

# Trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût.

Dynamiques et coûts d'abattement moyens  
(D - CAM)

---

**Baptiste Perrissin Fabert (CGDD)**  
**Alexis Foussard (CGDD)**  
**Décembre 2016**



Crédit photo : Arnaud Bouissou/MEDDE

# Le programme

**I – Présentation de l’outil D-CAM**

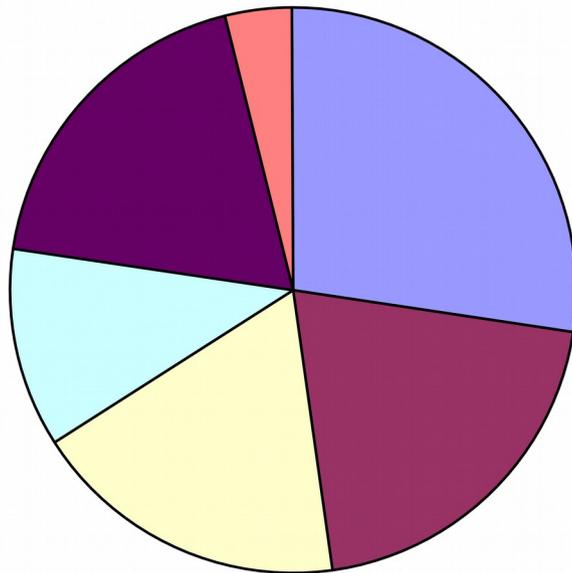
**II – Résultats sectoriels**

**III – Résultats agrégés**

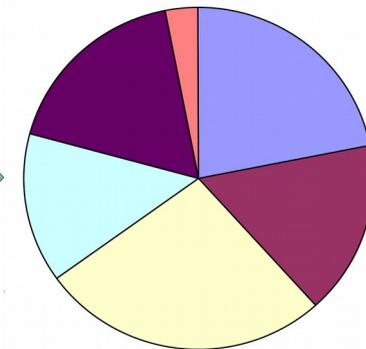
**IV – Utilisation et développements futurs**

# Un outil micro-économique pour tracer des chemins efficaces vers l'objectif du facteur 4 en 2050

**2014**  
459 MtCO<sub>2</sub>eq

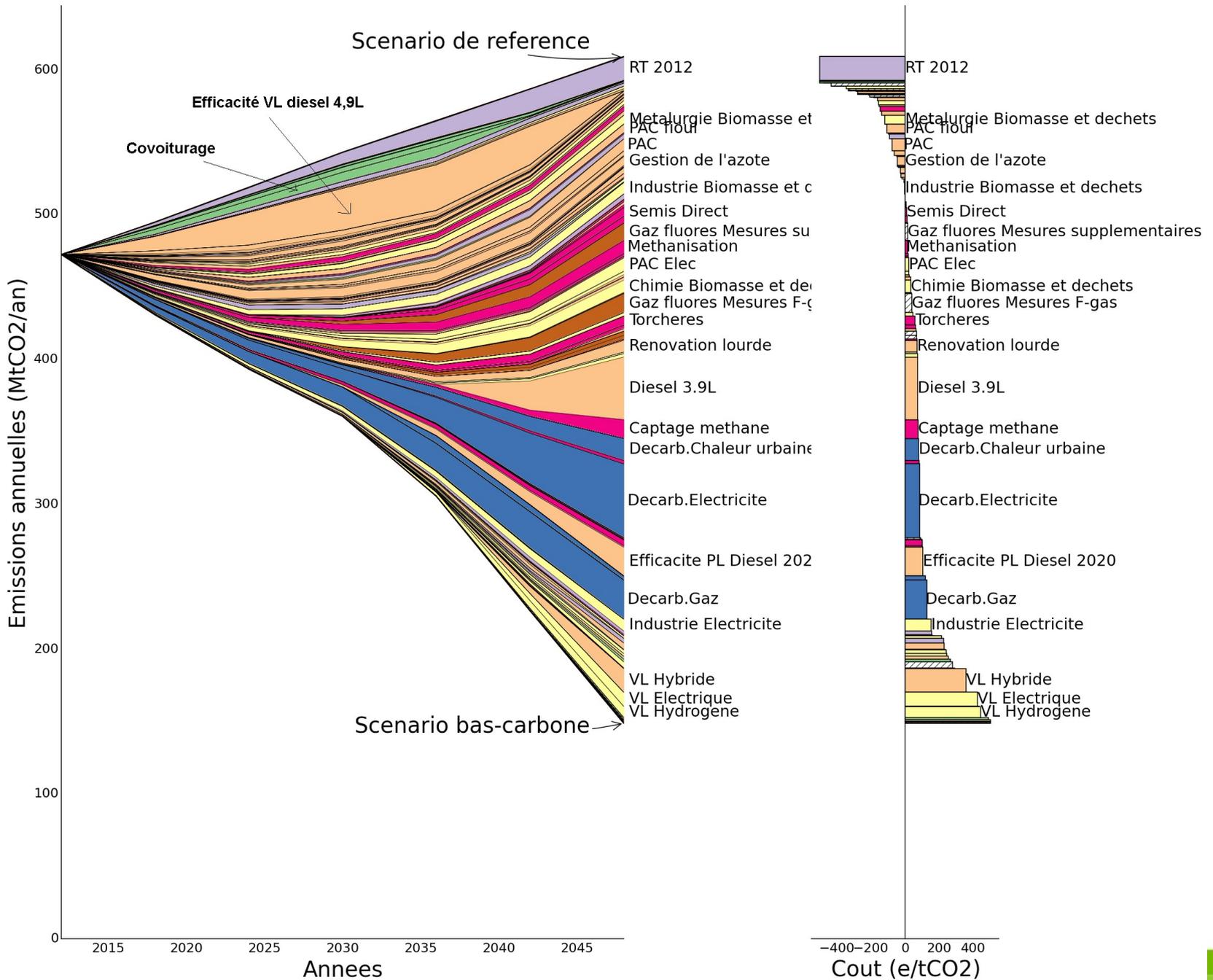


**2050**  
138 MtCO<sub>2</sub>eq

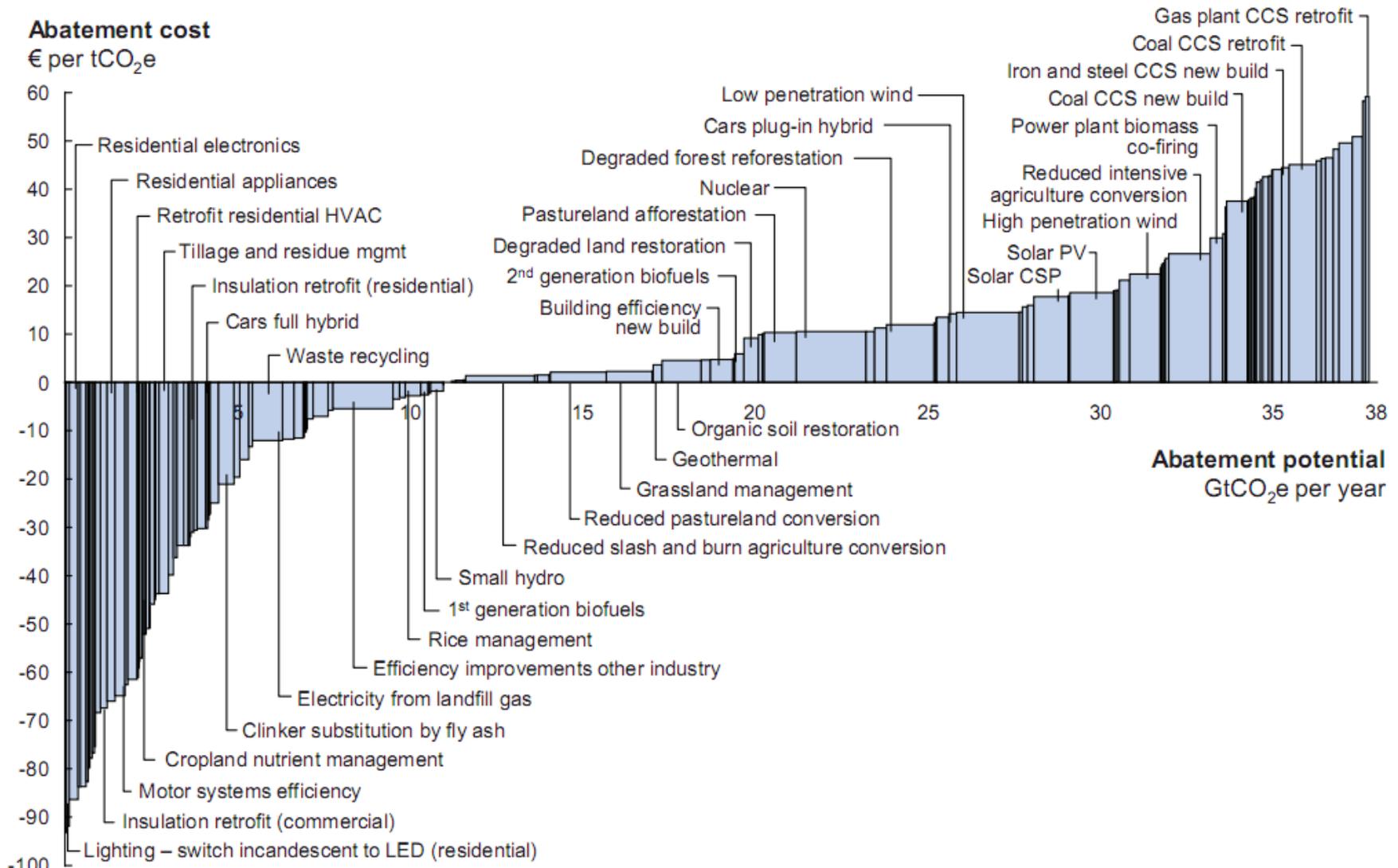


Quels gisements ?  
Quelle chronique de déploiement ?  
Quelle répartition sectorielle ?  
Quel coût ?

# Une D-CAM est un dessin



# Plus connu dans sa version statique



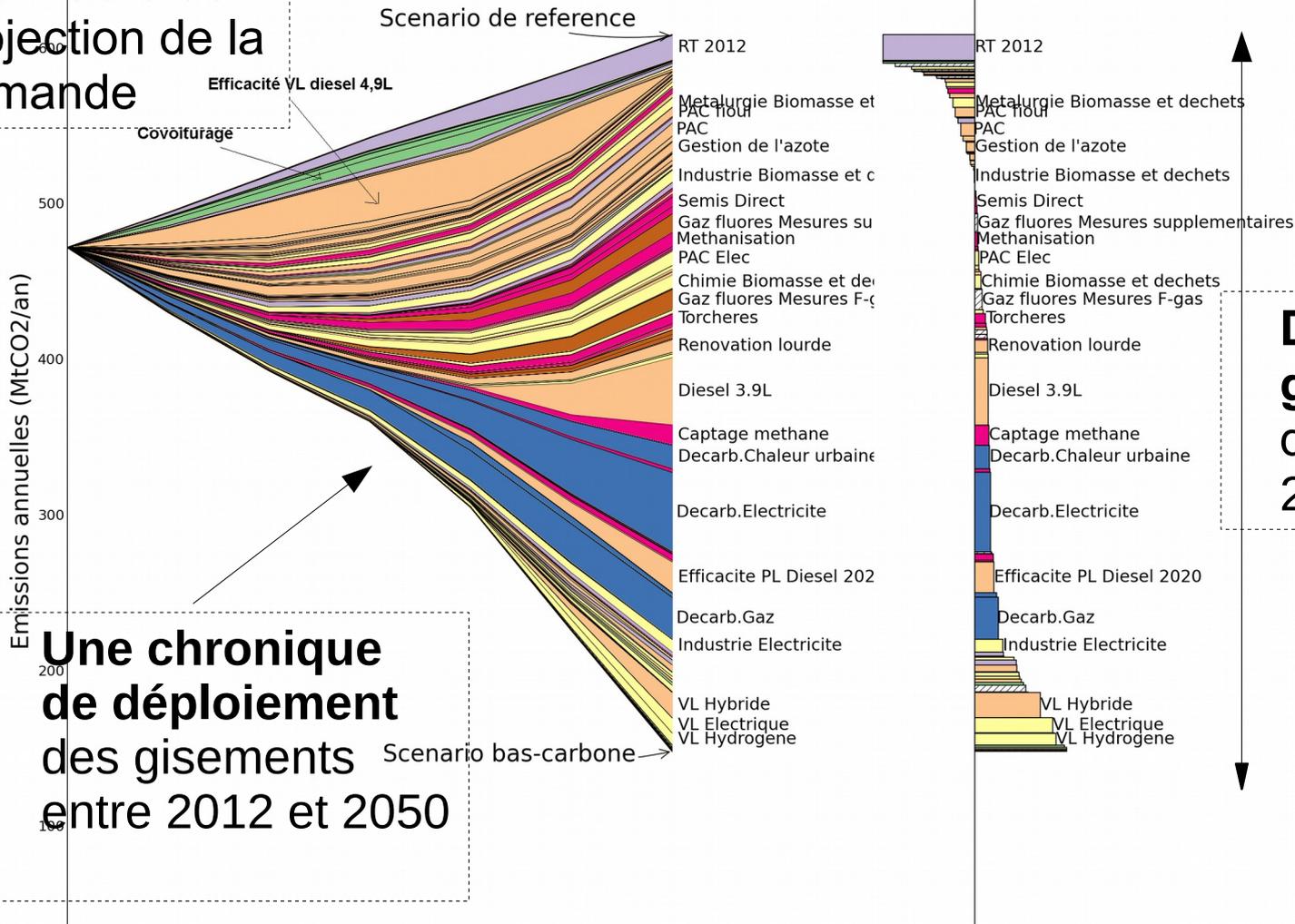
Source : McKinsey (2009)



# Plus utile dans sa version dynamique

**Un point de comparaison:**  
 techno figées + hyp macro de projection de la demande

**Des coûts moyens de ↓CO2 entre 2022 et 2050 en €/tCO<sub>2</sub>**



**Des gisements de ↓CO2 en 2050**

**Une chronique de déploiement des gisements entre 2012 et 2050**



# Une base de données transparente

(>500 mesures dans 6 secteurs)

Nature des gisements	Mesures de ↓CO2 au sein des 6 secteurs	Potentiels par rapport à l'utilisation actuelle	Vitesse maximale de diffusion	Coûts unitaires par rapport aux techno équiv du scénario de ref
<b>Comportement</b>	Télétravail	75 Gkm.voy	20 ans	0
<b>Efficacité énergétique</b>	Efficacité PL diesel 2020	340Gt.km	20 ans	20€/1000t.km
<b>Structure de la demande</b>	LGV nouvelles infra	55Gkm.voy	40 ans	159€/1000km
<b>Changement énergie</b>	Voiture électrique	28 % du parc en 2050 ou 177Gkm	40 ans	Coûts décroissants dans le temps
<b>Décarbonation de l'énergie</b>	Incorporation bio caburant	10000TWh	20 ans	86€/MWh
<b>Capture ou stockage</b>	CCS Gaz pour élec pointe	31 TWh	20 ans à partir de 2030	20€/MWh
<b>Autres</b>	...			

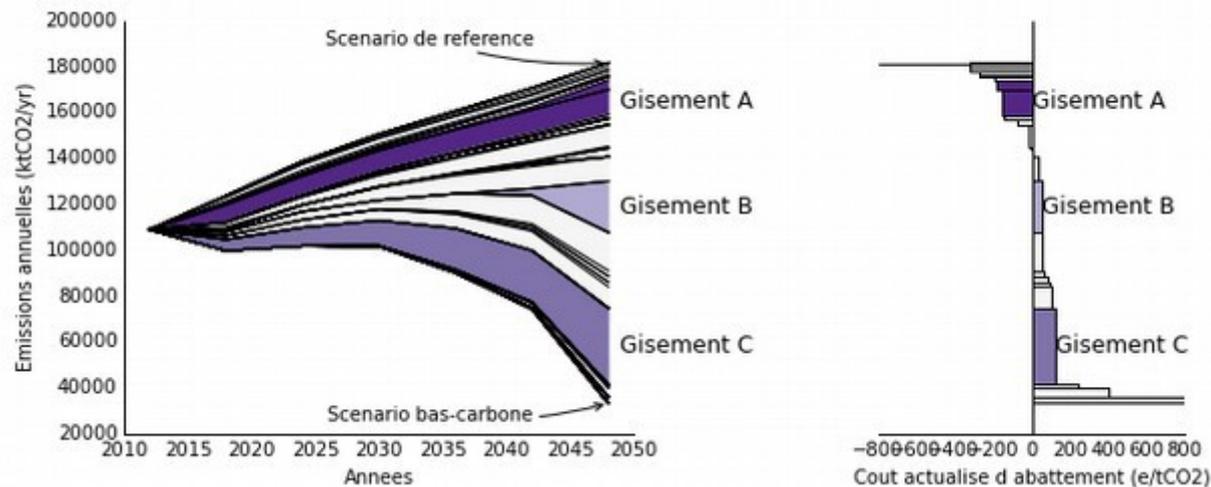
# Quelques précautions d'interprétation de la D-CAM

**C'est un dessin utile, en première approche, pour :**

- tracer des trajectoires de décarbonation
- Identifier des mesures à coût négatif qui ne sont pas encore exploitées
- Mesurer des ordres de grandeur de coûts
- Pointer des risques de verrouillage technologique

**Mais un dessin qui ne dit pas :**

- ce qu'est le coût marginal d'abattement, et donc le prix du carbone qui permettrait de déclencher l'ensemble des mesures requises pour atteindre le facteur 4
- qu'il faut déployer les mesures d'abattement par ordre de mérite ( $A < B < C$ )
- les co-bénéfices d'une mesure d'abattement



# Le programme d'optimisation

## Variables :

- utilisations  $a_{i,t}$  de chacune des technologies  $i$ , à chaque année  $t$

## Contraintes :

- Potentiel maximum :  $a_{i,t} < A_{max,i}$
- Vitesse maximale de diffusion :  $a_{i,t+1} \leq a_{i,t} + V_{max,i}$
- Projection des demandes :  $\sum a_{i(\text{secteur}),t+1} = D_{\text{secteur},t}$
- Contrainte sur les émissions totales en 2050 :  $\sum a_{i,2050} \cdot e_{i,2050} \leq GES_{max}$
- Équilibres entre offre et demande des différents vecteurs énergétiques
- Éventuellement : Point de passages annexes ou budgets sur les émissions

**Objectif de minimisation des coûts :**  $\text{Min} \sum_{i,t} \frac{a_{i,t} \cdot c_{i,t}}{(1+r)^t}$

# Calcul des coûts d'abattement moyens

## Les coûts d'abattement des mesures sont calculés *a posteriori*

- Coût moyen de la tonne évitée par la « mesure » sur toute la période
- Le coût d'abattement unitaire peut varier dans le temps sous l'effet du progrès technique

## Les coûts intègrent :

- Les investissements (CAPEX)
- Les coûts de maintenance et des énergies (OPEX)
- Pas les transferts entre agents (taxes) ni les externalités

$$CAM = \frac{\sum_t (c_{i,t} - c_{ref}) \cdot a_{i,t} / (1 + r)^t}{\sum_t (e_{i,t} - e_{ref}) \cdot a_{i,t} / (1 + r)^t}$$

Source : GIEC (2014)

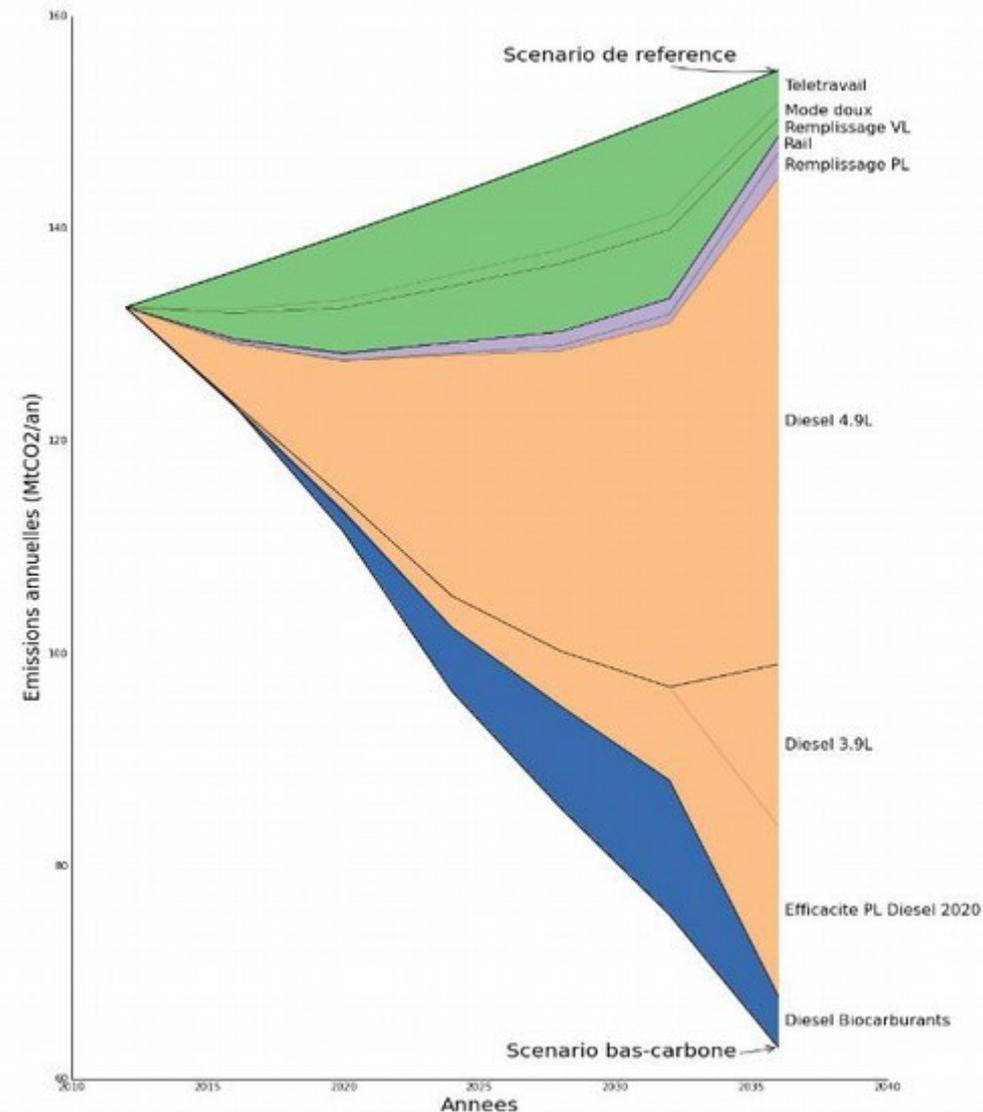
# Décomposition des réductions

## Prise en compte des interactions entre

- réduction de la demande,
- changement d'énergie,
- efficacité énergétique
- décarbonation des vecteurs

## Utilisation de la méthode LMDI

- Attribue les réductions à ces différents effets
- Permet d'obtenir des gisements additifs



# Le programme

**I – Présentation de l’outil D-CAM**

**II – Résultats sectoriels**

**III – Résultats agrégés**

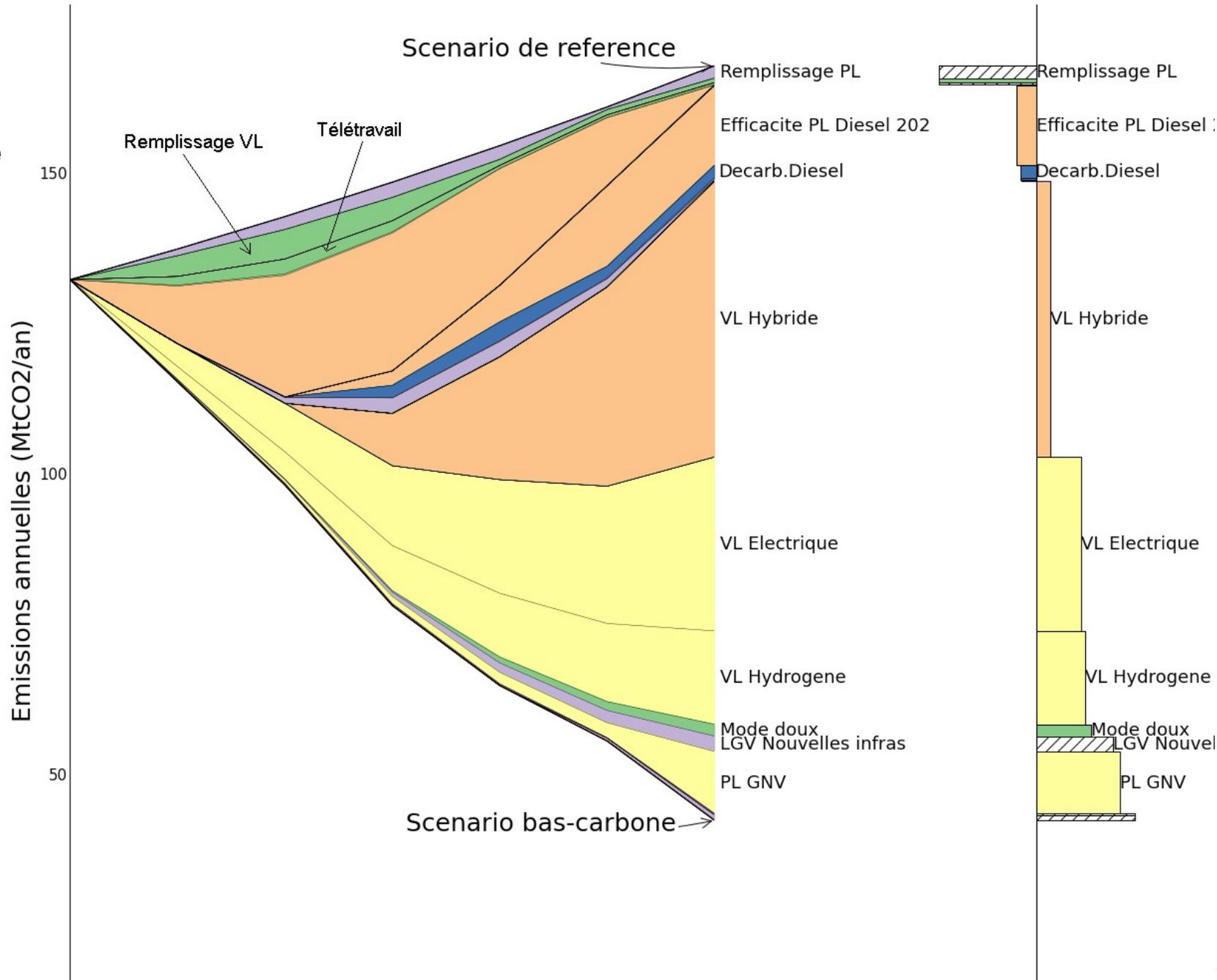
**IV – Utilisation et développements futurs**

# Transports, objectif ↓ 65 %

**Pas de prise en compte des externalités (qualité de l'air) ni des co-bénéfices (temps)**

## Véhicules :

- Coût à l'achat + distance d'utilisation + consommation (réelles)
- Progrès technique **sur les VE**

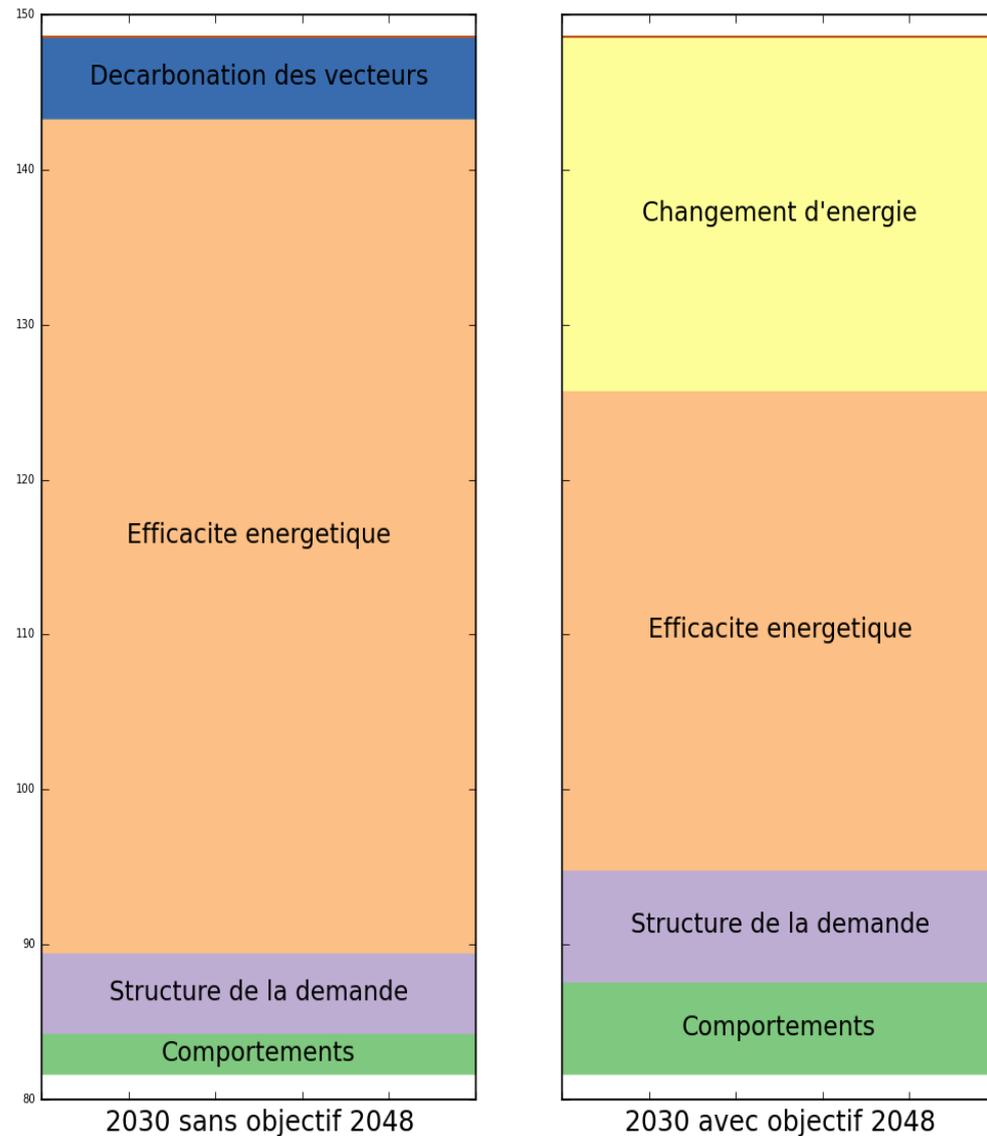


# Transports – types de mesures

**La chronique des gisements exploités sont différents selon l'horizon temporel considéré**

Avec l'objectif final de 2050, apparition de véhicules électriques / à hydrogène / au gaz avant 2030.

**Risque de lock-in !**



# Résidentiel-tertiaire, objectif ↓ 85 %

## Données

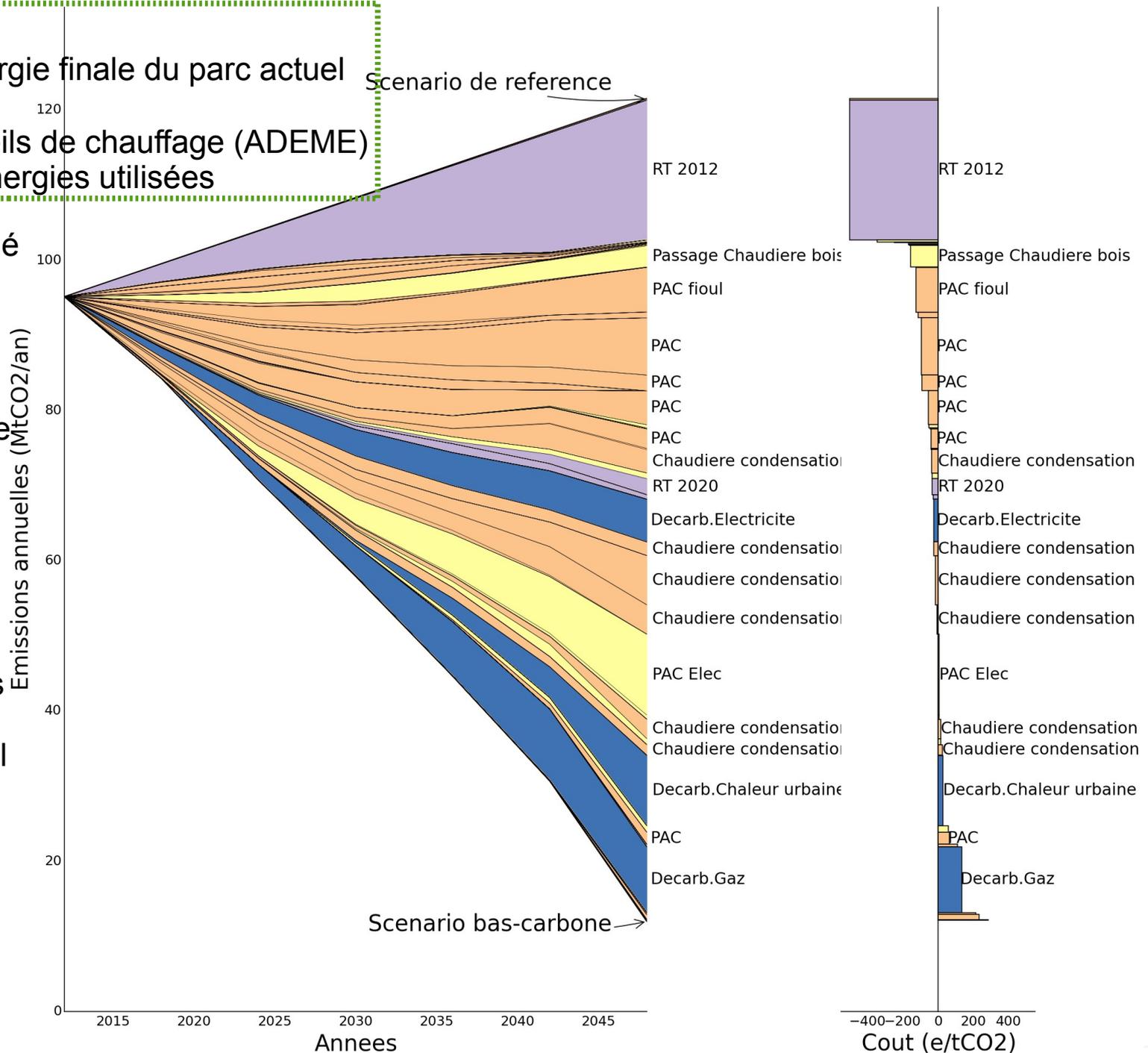
- consommations en énergie finale du parc actuel (CEREN)
- rendements des appareils de chauffage (ADEME)
- contenu en GES des énergies utilisées

• Parc existant désagrégé sur 3 niveaux de performance, et par énergie de chauffage

• Pas de prise en compte d'un d'effet rebond ni d'un gisement « comportement »

• Possibilités de changement d'énergie pour certains logements

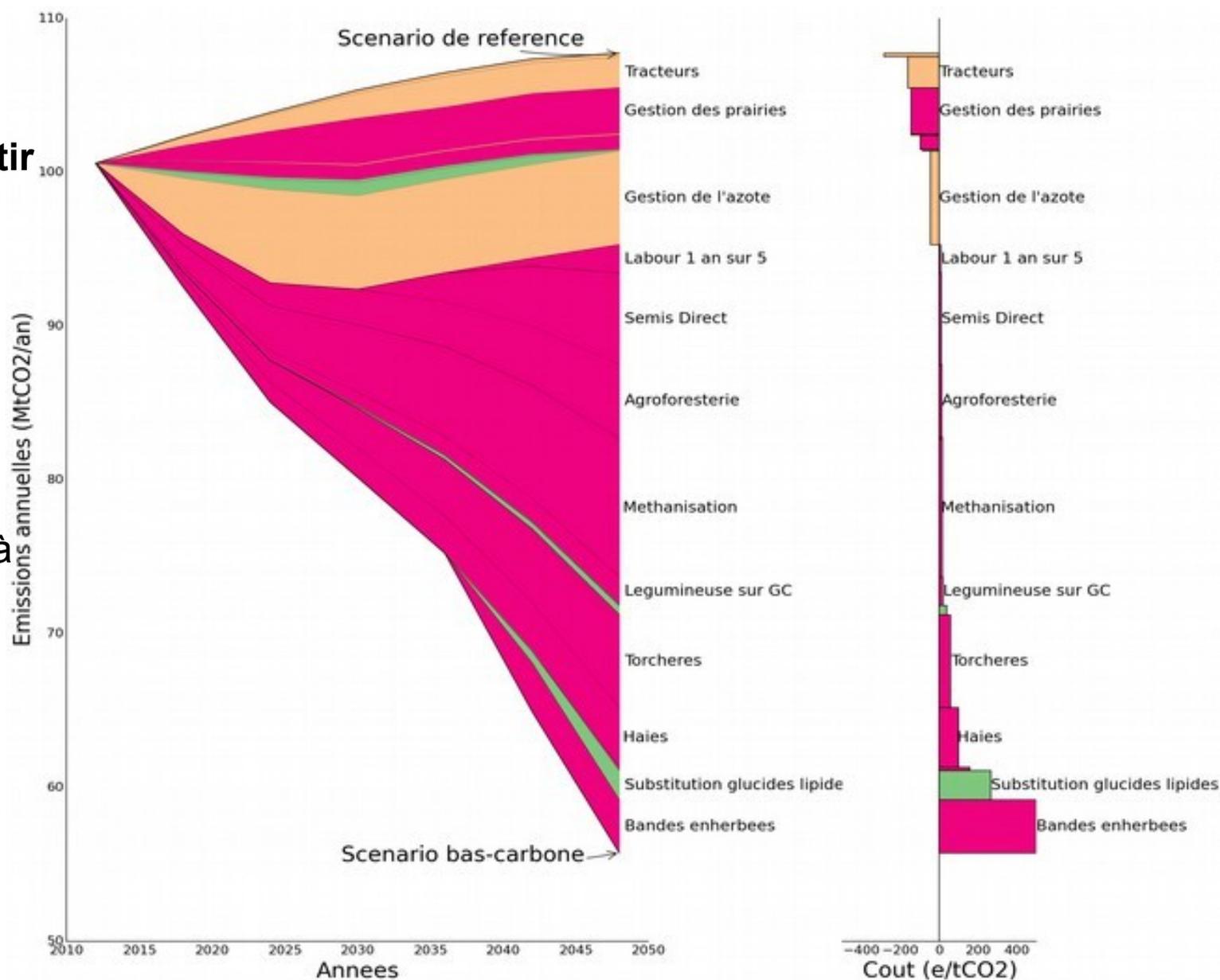
• Optimisation sur le seul critère CO2



# Agriculture : objectif facteur 2

Construite à partir  
des travaux de  
l'INRA (2015)

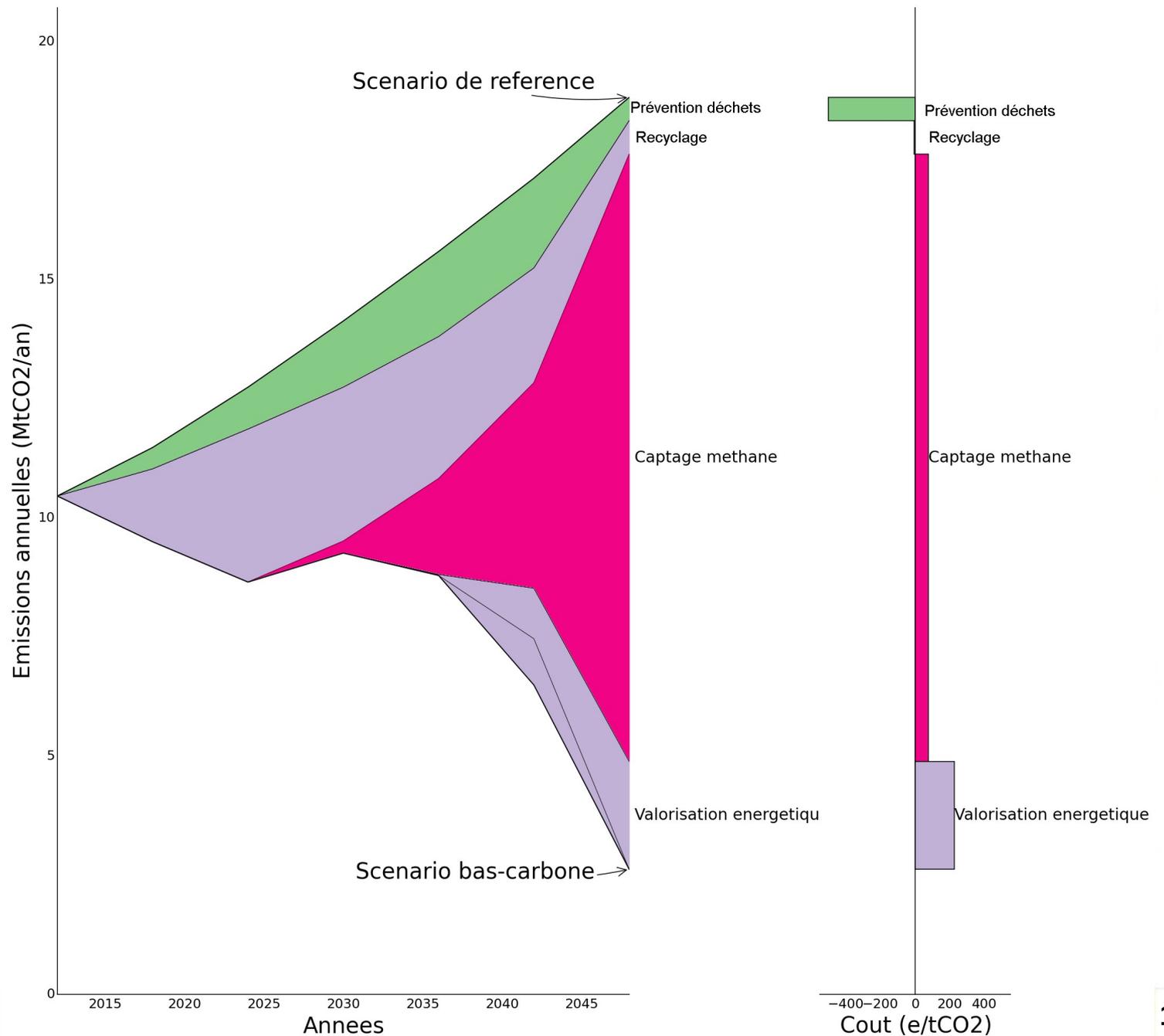
- Extraction de vitesses de diffusion
- Une partie des gisements liés à l'UTCf



# Déchets : objectif ↓ 78 %

1) ↓ des réductions associées à la prévention des déchets et au recyclage car ↓ des émissions unitaires de la destruction des déchets

2) Le captage du méthane permet une division par 3 des émissions des déchets mis en décharge



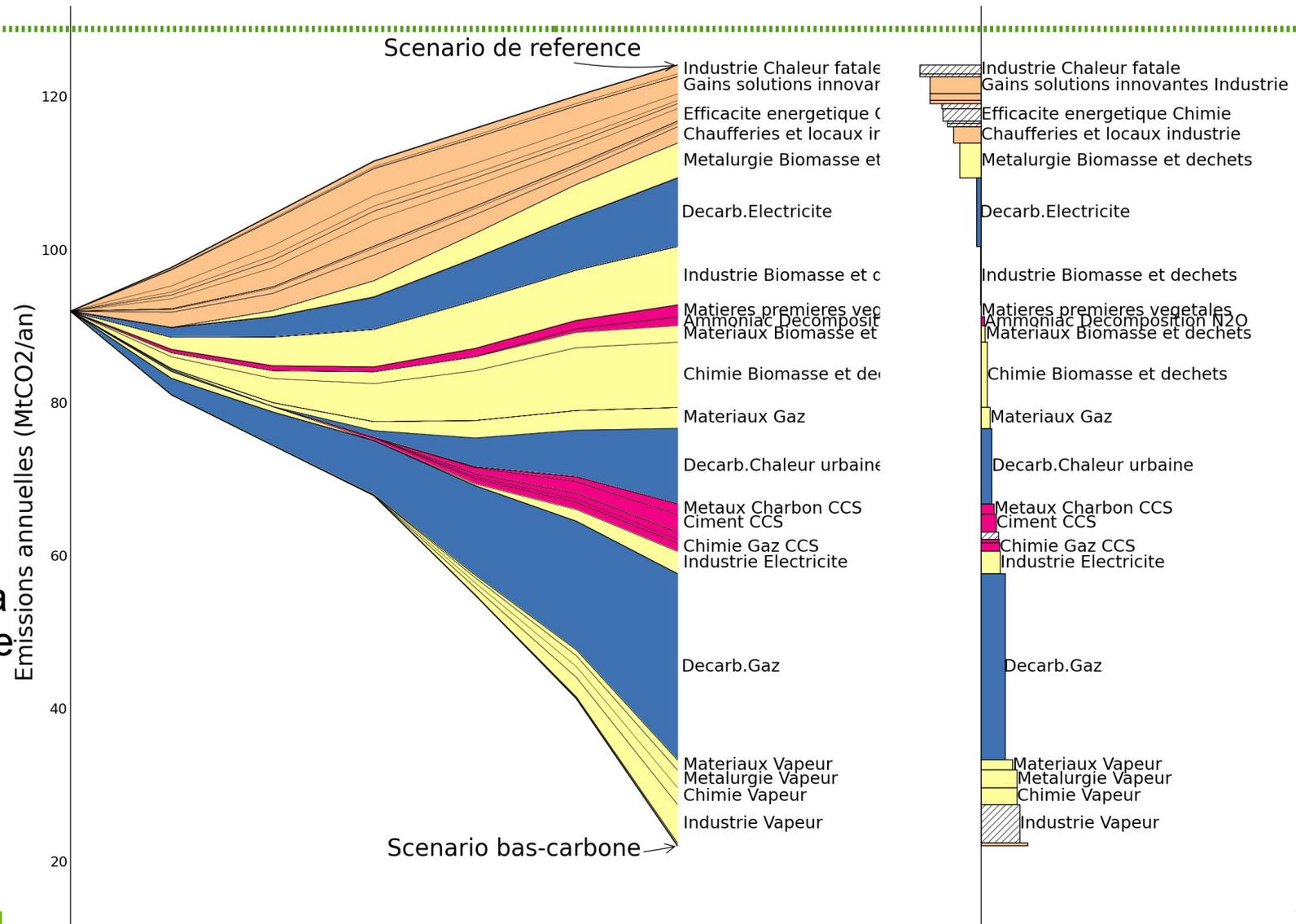
# Industrie

## Les principaux types de gisements considérés sont :

- (i) l'efficacité énergétique (étude ADEME / CEREN sur les gisements d'économies d'énergie)
- (ii) le changement de source d'énergie (source principale : trajectoires du DNTE)
- (iii) la décarbonation des sources d'énergie (chaleur, électricité, gaz)
- (iv) la capture et le stockage de CO<sub>2</sub> (source principale : AIE)

## Décomposition sur quatre secteurs

- Projection des productions physiques (métaux, matériaux, chimie)
- Projection de la VA pour le reste



# Énergie : un secteur spécifique

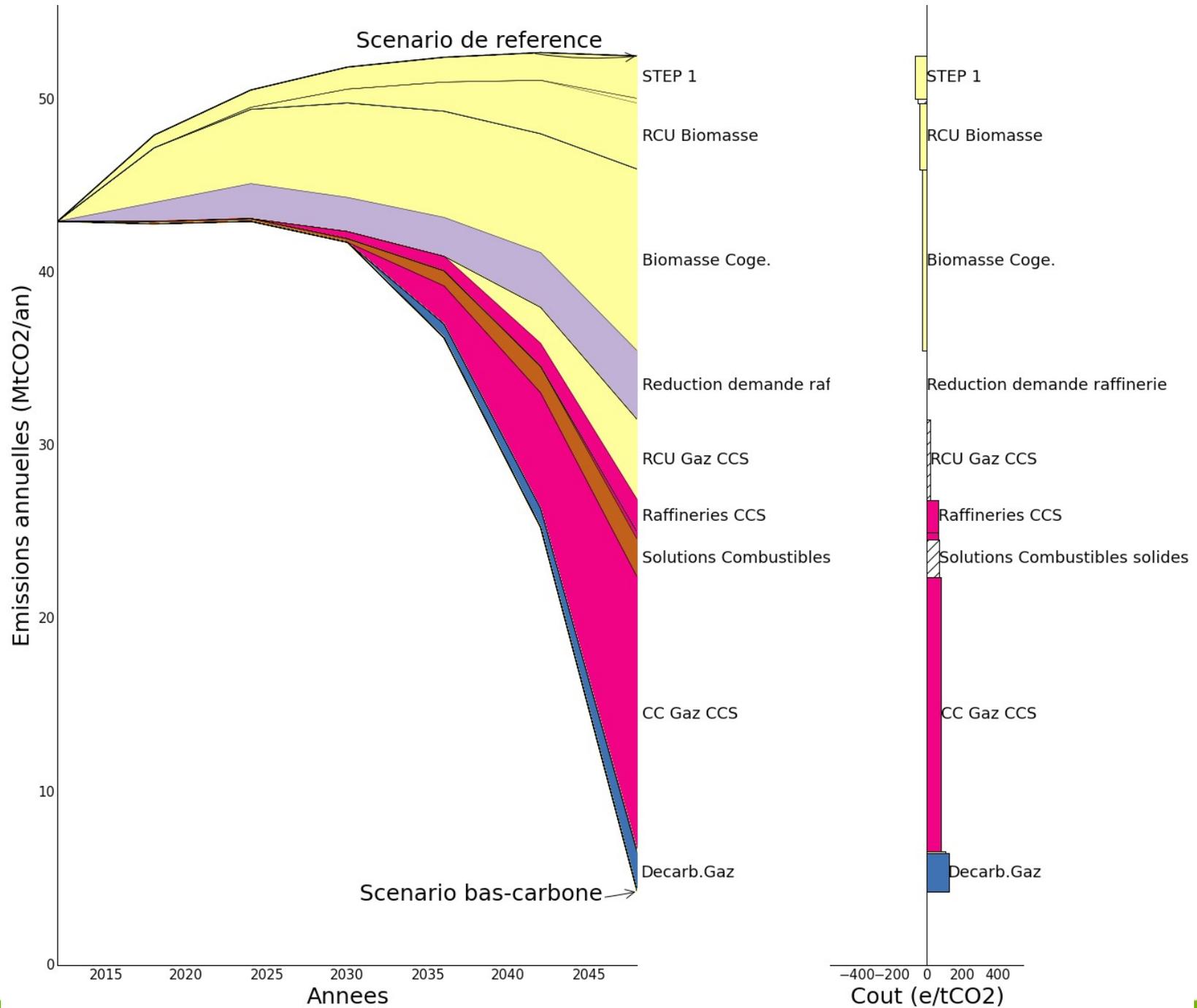
## Scénario de référence :

- La demande est relativement stable
- Dans une courbe agrégée, elle est issue des autres secteurs

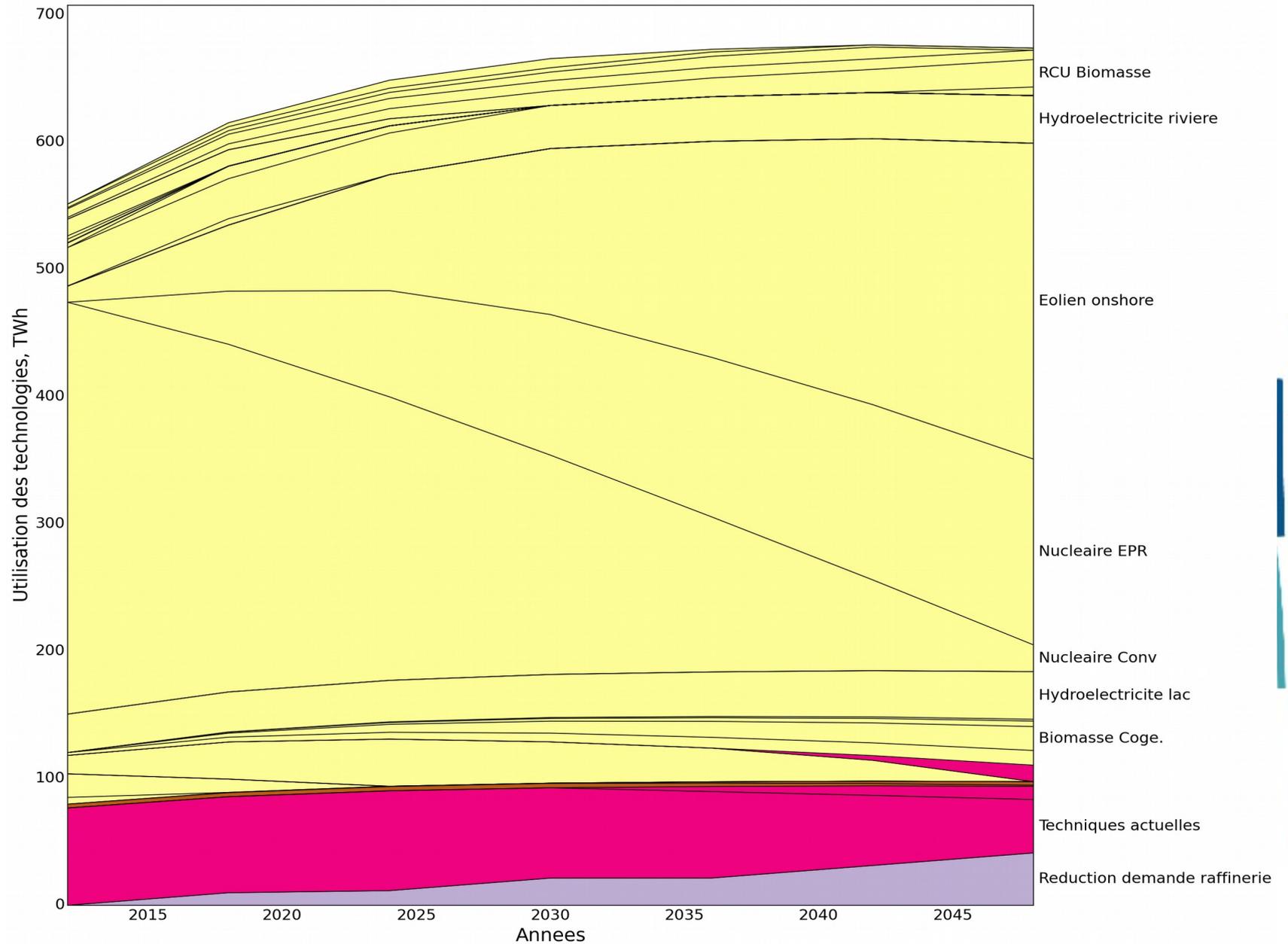
## Hypothèses :

- Deux demandes séparées
  - > une demande en électricité « de base » (avec des technologies bas-carbone)
  - > une demande en électricité par des capacités de pointe, pilotables (avec notamment des centrales à flamme, émettrices de GES)
- Une contrainte supplémentaire sur la réduction des capacités de production nucléaire.

# Énergie, objectif ↓ 93 %



# Evolution du mix électrique



# Le programme

**I – Présentation de l’outil D-CAM**

**II – Résultats sectoriels**

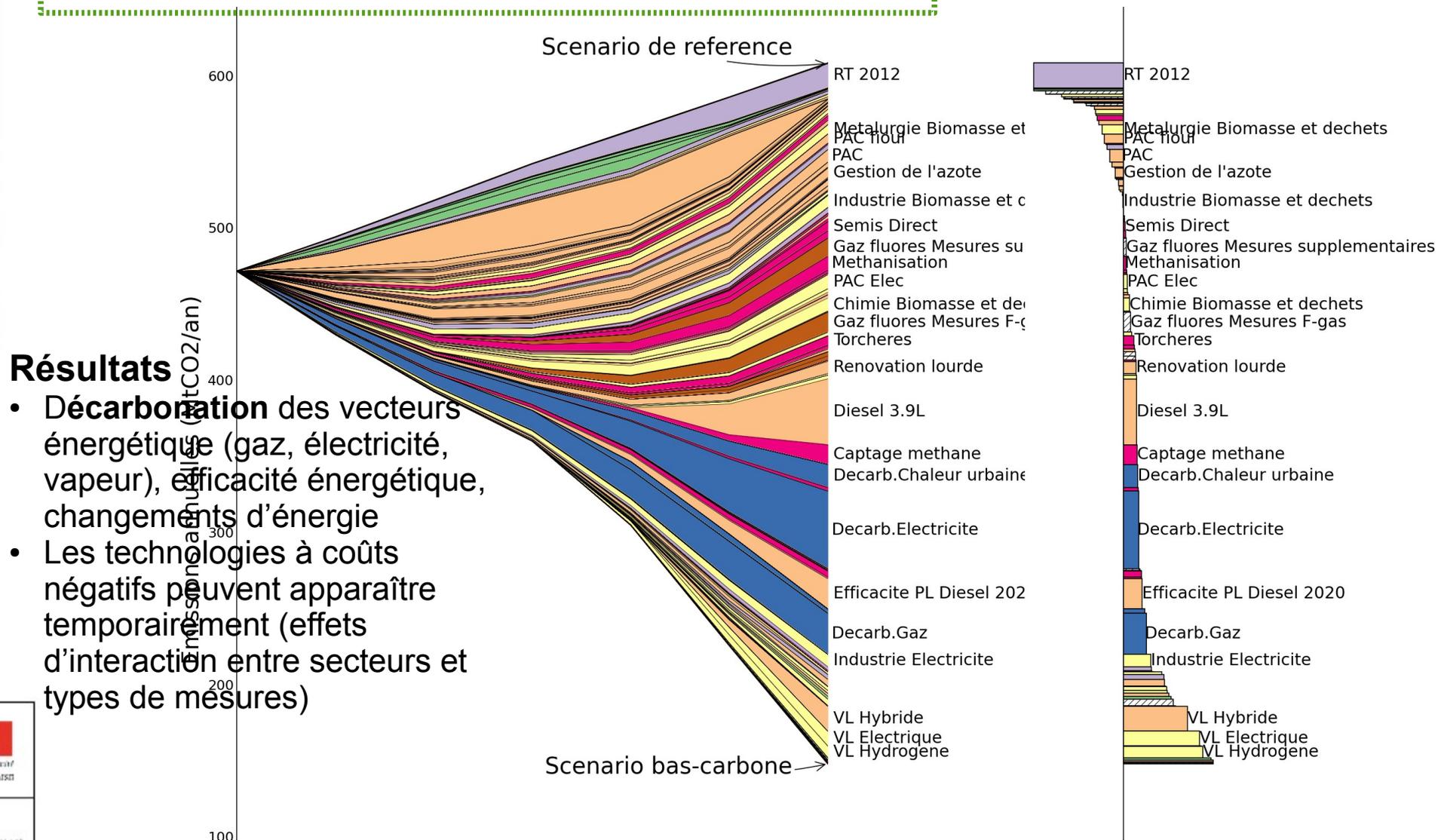
**III – Résultats agrégés**

**IV – Utilisation et développements futurs**

# D-CAM agrégée pour atteindre le facteur 4

## Méthode

Par construction : énergie consommée = énergie produite  
Analyse ex post de la répartition des efforts entre secteurs



## Résultats

- Décarbonation des vecteurs énergétique (gaz, électricité, vapeur), efficacité énergétique, changements d'énergie
- Les technologies à coûts négatifs peuvent apparaître temporairement (effets d'interaction entre secteurs et types de mesures)

# Répartition sectorielle des réductions d'émissions (Mt/CO2)

	Résultats agrégés		Objectifs sectoriels de la SNBC	
	2030	2050	2030	2050
<b>Énergie</b>	27	<b>103</b>	10	<b>48</b>
<b>Industrie</b>	34	<b>61</b>	44	<b>102</b>
<b>Agriculture</b>	26	50	26	50
<b>Bâtiment</b>	41	<b>93</b>	50	<b>109</b>
<b>Transport</b>	45	109	66	126
<b>Autre</b>	11	45	5	26
<b>Total</b>	<b>184</b>	460	<b>201</b>	460

Différences dues aux hypothèses sur l'existence d'émissions négatives dans le secteur de l'énergie

# Le coût (gain?) total de la transition bas carbone

	Coûts totaux des scénarios (en G€)						
	2012	2018	2024	2030	2036	2042	2048
<b>Coût total_fil de l'eau</b>	207	234	261	289	316	343	370
<b>Coût total_facteur4</b>	207	210	226	246	274	315	362
<b>Coût total_objectif-2030</b>	207	208	220	237			
<b>Coût total_sans-objectif</b>	207	208	220	235	255	277	300
	Coûts nets de la transition bas carbone (en G€)						
<b>Fil de l'eau – facteur 4</b>	0	24	35	43	42	28	8
<b>Sans_objectif – facteur 4</b>	0	-2	-6	-11	-19	-38	-62

# Le programme

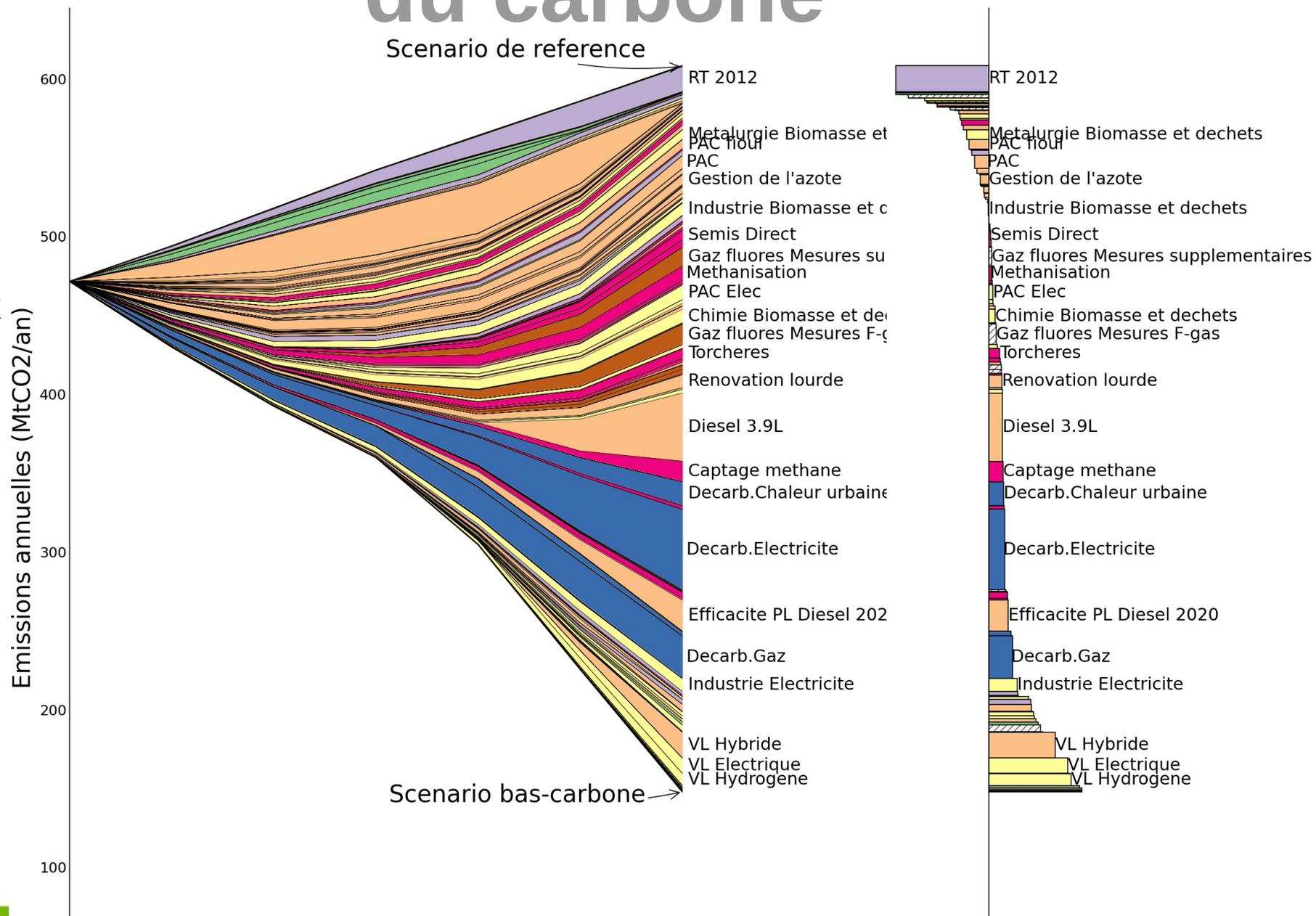
**I – Présentation de l’outil D-CAM**

**II – Résultats sectoriels**

**III – Résultats agrégés**

**IV – Utilisation et développements futurs**

# Effet de l'introduction d'un prix du carbone

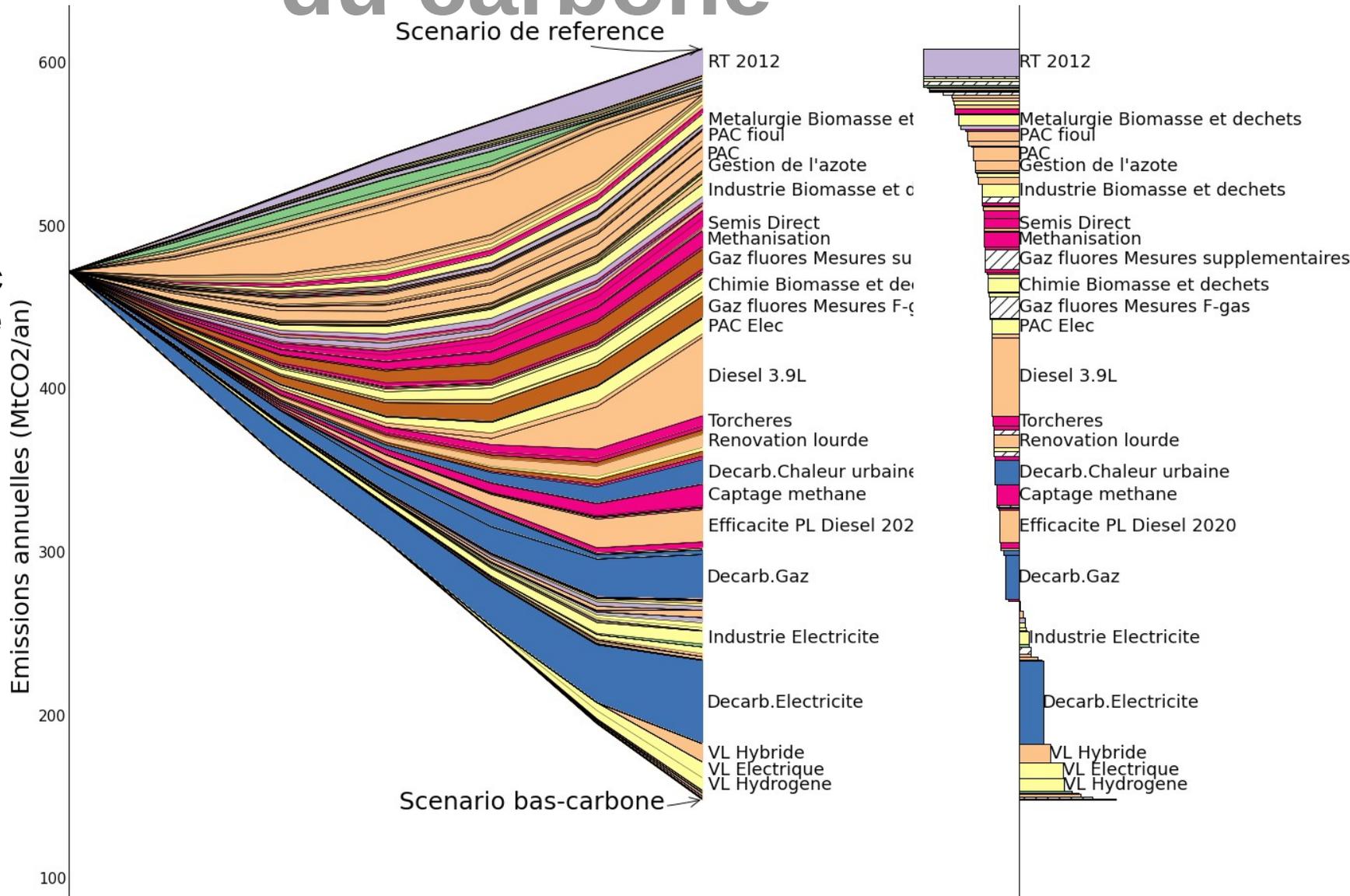


D-CAM  
agrégée  
sans prix



# Effet de l'introduction d'un prix du carbone

**D-CAM**  
agrégée avec  
trajectoire de  
prix du  
carbone  
prévue dans  
la LTECV



# Limites de la méthode

## Absence de cobénéfices

- Complémentaires de scénarios prospectifs qui considèrent les effets sur l'activité économique des secteurs

## Autres simplifications

- Cinétiques très simplifiées par rapport à la réalité
- Pas d'analyse des émissions sur le cycle de vie
- Absence d'effet rebond

## Précautions de lecture

- Les coûts n'indiquent pas un ordre de priorité
- Difficile à interpréter comme la répartition des efforts entre secteurs
  - > car très sensible aux données d'entrée
  - > car ne présente qu'une approche par les coûts

# Développements et utilisation futurs de l'outil

- Analyse de première approche pour l'actualisation de la SNBC
- Simuler les impacts sur le déploiement des gisements de différents objectifs politiques sectoriels (sortie du nucléaire, renforcement de la pénétration des ENR, électrification massive des usages etc.)
- Donner des ordres de grandeurs plus réalistes du « surcoût » de la transition bas carbone afin de calibrer des instruments de tarification du carbone (taxe, subventions, tarifs de rachat)
- Une base objective pour faire dialoguer des visions du monde différentes sur la « bonne » stratégie bas carbone. L'outil est a priori « agnostique » sur le chemin technologique à suivre
- Un outil collaboratif co-construit avec ses utilisateurs potentiels

# FIN

