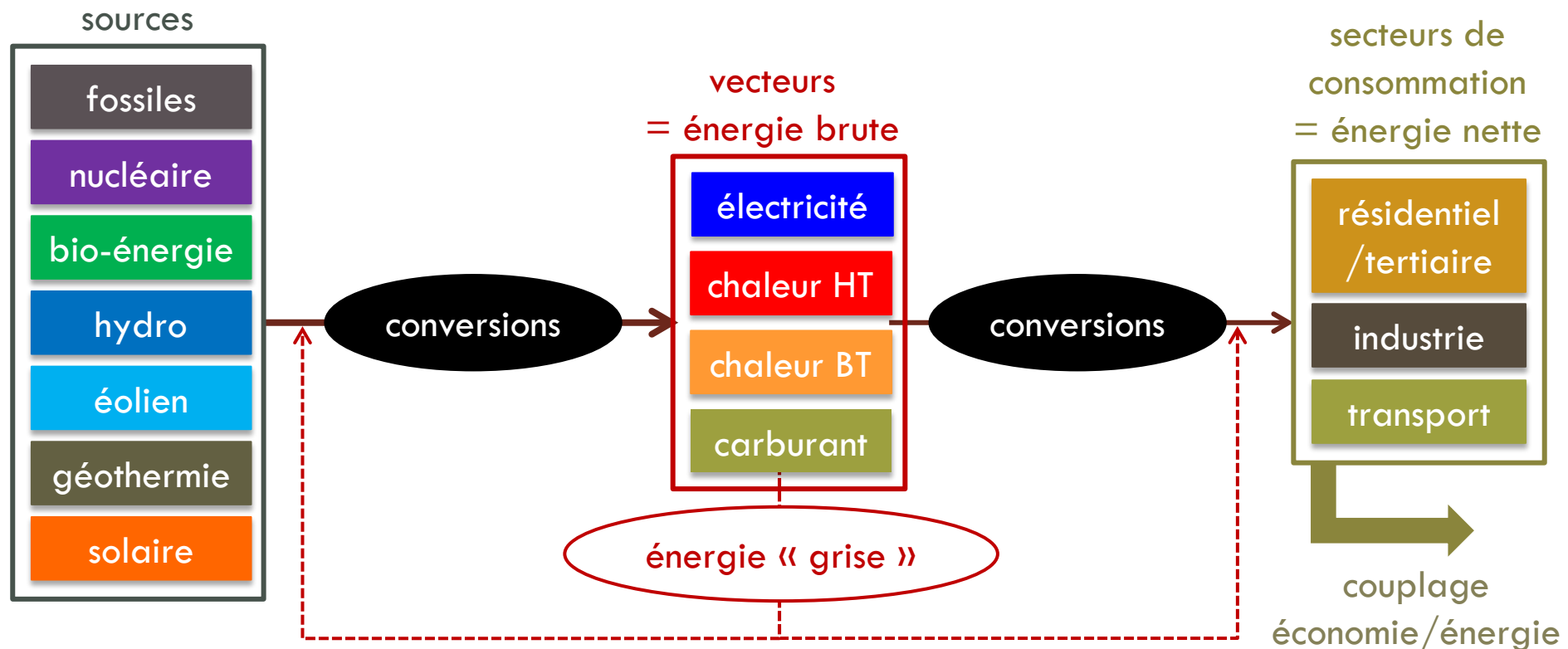
→ Investissement total ventilé entre les différentes technologies pour produire l'énergie sur des critères économiques (profits, rentabilité, ...)
⇒ Analyser la cohérence entre l'investissement alloué à la production d'énergie et les besoins en énergie de l'économie

⇒ Dans les 2 cas : modèles du coût de l'énergie et d'investissements

Actions réalisées & premiers résultats

8

- Elaboration d'un modèle commun et transposition des grandeurs économiques en grandeurs énergétiques
- Application au secteur de production d'énergie
 - ▣ Analyse de scénarios pour identifier un ensemble de technologies « source – **vecteur** – énergie utile »



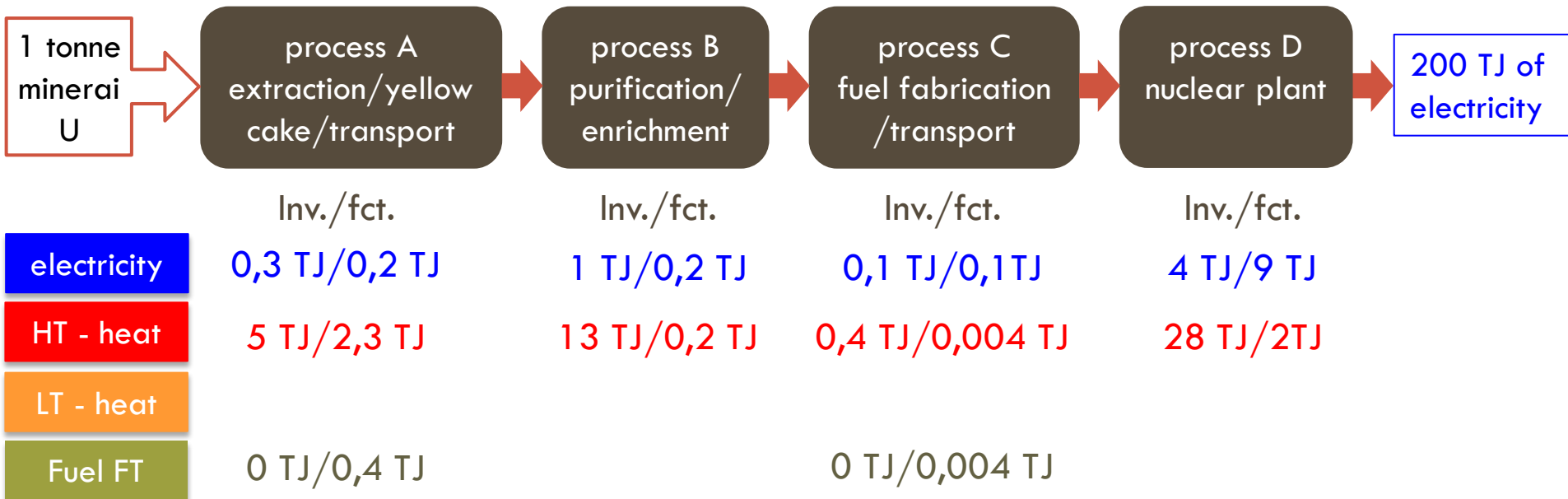
Actions réalisées & premiers résultats

9

□ Application au secteur de production d'énergie

■ Premières estimations de l'énergie « grise » consommée pour les technologies « source – vecteurs » ~ 30 technologies identifiées

- Approche inspirée de l'ACV pour définir les principales étapes depuis l'extraction jusqu'à la production
- Investissement calculé sur la base de l'énergie consommée sous la forme des différents vecteurs pour fabriquer les matériaux de construction des installations et de leurs équipements
- énergie consommée sous la forme de différents vecteurs pour le fonctionnement des installations



□ Application au secteur de production d'énergie

□ Quantités à déterminer pour chaque technologie « source – vecteurs »

- $E_{cons.,vecteur}^{Ki}$: énergie consommée sous forme de chaque vecteur/unité de capital (joules)
- $E_{cons.,vecteur}^{Op_i}$: énergie consommée sous forme de chaque vecteur pour le fonctionnement (joules)
- $E_{prod.}^{tech_i} = P_{crête} \times \text{facteur de charge} \times 1 \text{ year} \left(\frac{\text{joules}}{\text{an}} \right)$
- Durée de vie τ (années)

□ Pour chaque technologie « source – vecteurs »

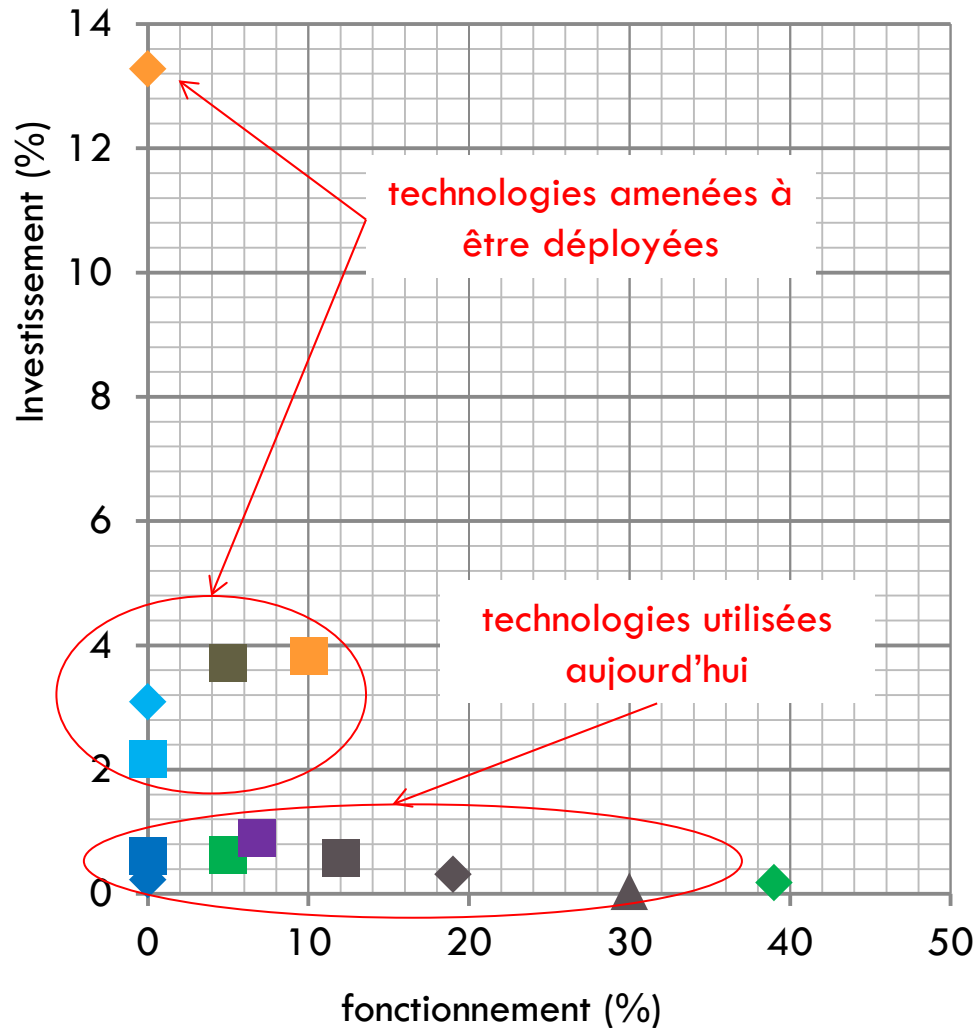
$$\text{investissement (\%)} = \frac{\text{investissement énergétique total/capital unit}}{\text{énergie totale produite/capital unit}} = \frac{\sum_{\text{vecteur}} E_{cons.,vecteur}^{Ki}}{E_{prod.}^{tech_i} \times \tau}$$

$$\text{fonctionnement (\%)} = \frac{\text{énergie totale consommée pour le fonctionnement}}{\text{énergie produite}} = \frac{\sum_{\text{vecteur}} E_{cons.,vecteur}^{Op_i}}{E_{prod.}^{tech_i}}$$

Energie « grise » / investissement vs fonctionnement

11

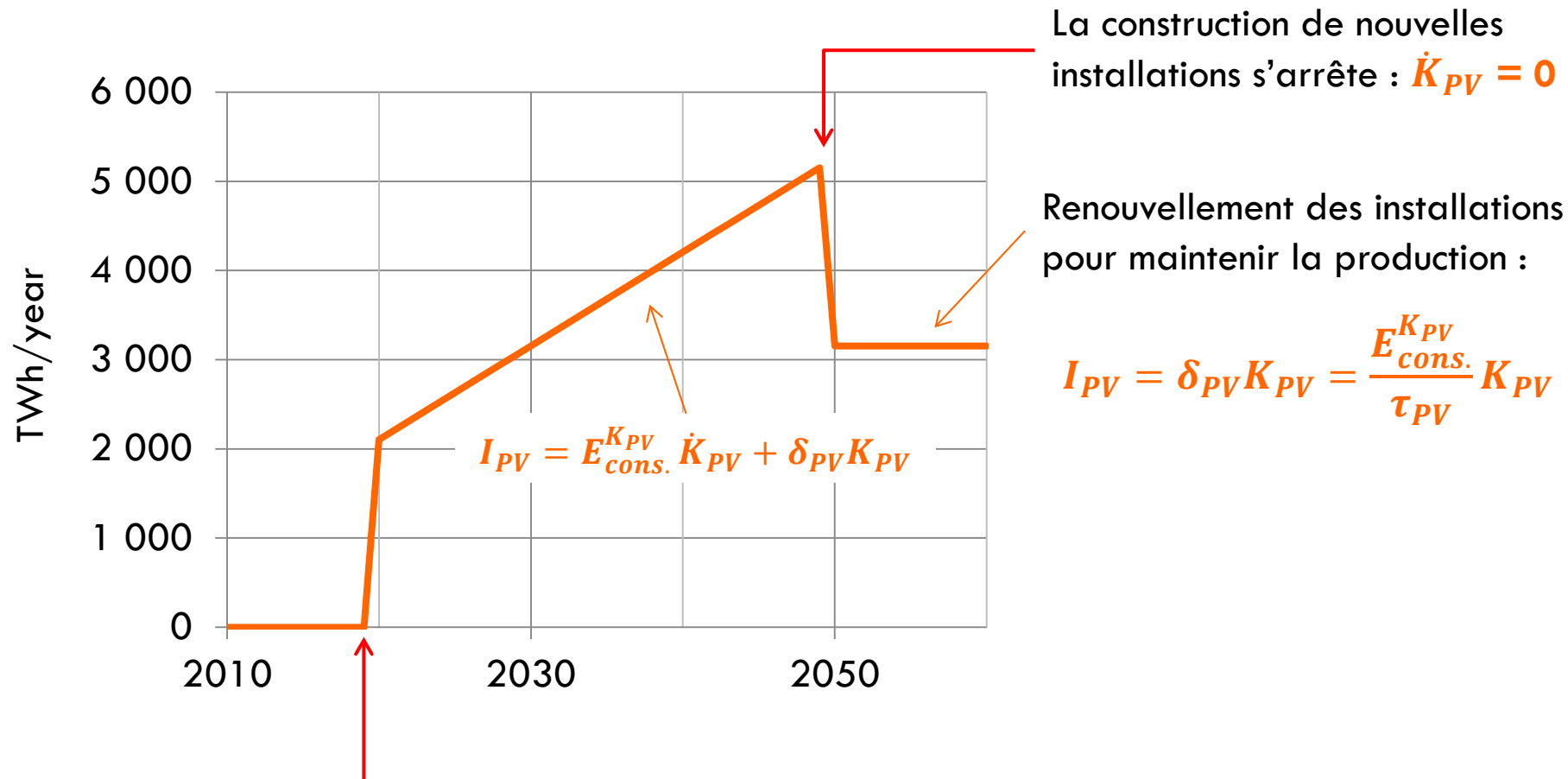
□ Exemple « sources – **électricité** »



- coal
- ◆ oil
- ▲ gas
- wood
- ◆ bio-waste
- hydro dam
- ◆ hydro river
- nuclear
- wind onshore
- ◆ wind offshore
- geothermal
- conc. sol.
- ◆ PV

Life time (year)	Load factor (%)
20	85
20	85
20	85
20	85
20	85
80	30
80	85
40	85
20	20
20	20
20	85
20	40
20	20

- Exemple d'un déploiement « linéaire » du photovoltaïque



- Construction de nouvelles unités de production = $\dot{K}_{PV} > 0$

→ énergie consommée pour la construction = $E_{cons}^{K_{PV}} \cdot \dot{K}_{PV}$

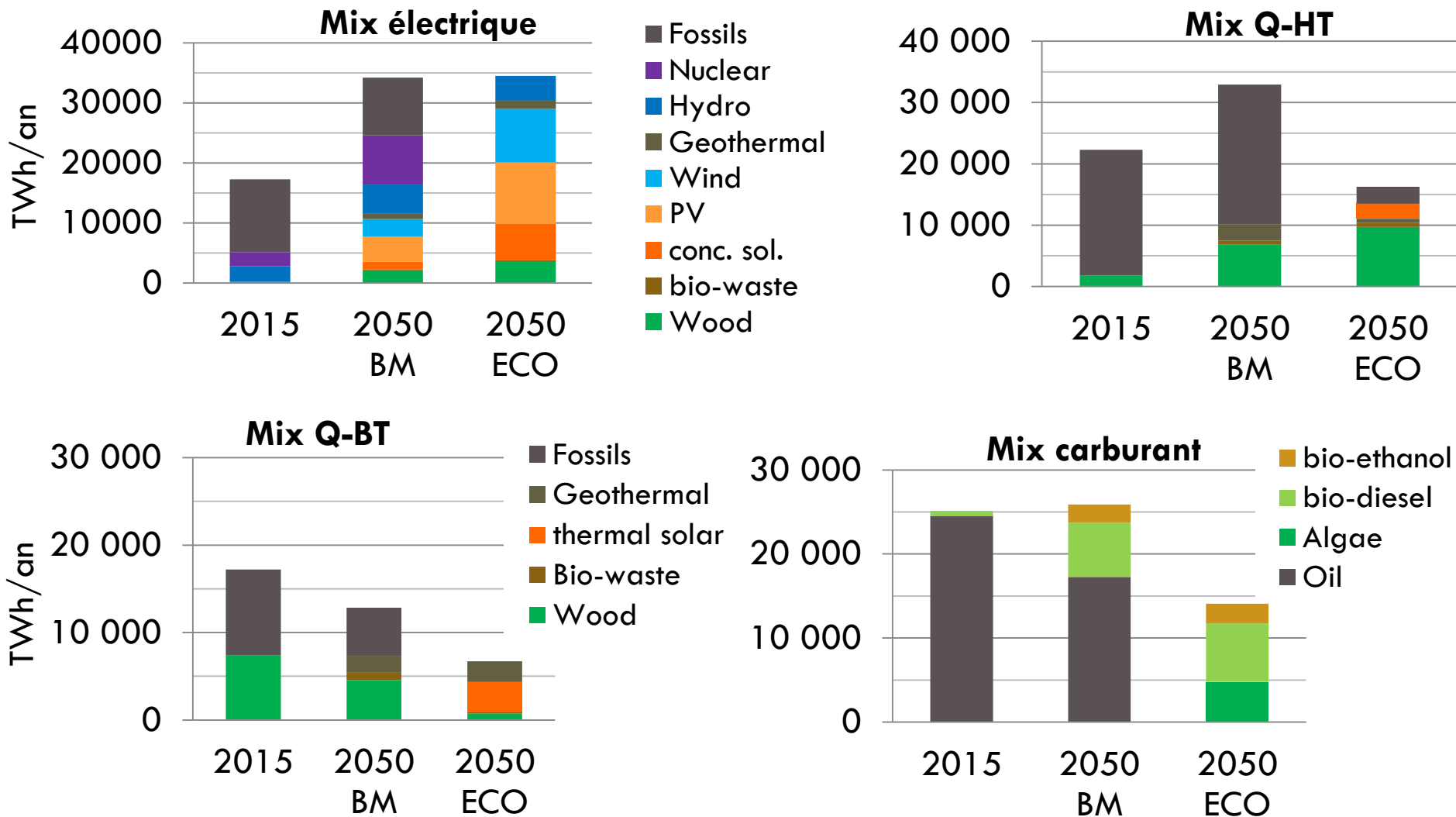
- Énergie « capitalisée » pour remplacer l'installation en fin de vie = $\delta_{PV} K_{PV}$

Actions réalisées & premiers résultats

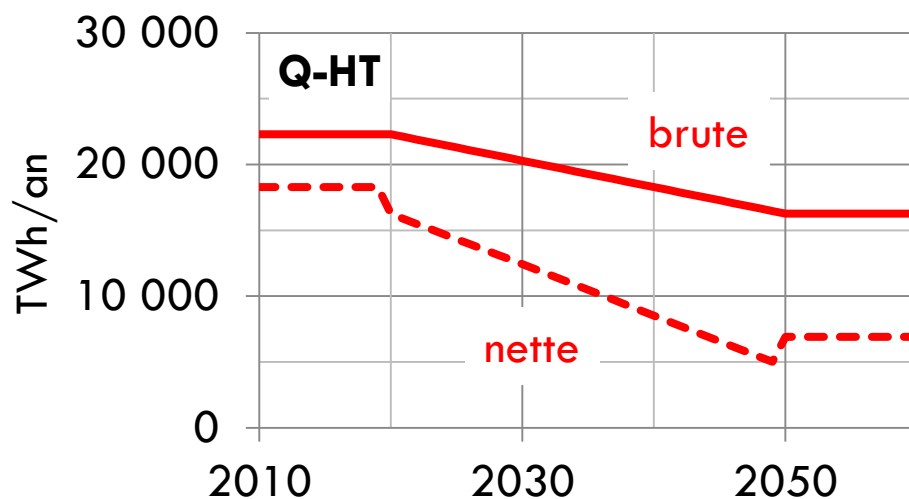
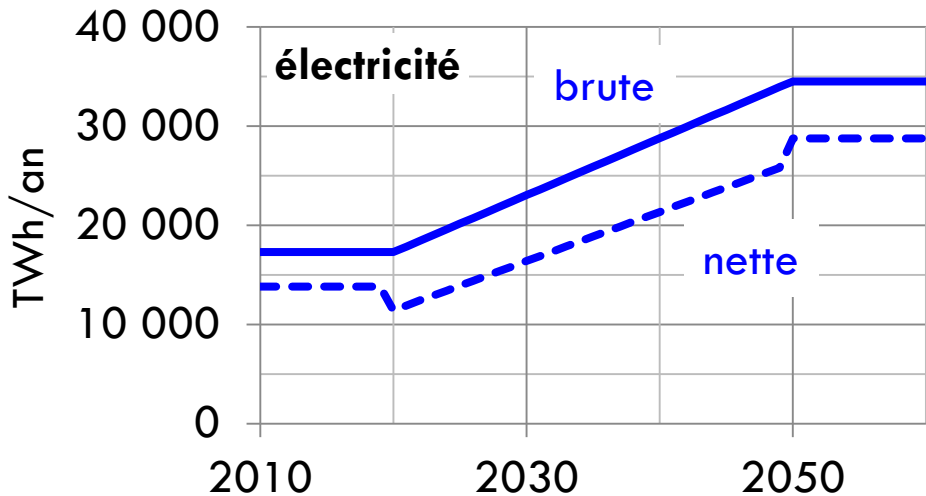
13

□ Sensibilité du modèle à différents scénarios : BLUE Map – AIE & ECOFYS – WWF

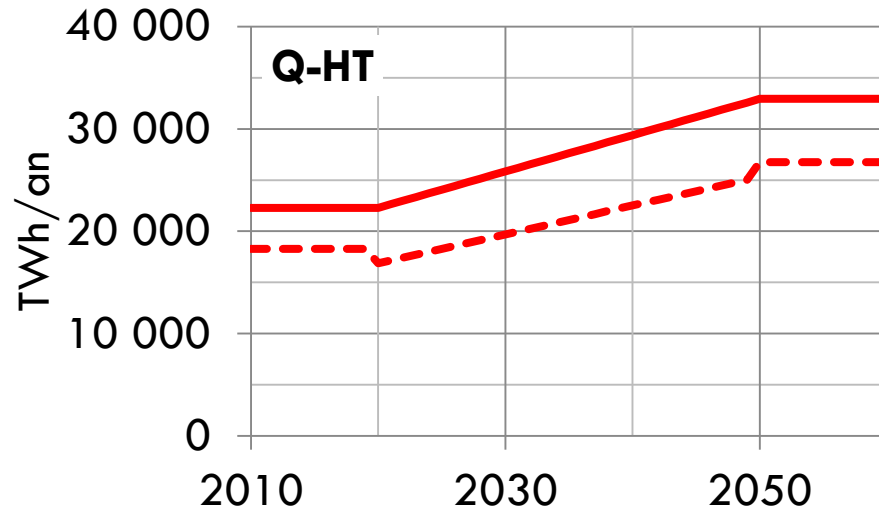
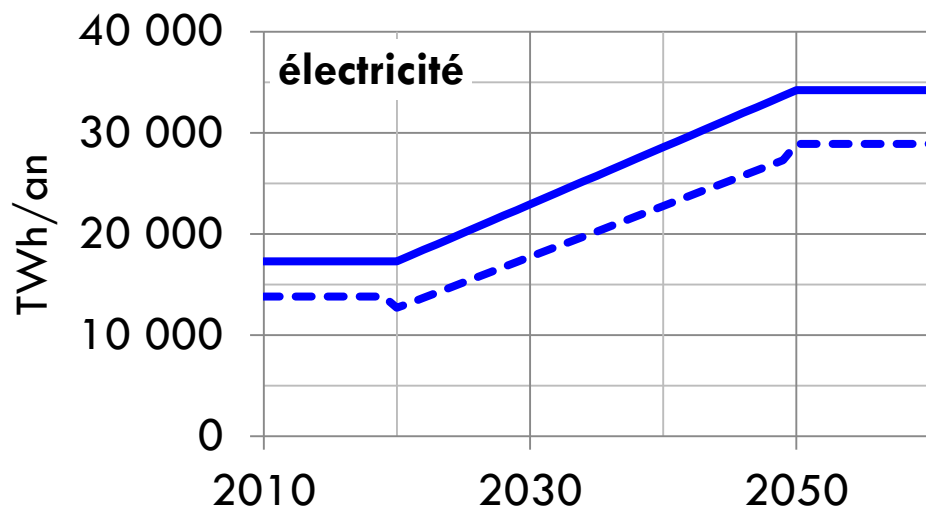
→ Même objectif : réduction des émissions de CO₂



Scénario ECOFYS

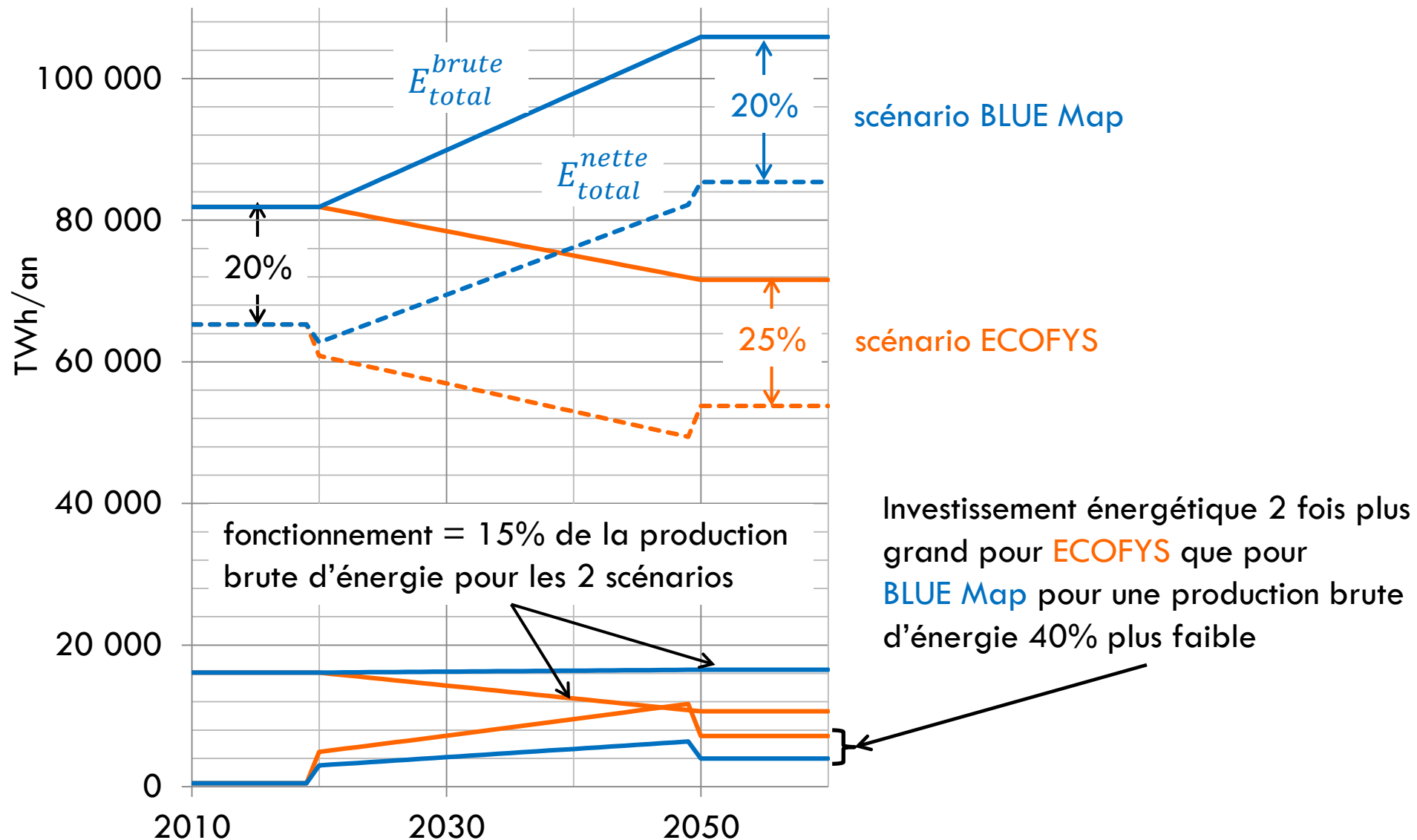


Scénario BLUE Map



Sensibilité du modèle aux scénarios

- Comparaison énergie brute/énergie nette totale & investissement/fonctionnement



- Développement d'une modélisation dynamique partagée pour une analyse physique & économique des scénarios de transition
- Modélisation codée et testée sur 2 scénarios mondiaux
- Sensibilité de la modélisation pour analyser les scénarios démontrée
 - ▣ identification d'un ensemble de technologies commun à une grande majorité de scénarios
 - ▣ base de données préliminaire pour déterminer l'énergie « grise » dédiée à l'investissement et au fonctionnement des installations
 - ▣ méthodologie développée pour transcrire le contenu d'un scénario dans la modélisation
- Article « *Physical assessment of energy transition scenarios – Methodology and application to a study case* », S. Bouneau et al., à soumettre
- Master's thesis « *Physical Analysis of Energy Scenarios* », L. Eychène, master's degree in Energy Engineering, Centrale Paris/Escuela técnica superior de ingenios industriales, Institut de Physique Nucléaire
- Technical report « *Physical Analysis of Energy Scenario* », Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, en cours de finalisation
- Séminaire ANCRE-GP3, conférence invitée - Ecole des Houches « Science & Energy »

CAUSE 2016 14k€ + OASIC 2017 8k€

Ateliers + missions 10 k€

Maison économie Paris

IsTerre Grenoble

LRGP Nancy

Subatech Nantes

CEA-LITEN Grenoble

Bases de données énergie et économie 12 k€

Enerdata, ONU

+ Stages 2016 - 3 mois (L3) + 2017 - 6 mois (M2)

- Base de données sur l'énergie « grise » à compléter et consolider
 - ▣ À prendre en compte
 - Stockage pour l'électricité intermittente
→ *collaboration avec le CEA – Liten (Grenoble)*
 - Technologie de capture et séquestration du CO₂
 - Installations pour la conversion « **vecteur** – **énergie utile** » (transport de chaleur et d'électricité, pompe à chaleur, chauffage, ...)
 - ▣ Grande disparité des valeurs dans la littérature et les différentes bases de données
 - Consortium d'experts académiques et industriels sur les différentes technologies
→ construction d'une base de données pour les échanges futurs et la collecte de données
- Finaliser l'analyse de quelques scénarios mondiaux (GIEC, AIE, IIASA, ...)
- Etude de sensibilité de l'analyse de scénarios en fonction des paramètres de la modélisation (énergie grise, durée de la transition, durée de vie des installations, ...)

- Mise à disposition d'un outil d'analyse des scénarios à destination des "scénaristes", des économistes et des physiciens, avec une interface facilitée

- Dans la modélisation du secteur de production d'énergie, intégrer les ressources en matière première (cuivre, silice, terres rares, ...)
→ *Collaboration avec IsTerre (Grenoble)*

- Analyse économique du secteur énergétique et mise en oeuvre de son couplage avec le secteur économique
→ *Poursuivre et développer la collaboration entre physiciens et économistes - Centre d'économie de la Sorbonne, Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes-Atlantique, Subatech-Institut des Mines Telecom Atlantique*