

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} invcost_i(t) \cdot I_i(t) + \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}}$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRC} varom_i(t) \cdot P_{izy}(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varom_i(t) \cdot P_{izy}(t)$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_{k,s}(t) \cdot IMP_{k,s}(t)$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} cost_{k,s}(t) \cdot IMP_{k,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELC,s}(t) \cdot EXP_{ELC,s}(t)$$



DESSINER UNE FRANCE ZÉRO ÉMISSION EN 2072

La recherche de combinaisons vertueuses entre la place des énergies, les usages, les solutions de flexibilité et les modes de vie



Rémy Doudard
Thomas Le Gallic
Ariane Millot
Edi Assoumou
François Briens
CMA, Mines ParisTech



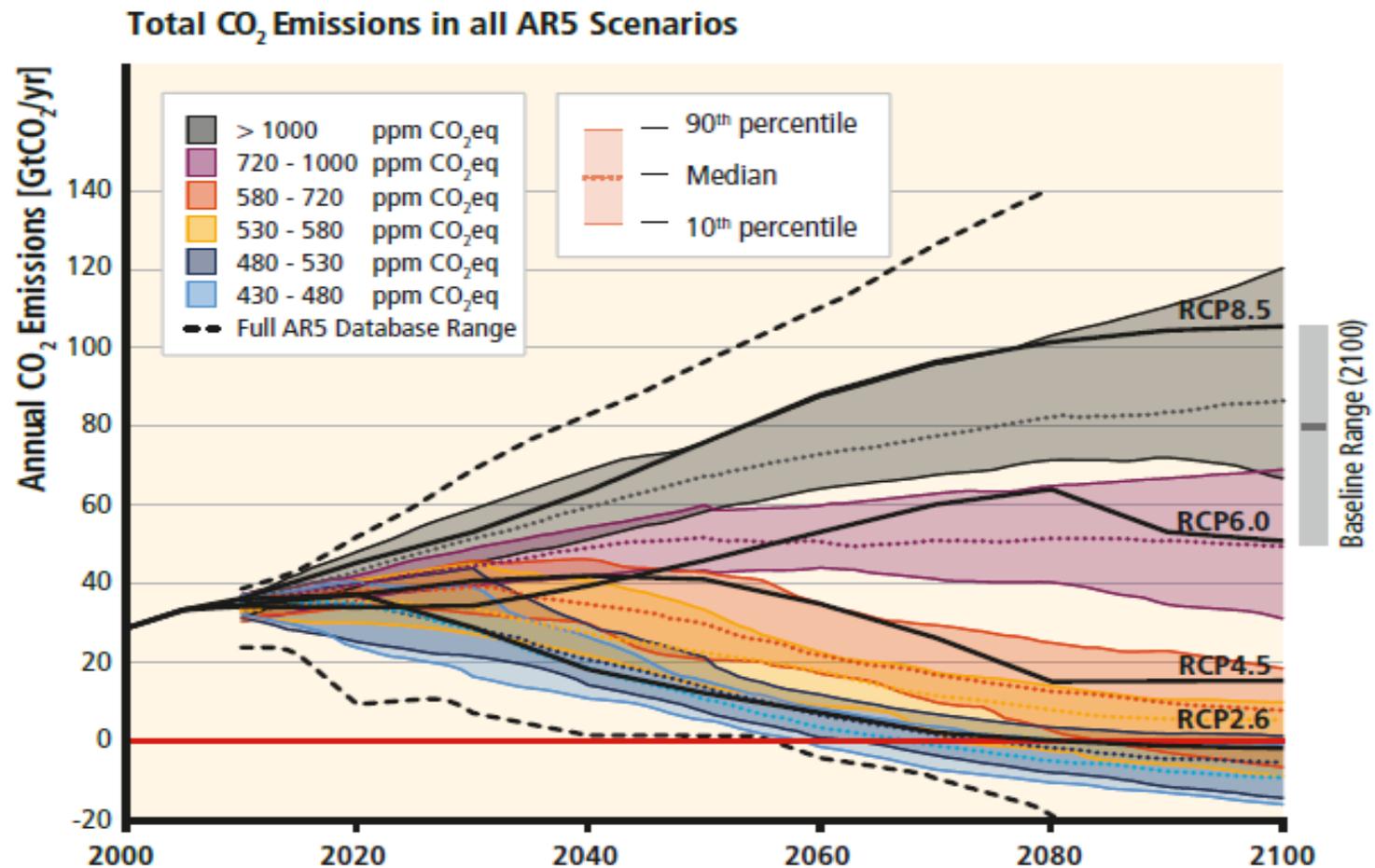
POURQUOI UN OBJECTIF 0 ÉMISSION ?

- 1997 : Protocole de Kyoto → 2015 : Accord de Paris
- Article 2 de l'accord de Paris :

“Contenant l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels”
- Article 4 de l'accord de Paris :

“ Opérer des réductions rapidement [...] de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle ”

QUE DISENT LES SCÉNARIOS DU GIEC ?



Source : IPCC Report AR5

CMA - MINES ParisTech

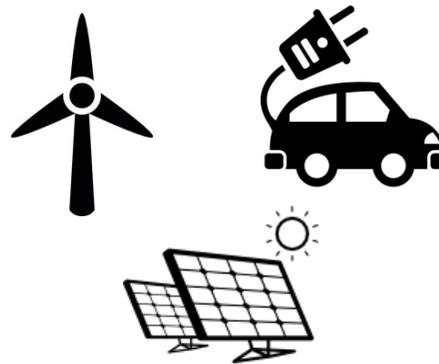
UNE APPROCHE MULTIDIMENSIONNELLE

- Limite du réchauffement à 1,5°C : de quels leviers disposons-nous ?

Modes de vie



Technologies



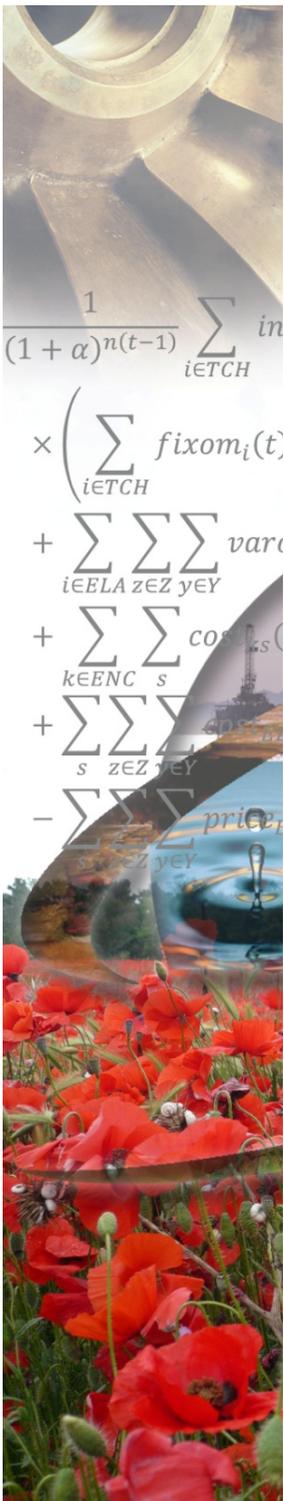
Politique

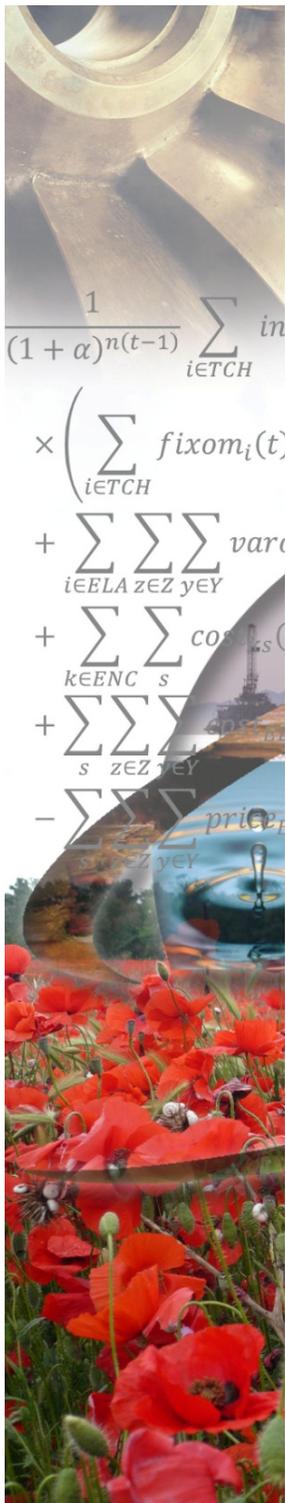


- Quelle combinaison de ces leviers pour la France ?
Quels seront les impacts sur le mix énergétique ?

Proposition d'une approche pour associer ces différentes dimensions

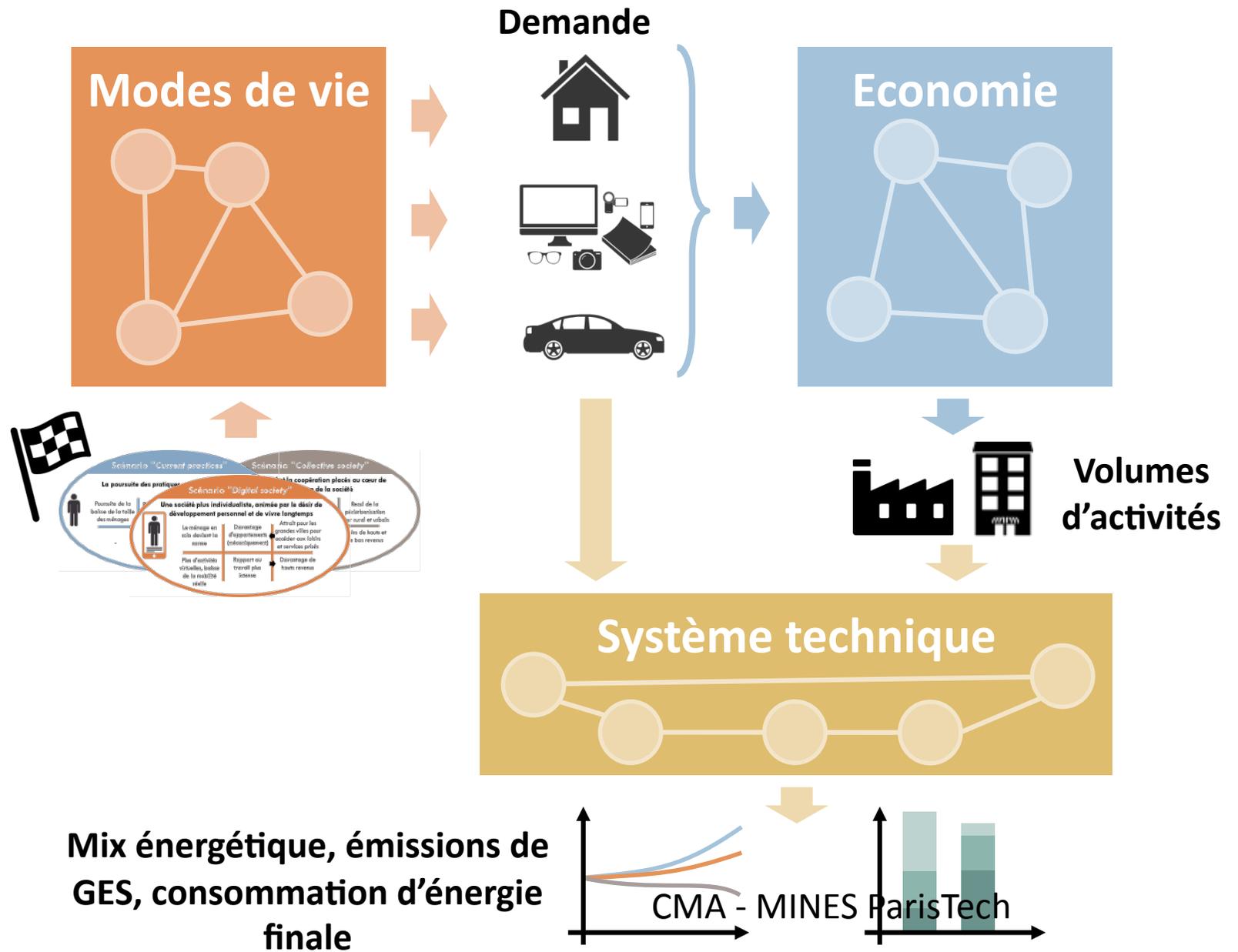
CMA - MINES ParisTech



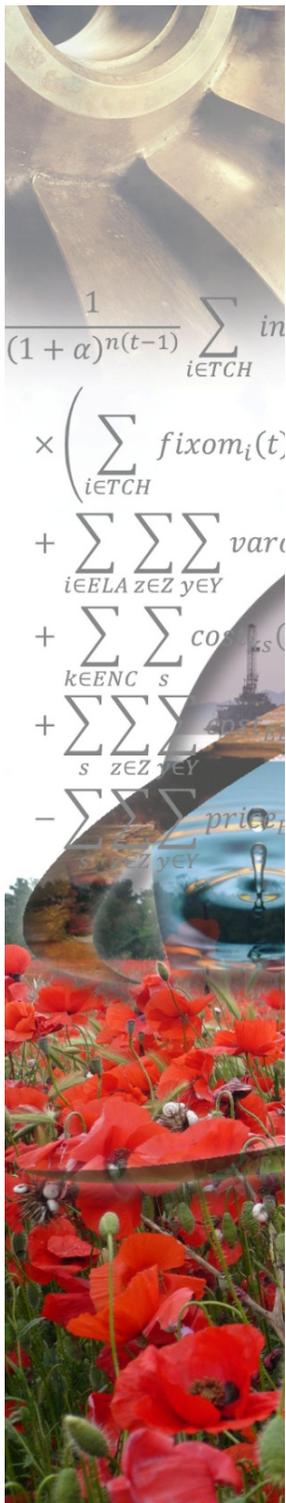


COMMENT S'Y PRENDRE ? LA COMBINAISON DE MODÈLES DE PROSPECTIVE

COMMENT COMBINER CES TROIS DIMENSIONS ?



UN MODÈLE POUR REPRÉSENTER LA POPULATION ET SES MODES DE VIE



Enquête logement



Enquête emploi du temps



Enquête nationale transport et déplacement



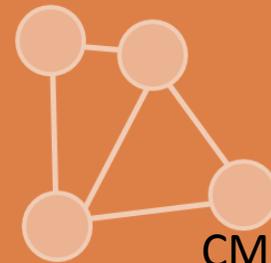
Pratiques actuelles et passées

Recensement de la population



Enquête budget des ménages

Modes de vie



CMA - MINES ParisTech



UN MODÈLE INPUT-OUTPUT POUR L'ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$

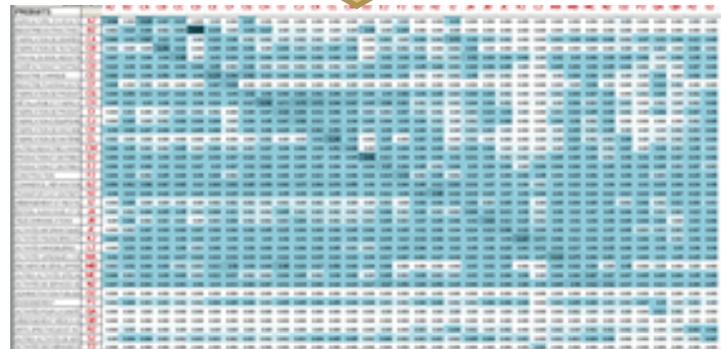
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

Demande



**Analyse
input-output**



**Activité par
secteur**



LE MODÈLE INPUT-OUTPUT

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

	Agriculture	Industrie	Services
Agriculture	0.1	0.075	0
Industrie	0.2	0.1	0.05
Services	0.1	0.05	0.05



Matrice des coefficients techniques : représente les interdépendances entre secteurs

Coefficients techniques : représente la proportion d'un produit A nécessaire pour produire une unité d'un produit B

→ **Production** de chaque branche de l'économie exprimée en fonction de la **demande** et de la **matrice des coefficients techniques**

TIMES_FR : UN MODÈLE TECHNOLOGIQUE D'OPTIMISATION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

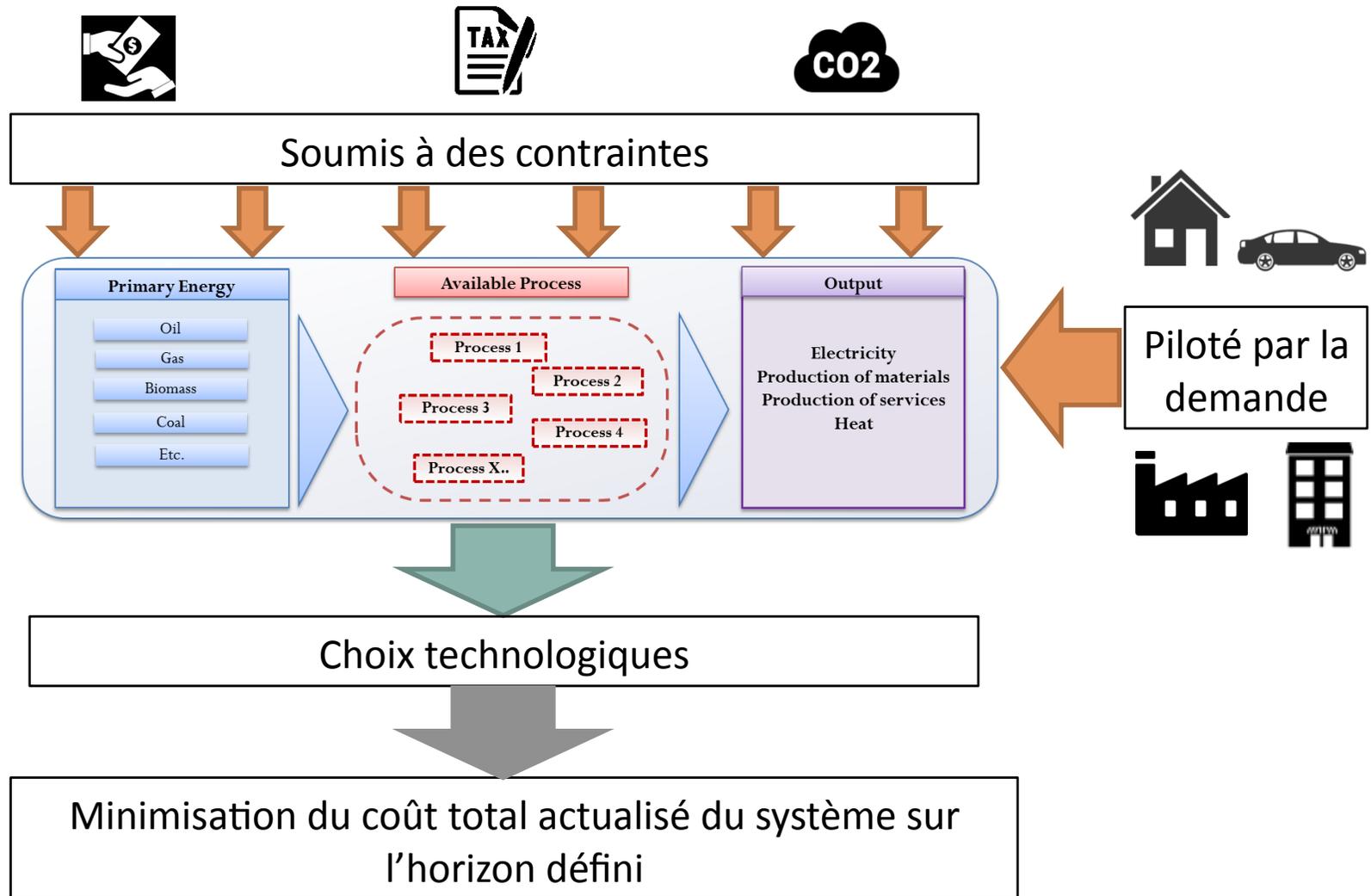
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

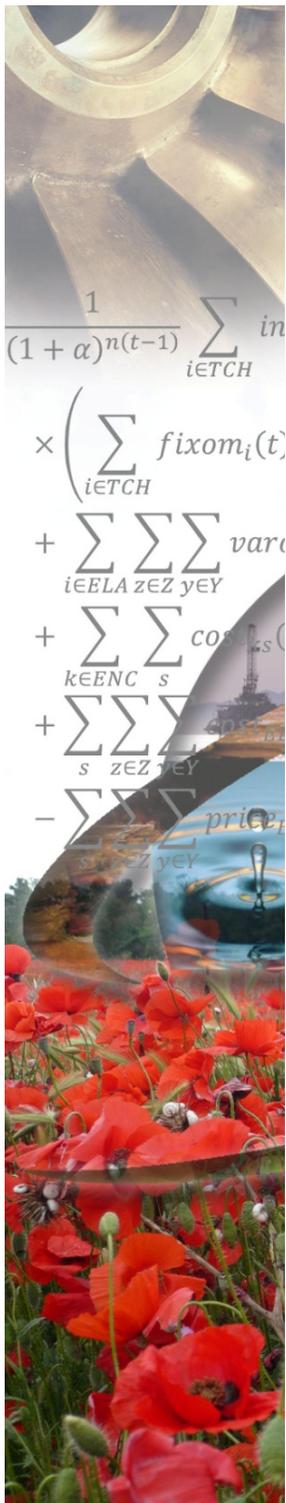
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s CO_2$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{y \in Y} price$$





UNE FRANCE ZÉRO ÉMISSION : UN PREMIER SCÉNARIO

SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE : LA POURSUITE DES MODES DE VIE ACTUELS

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

Scénario "Current practices"

La poursuite des pratiques actuelles en 2072



Poursuite de la
baisse de la taille
des ménages

Préférence pour
la maison
individuelle

➔ Poursuite de la
périurbanisation

-
Travail et études
à la base de
l'organisation du
temps
-

UN OBJECTIF « ZÉRO ÉMISSION » EN 2072

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cos$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

2030 : - 40% GES par rapport à 1990



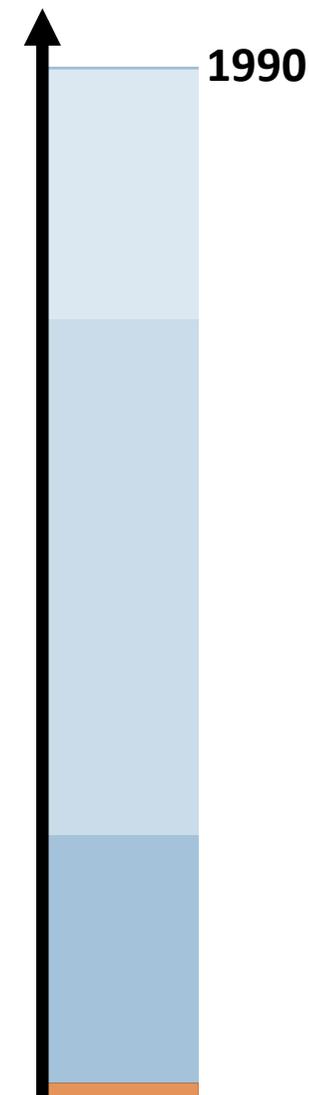
ENGAGEMENTS ACTUELS



2050 : - 75% GES par rapport à 1990

FUTUR ENGAGEMENT (HYPOTHÈSE)

2072 : 0 GES



QUAND FIXER UN OBJECTIF 0 GES ?

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

Engagements

2030 : - 40% GES par rapport à 1990

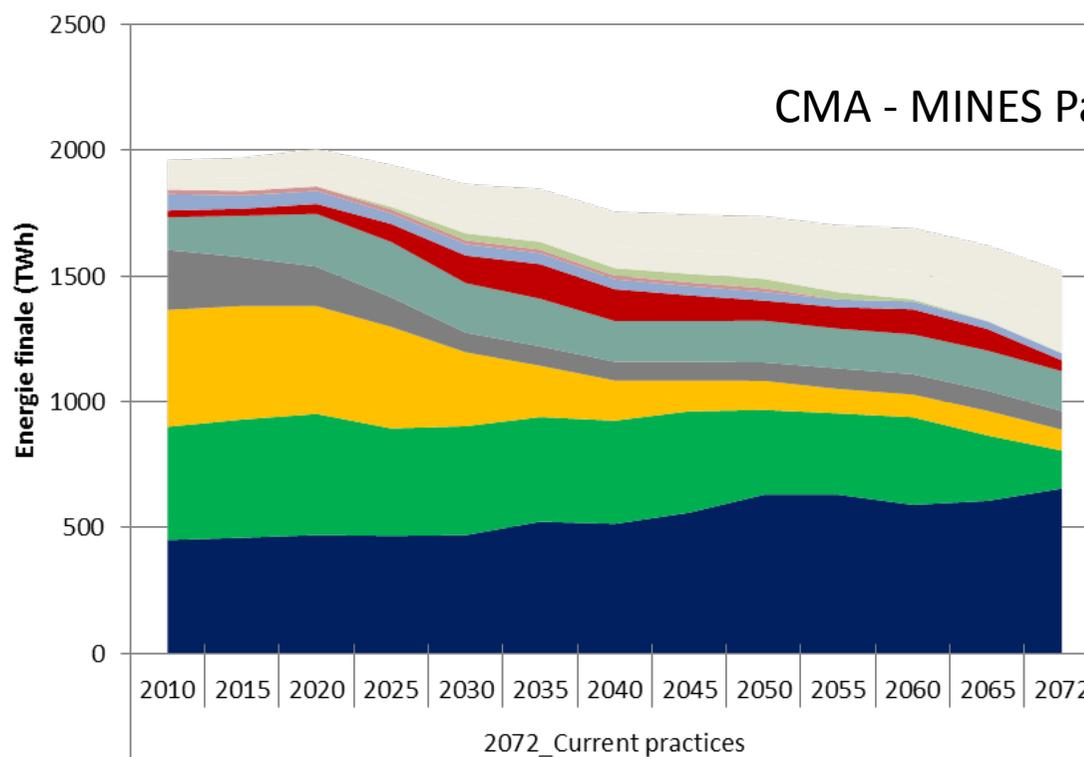
2050 : - 75% GES par rapport à 1990

Hypothèse

2072 : 0 GES

ZERO EMISSION EN 2072 : MIX D'ÉNERGIE FINALE

Electricité Gaz Carburant liquide Pétrole Biomasse Chaleur



UN INDICATEUR DE FAISABILITÉ DU SCÉNARIO

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

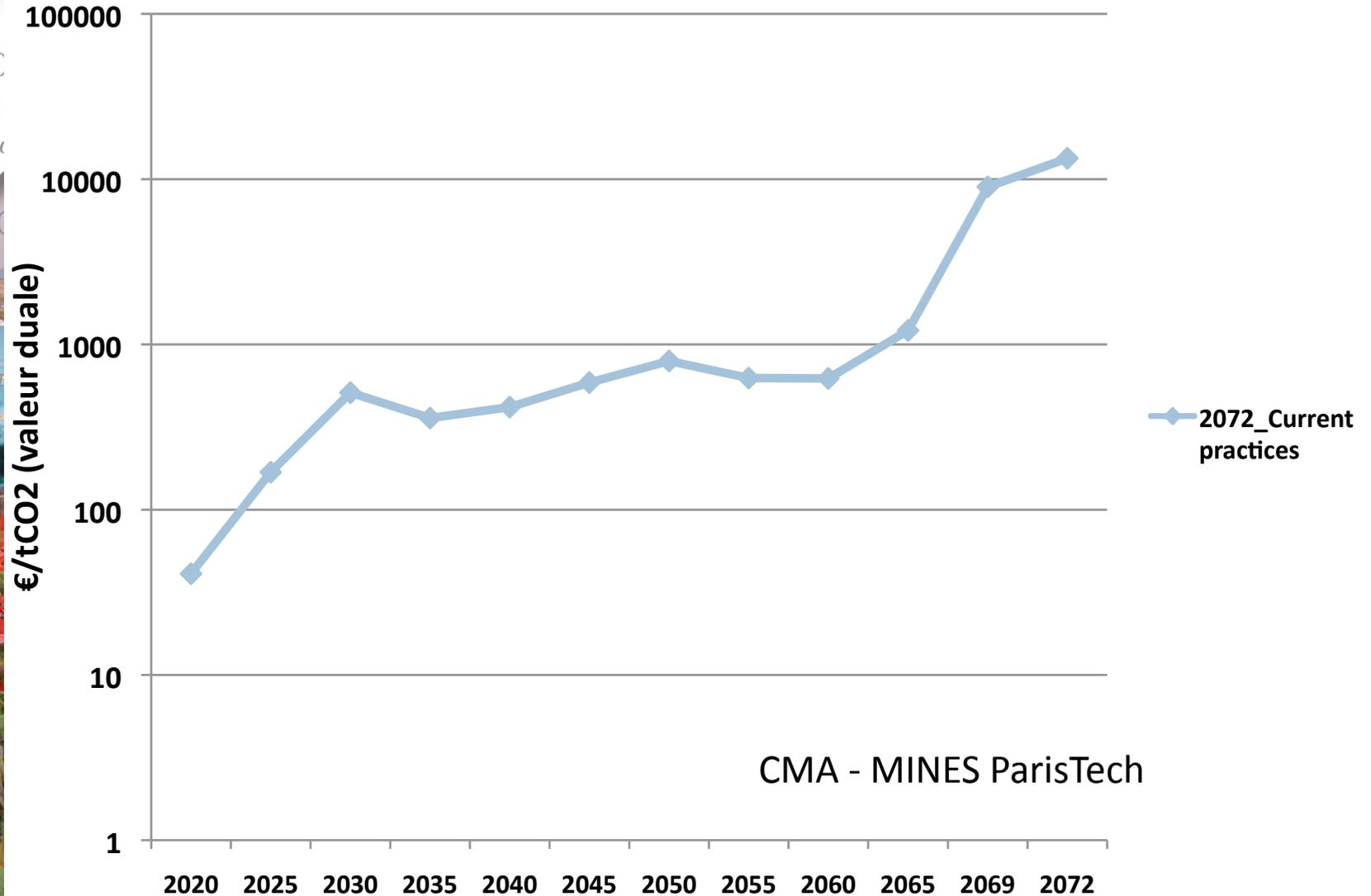
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

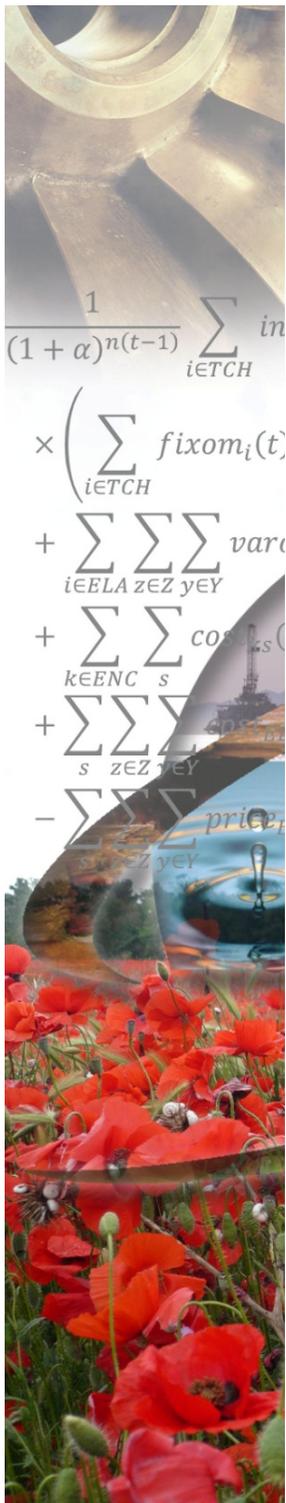
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

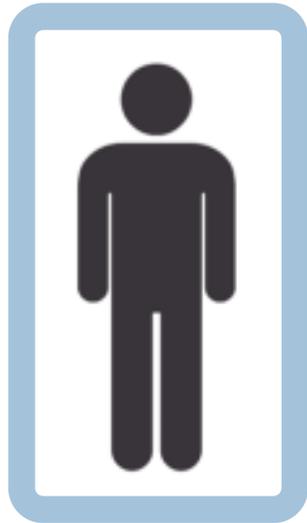
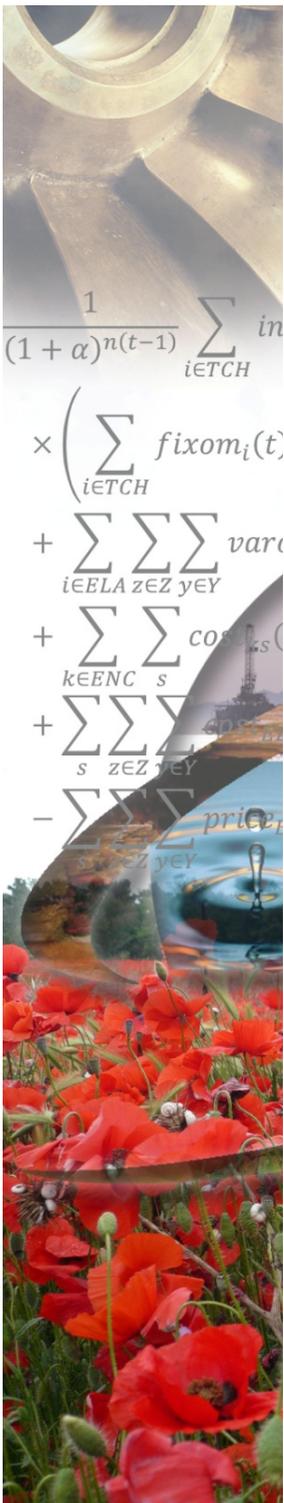


CMA - MINES ParisTech



UNE FRANCE ZÉRO ÉMISSION : EXPLORATION DE SCÉNARIOS

TROIS SCÉNARIOS CONTRASTÉS



Current practices



Digital society



Collective society

CMA - MINES ParisTech

PRINCIPALES HYPOTHÈSES

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cor$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

Scénario "Digital society"

Une société plus individualiste, animée par le désir de développement personnel et de vivre longtemps



Le ménage en solo devient la norme	Davantage d'appartements (mécaniquement)	Attrait pour les grandes villes pour accéder aux loisirs et services prisés
Plus d'activités virtuelles, baisse de la mobilité réelle	Rapport au travail plus intense	Davantage de hauts revenus

Scénario "Current practices"

La poursuite des pratiques actuelles en 2072



Poursuite de la baisse de la taille des ménages	Préférence pour la maison individuelle	Poursuite de la périurbanisation
-	Travail et études à la base de l'organisation du temps	-

Scénario "Collective society"

Le lien social et la coopération placés au cœur de l'organisation de la société



L'habitat partagé devient la norme	-	Recul de la périurbanisation pour rural et urbain
Le quartier devient l'espace de vie et de relations citoyennes	Rapport au travail affaibli au profit des relations citoyennes	Moins de hauts et de bas revenus

PRINCIPALES HYPOTHÈSES

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

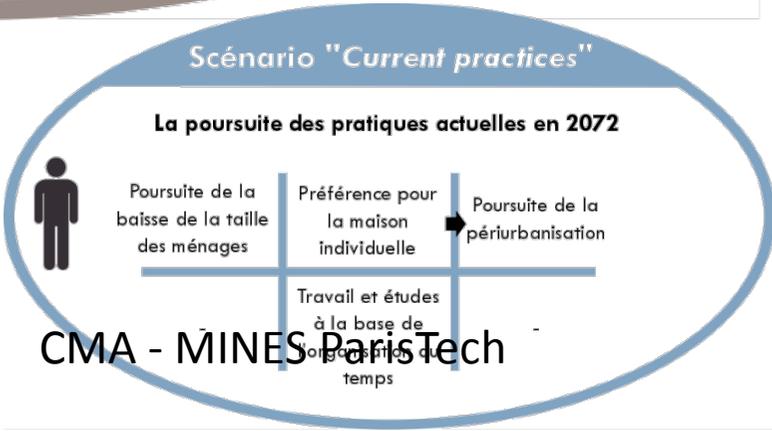
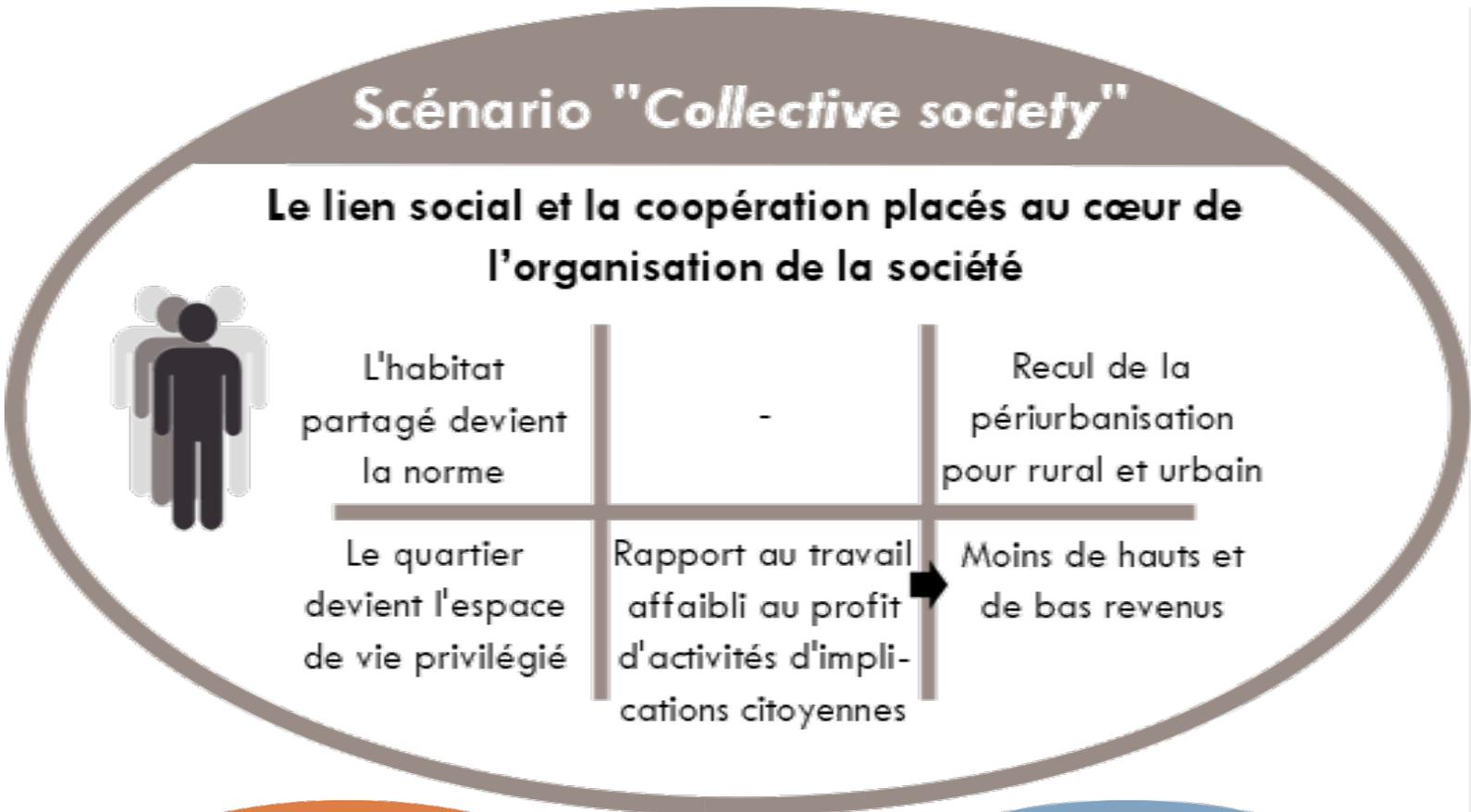
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$

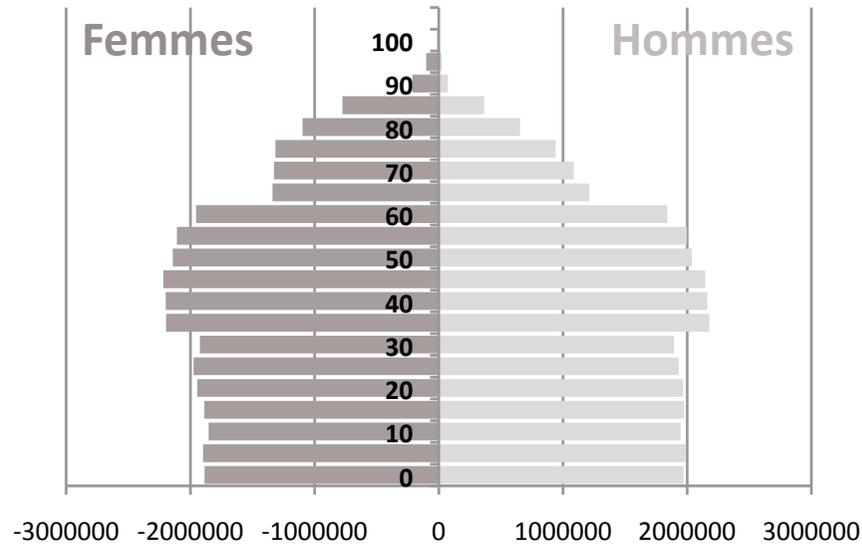
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$



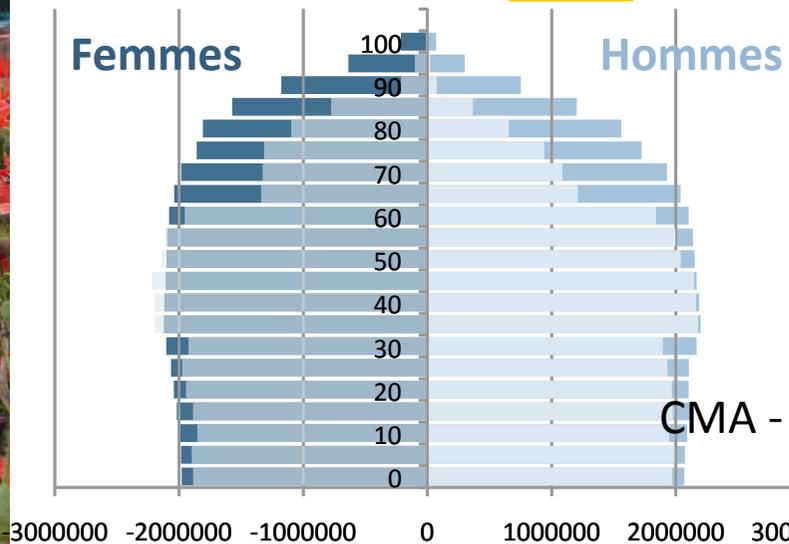
DES HYPOTHÈSES CHIFFRÉES : L'EXEMPLE DE LA DÉMOGRAPHIE

Situation en 2010

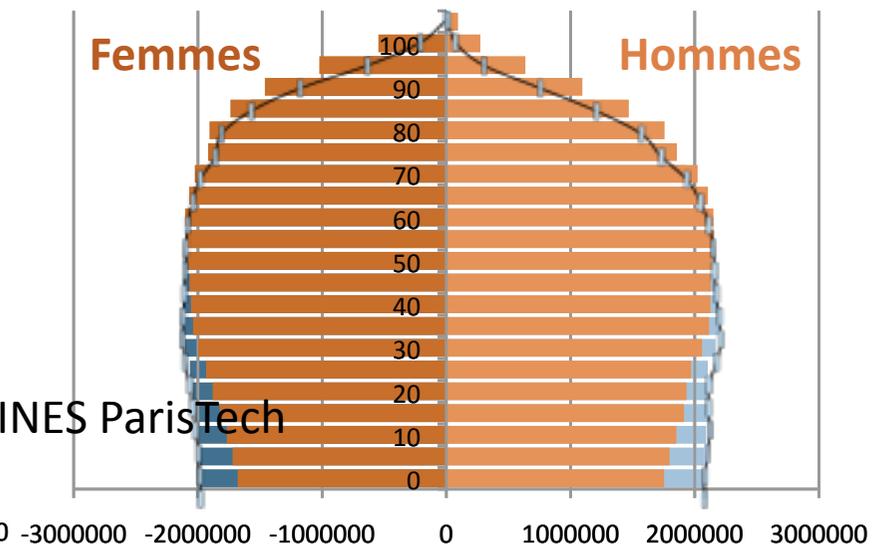


+18%
... en 2072

Scénario **A & C**



Scénario B



CMA - MINES ParisTech



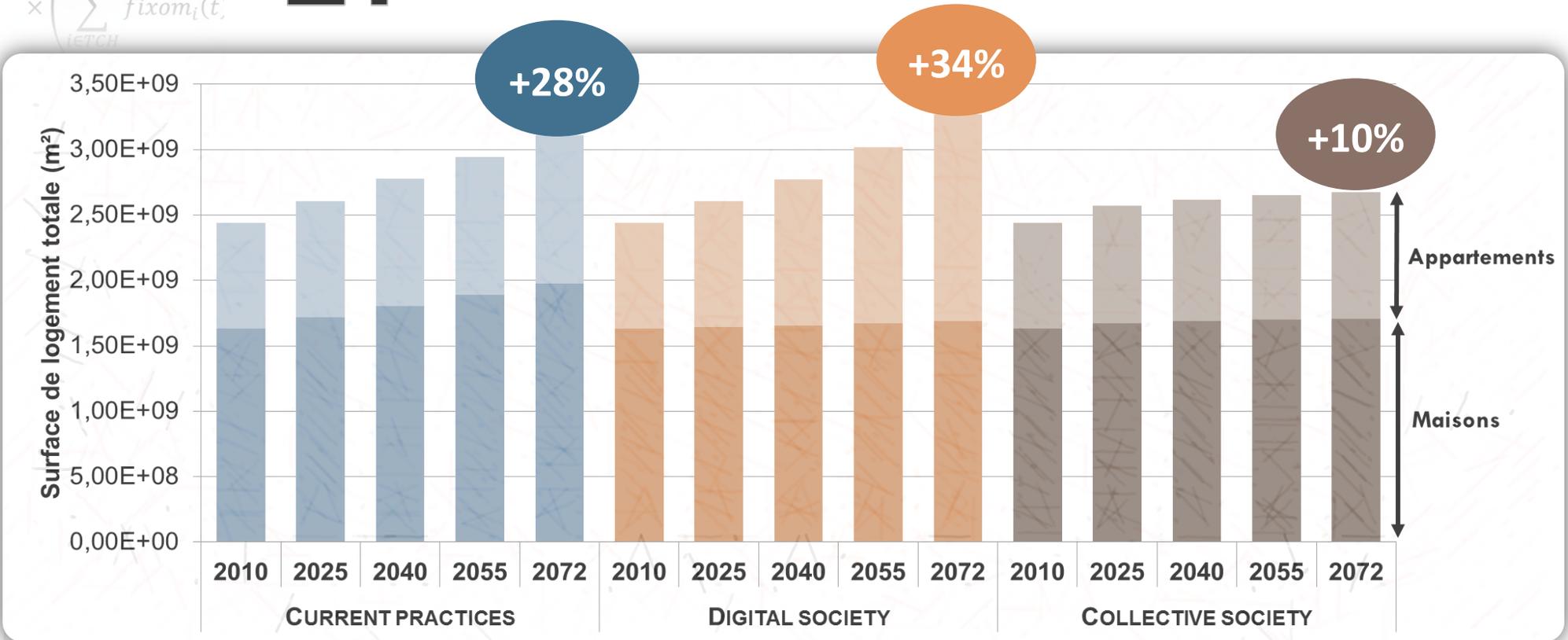
L'INFLUENCE DES MODES DE VIE SUR ...



... la demande en logements

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$



CMA - MINES ParisTech

+18%

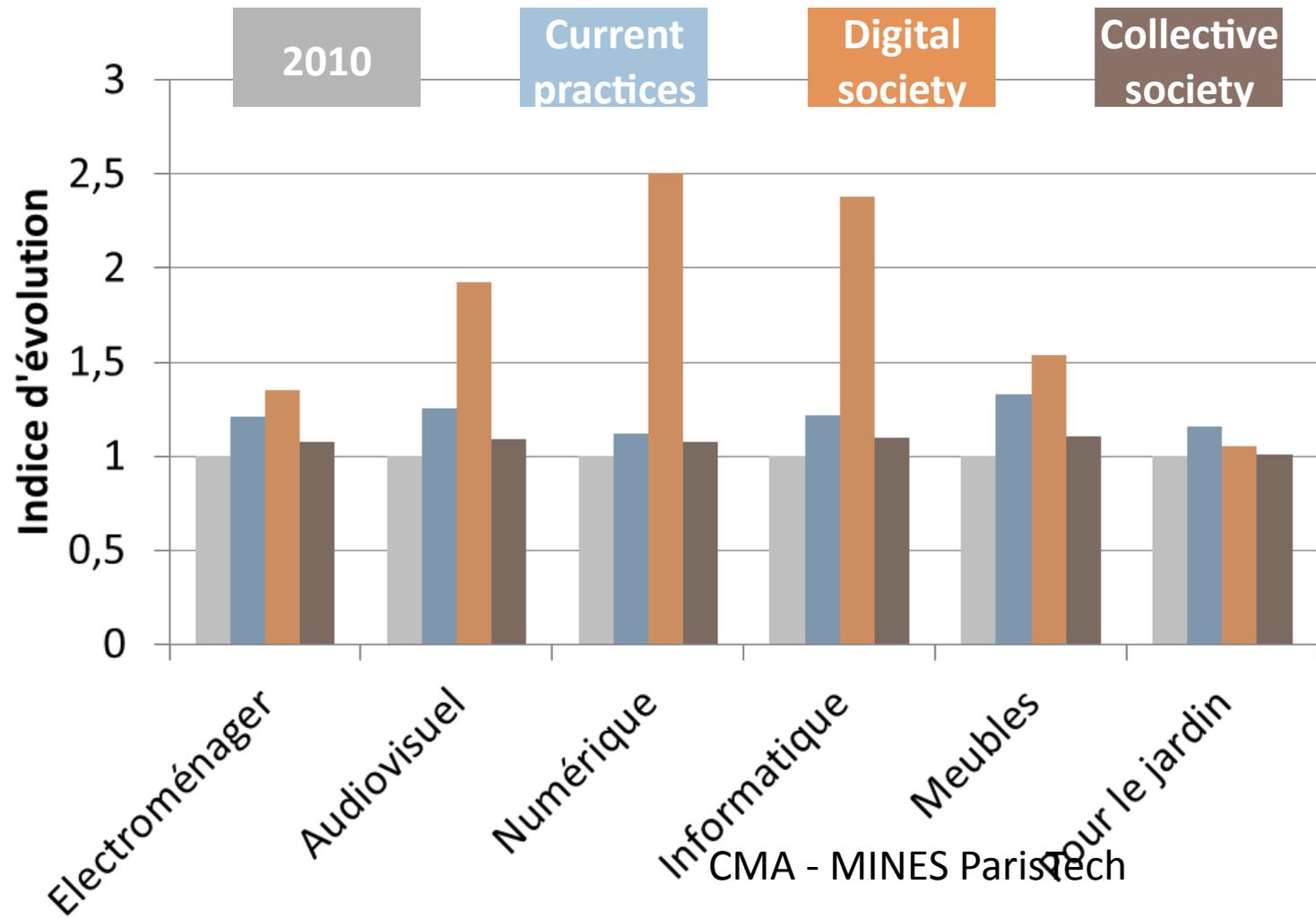
Croissance démographique: +18%



L'INFLUENCE DES MODES DE VIE SUR ...



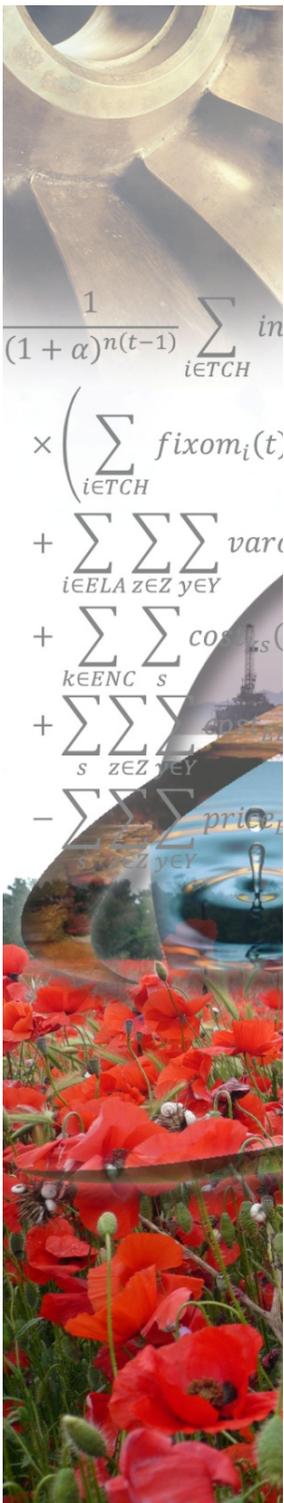
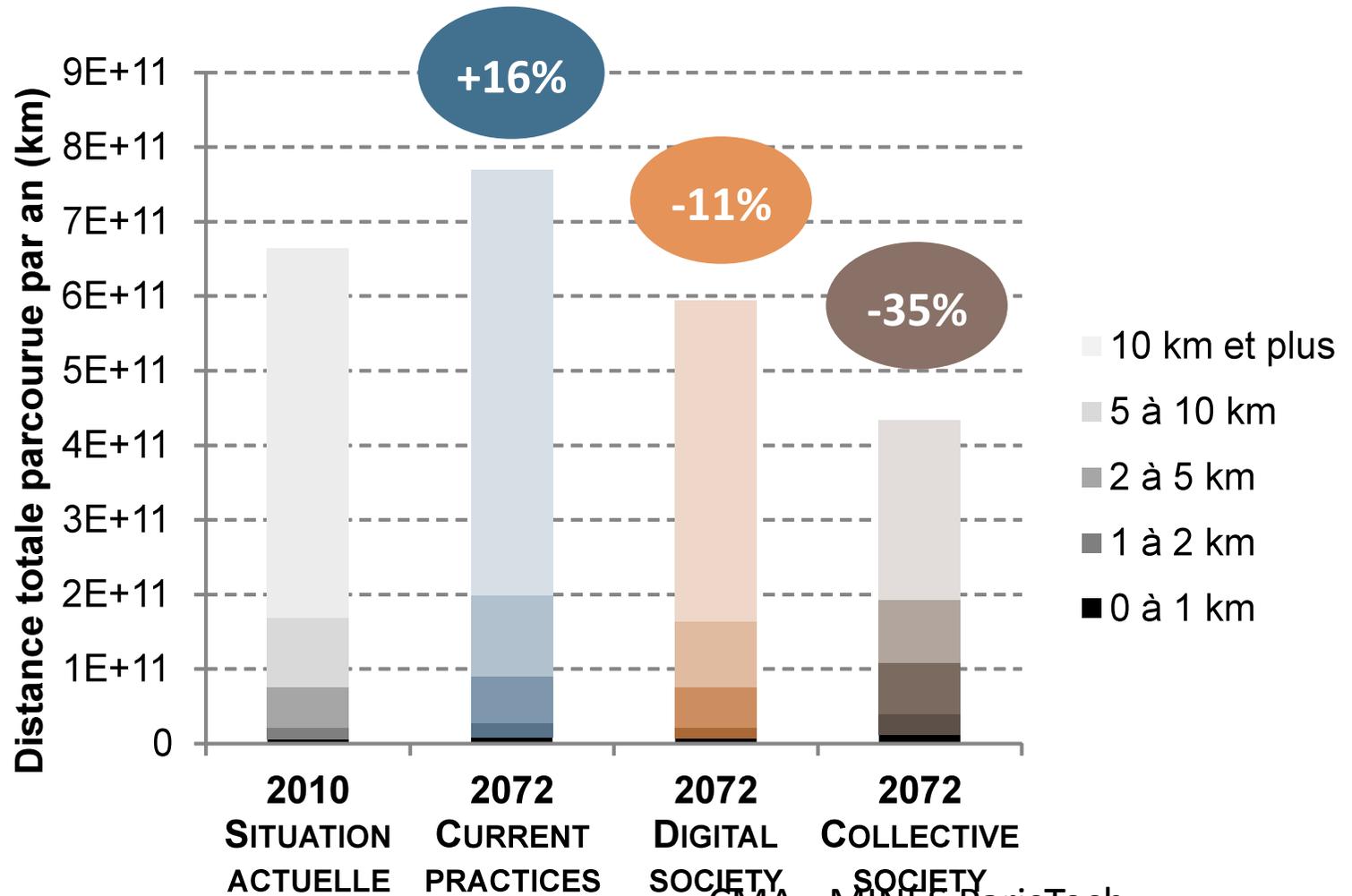
... la consommation d'équipements



L'INFLUENCE DES MODES DE VIE SUR ...



... la mobilité courte distance



QUELLE INFLUENCE DES MODES DE VIE SUR LA DEMANDE D'ÉNERGIE FINALE ?

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

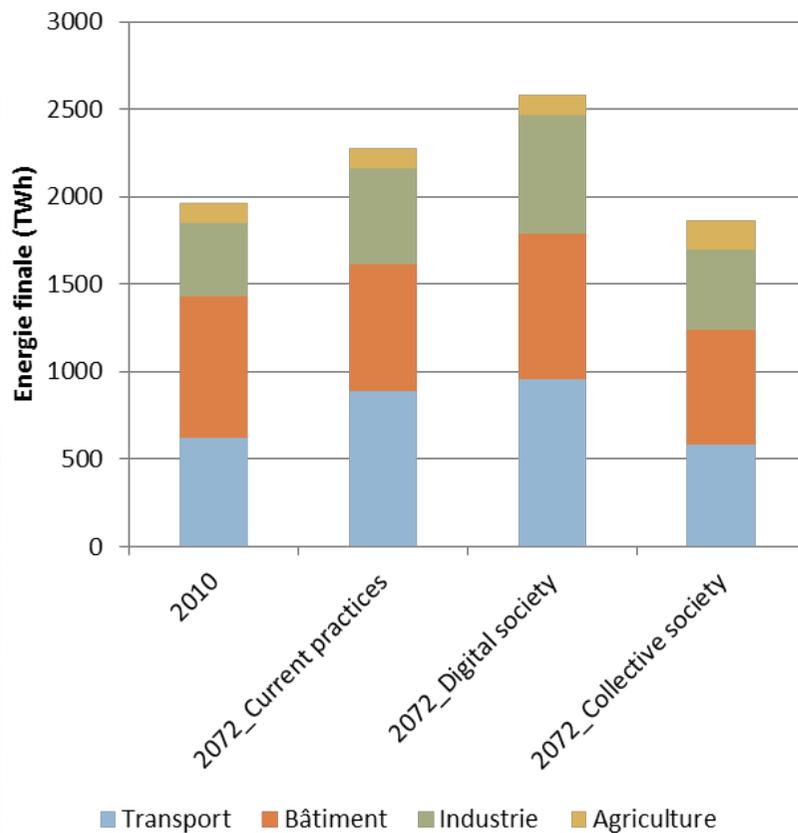
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

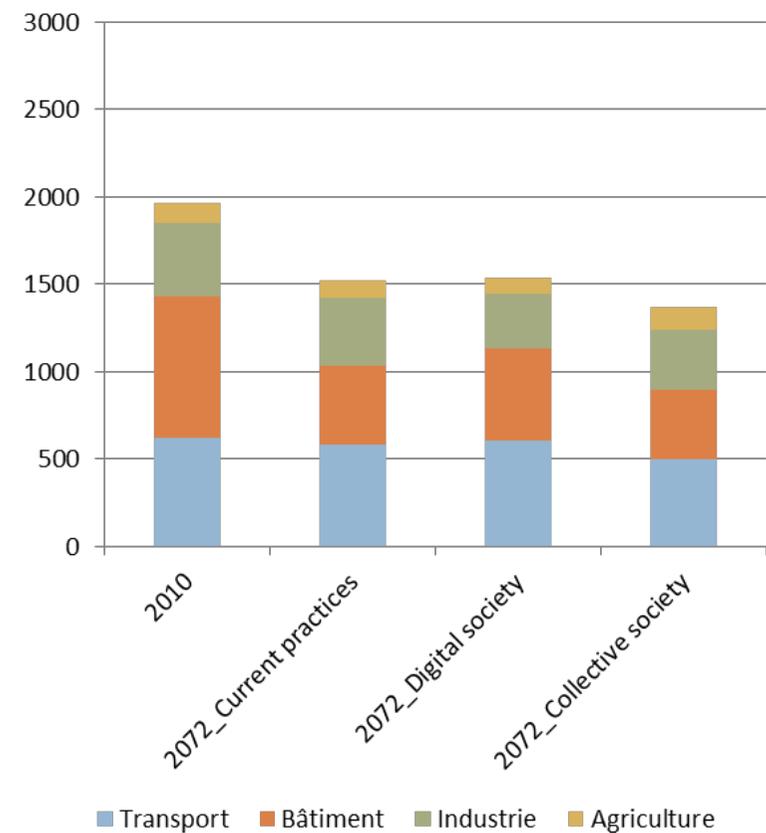


Pas de contraintes d'émission



Zéro émission en 2072

Demande élastique



QUELLE EST L'INFLUENCE DES MODES DE VIE SUR LA PART DES ÉNERGIES DANS LA DEMANDE FINALE ?

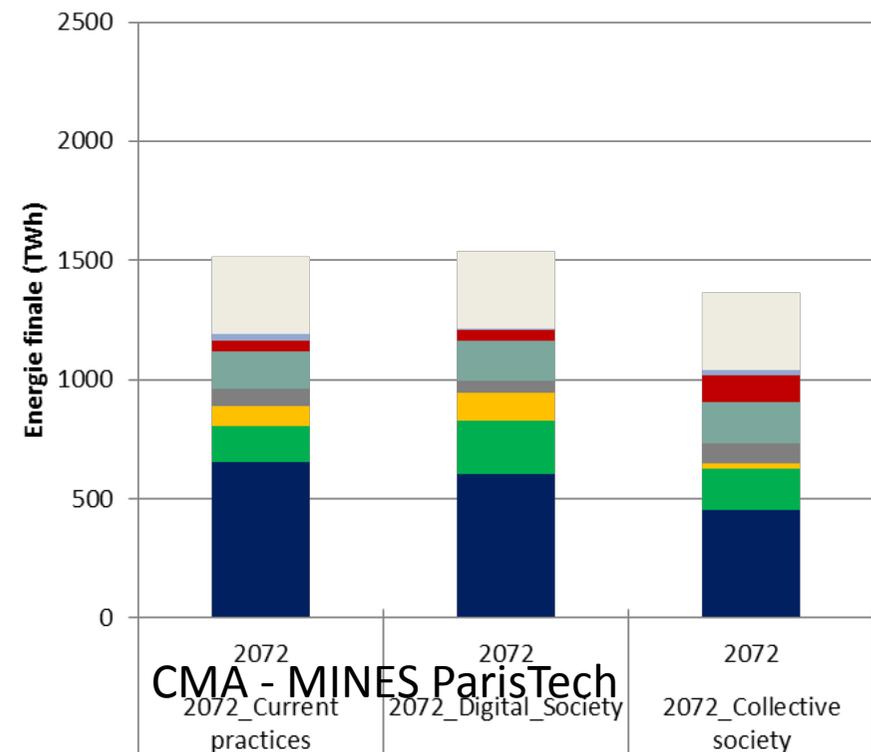
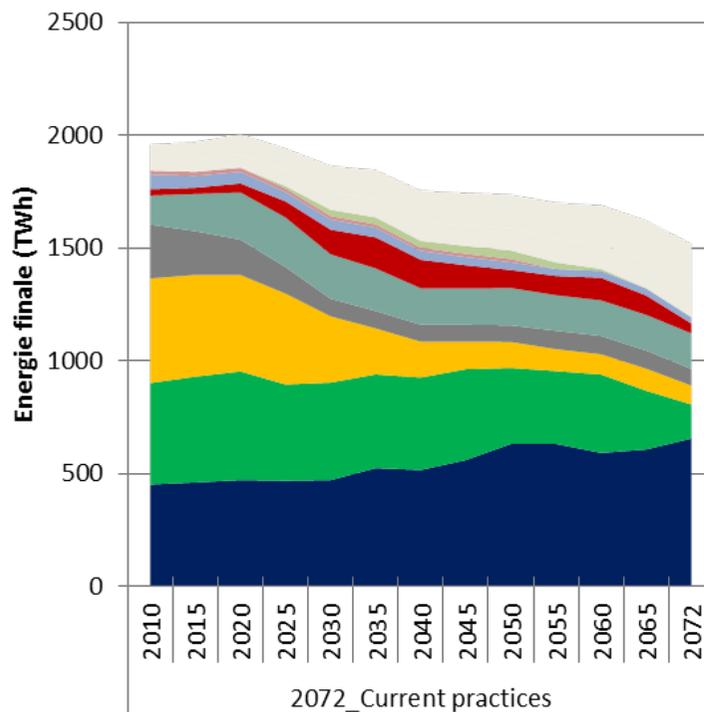
Electricité **Gaz** **Carburant liquide** **Pétrole** **Biomasse** **Chaleur**

Résultats communs

- Progression du vecteur électricité
- Stagnation de la biomasse
- Réduction de la part du gaz
- Réduction de la part du pétrole

Différences

- Collective society : progression du vecteur chaleur
- Digital society : part du gaz plus importante



2072
CMA - MINES ParisTech
2072_Current practices 2072_Digital_Society

2072
2072_Collective society

FAISABILITÉ DES SCÉNARIOS

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

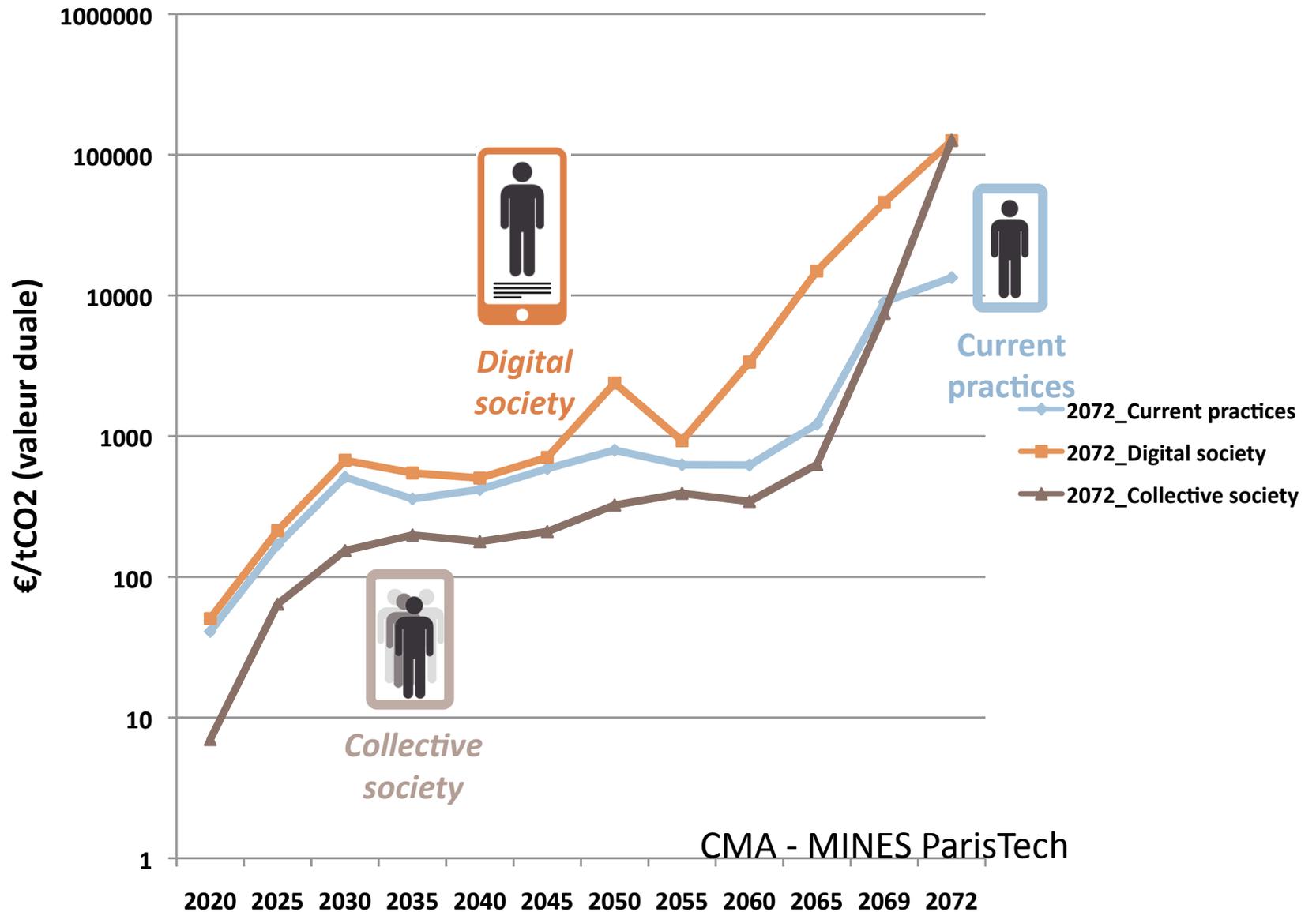
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$

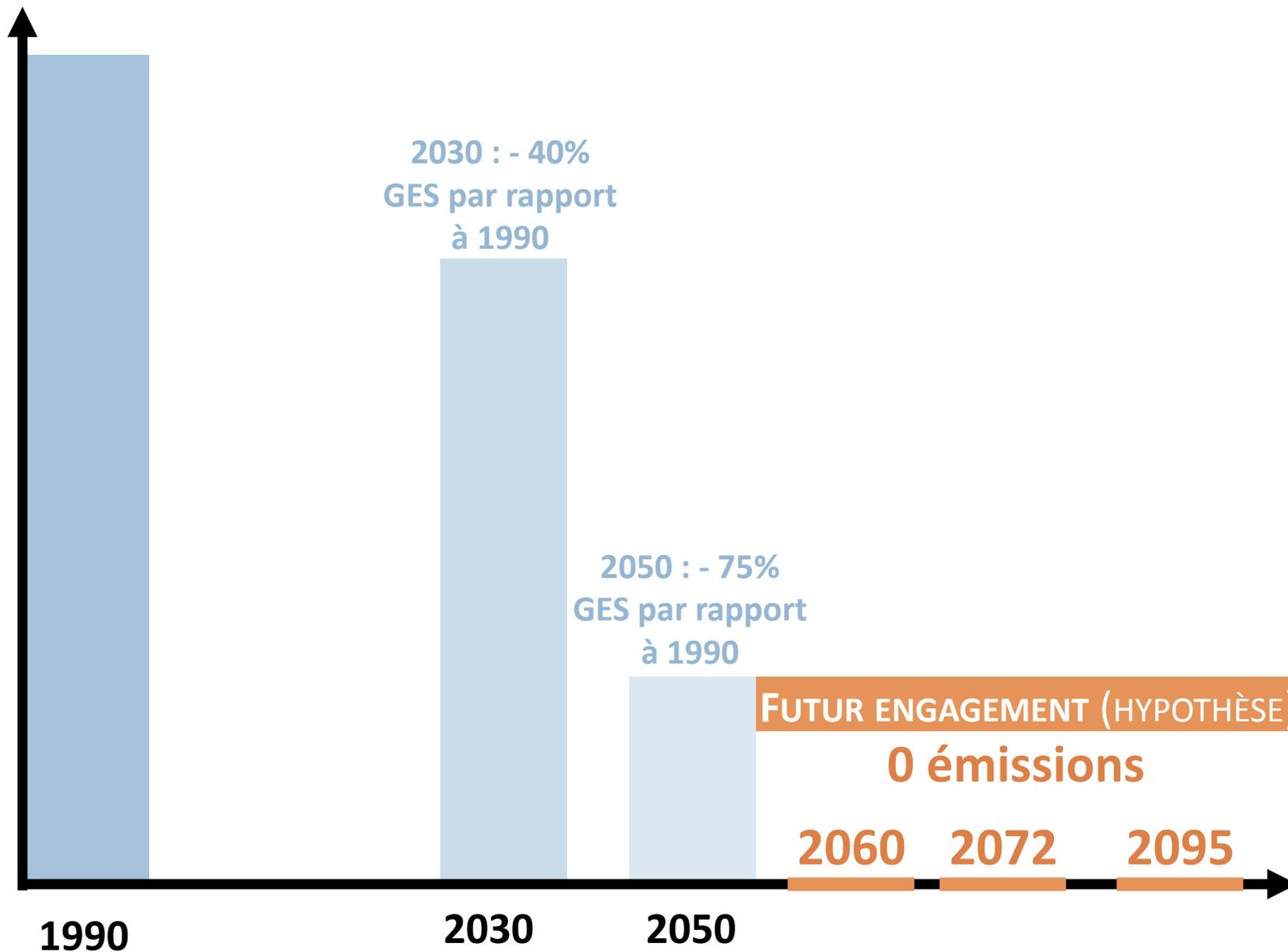
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_s(t)$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$



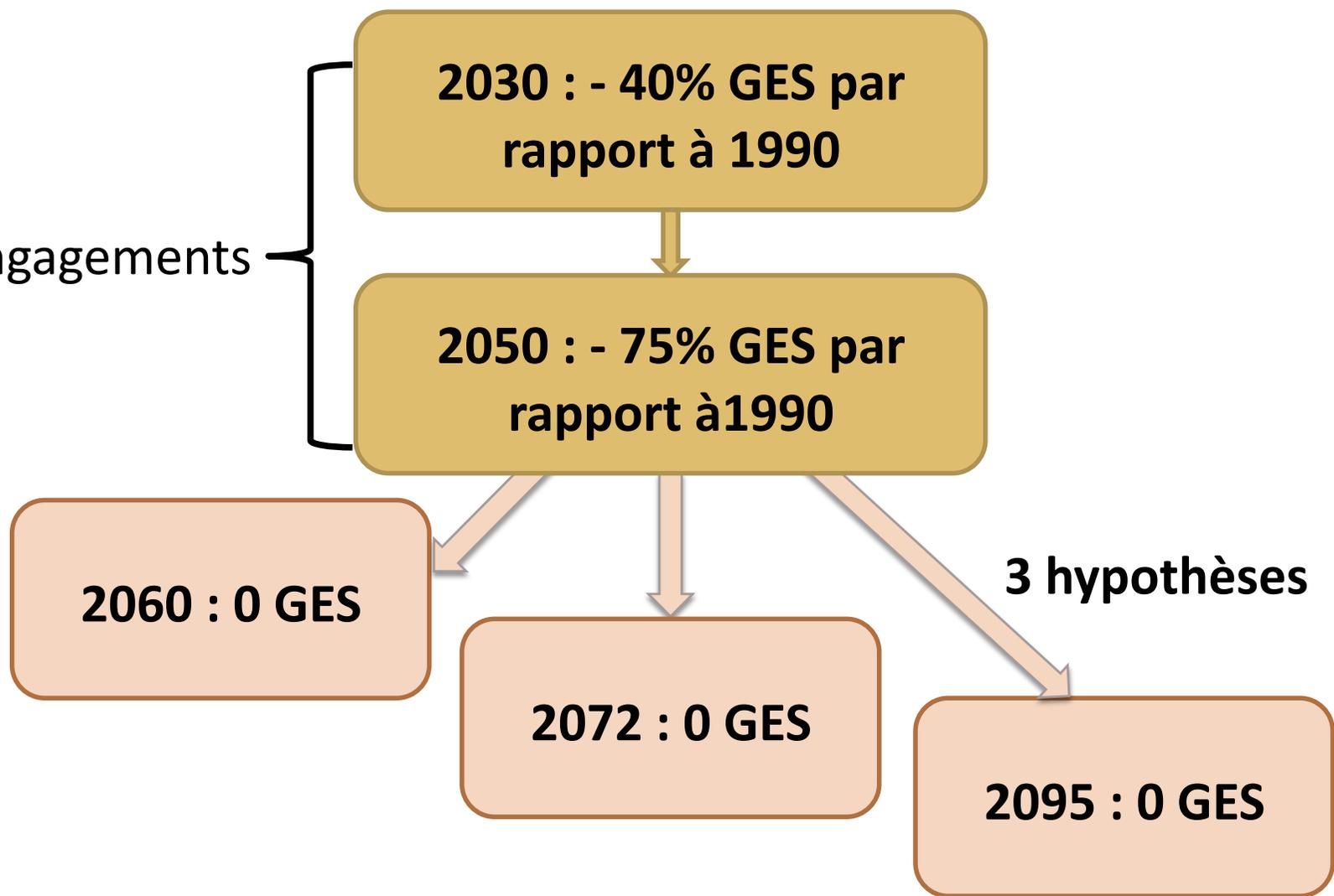
UN OBJECTIF « ZÉRO ÉMISSION » EN 2072



QUAND FIXER UN OBJECTIF 0 GES ?

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

Engagements



QUELLE EST L'INFLUENCE DE LA DATE DE L'OBJECTIF 0 GES SUR LA PART DES ÉNERGIES DANS LA CONSOMMATION FINALE ?

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

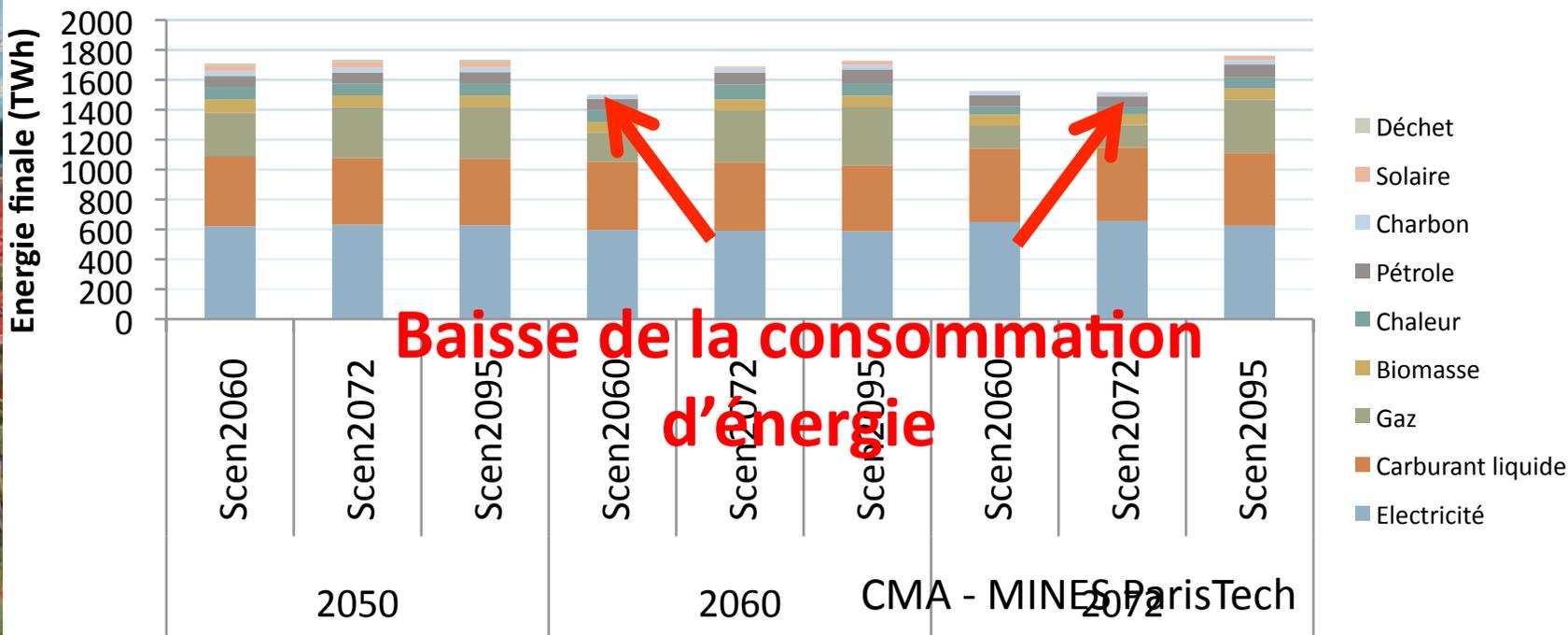
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s CO_2$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

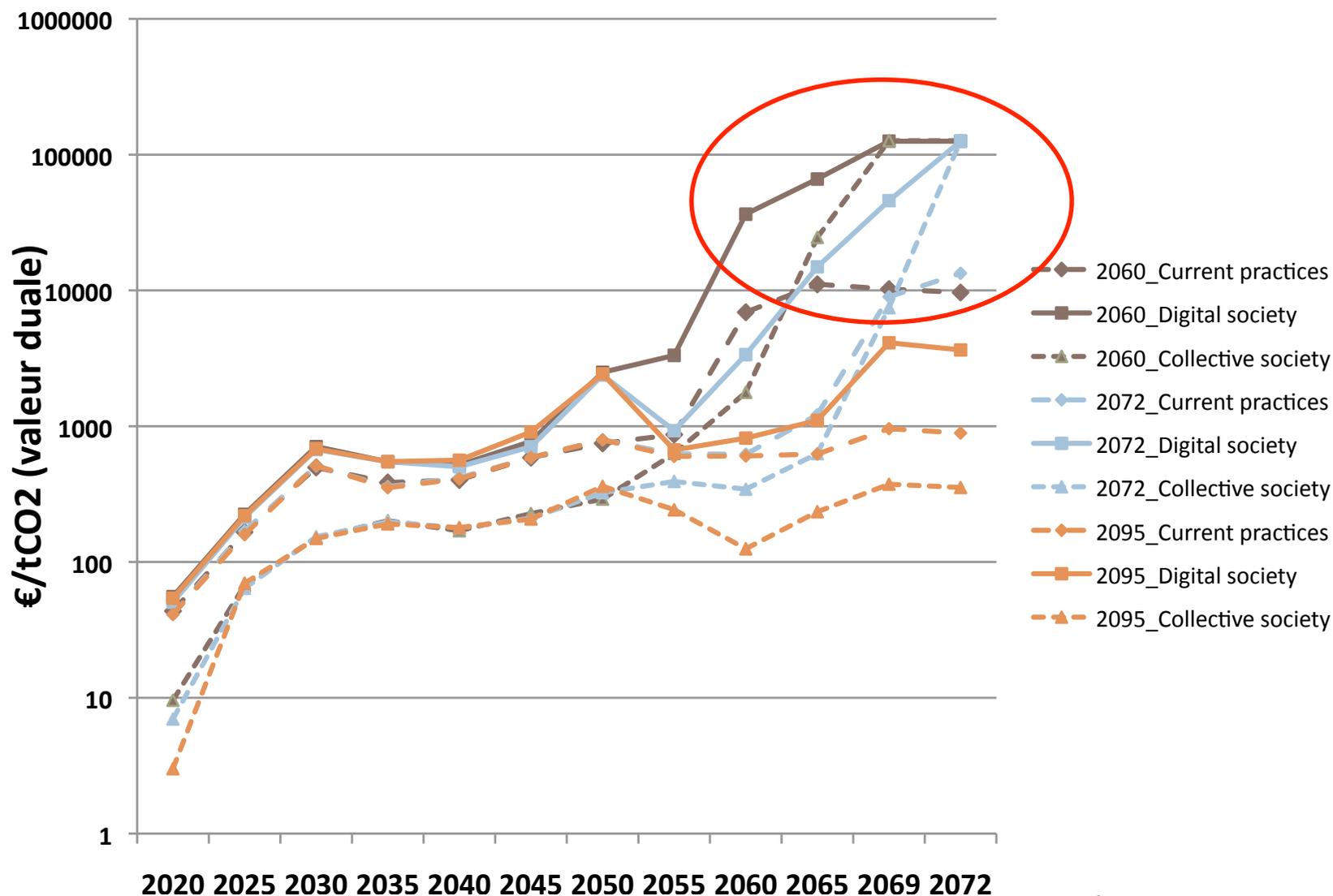
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

Résultats communs	Différence
<ul style="list-style-type: none"> - Progression du vecteur électricité - Stagnation de la biomasse - Réduction de la part du gaz naturel/biogaz - Réduction de la part du pétrole 	<ul style="list-style-type: none"> - Dynamique temporelle : plus l'objectif 0 GES est tôt, plus la baisse de la consommation d'énergie finale se produit tôt

Scénario Current practices

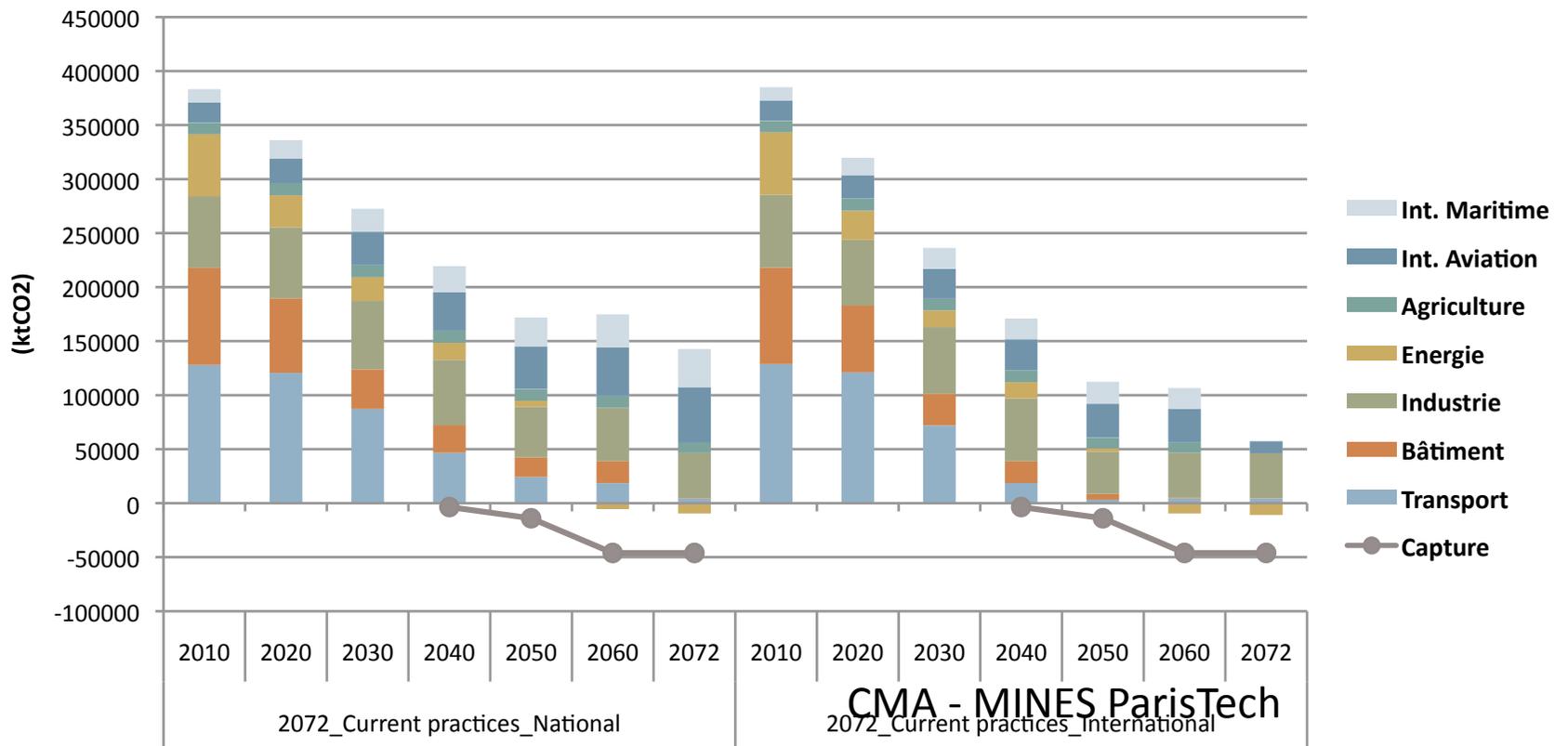


FAISABILITÉ DES SCÉNARIOS



ET SI ON CHANGE LE PÉRIMÈTRE DES ÉMISSIONS...

- Accords climat : périmètre national pour les émissions GES
- Que se passe-t-il si on prend en compte les émissions liées à l'aviation et au maritime international ?



CMA - MINES ParisTech
2072_Current practices_National | 2072_Current practices_International

FAISABILITÉ DES SCÉNARIOS AVEC ÉMISSIONS INTERNATIONALES

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

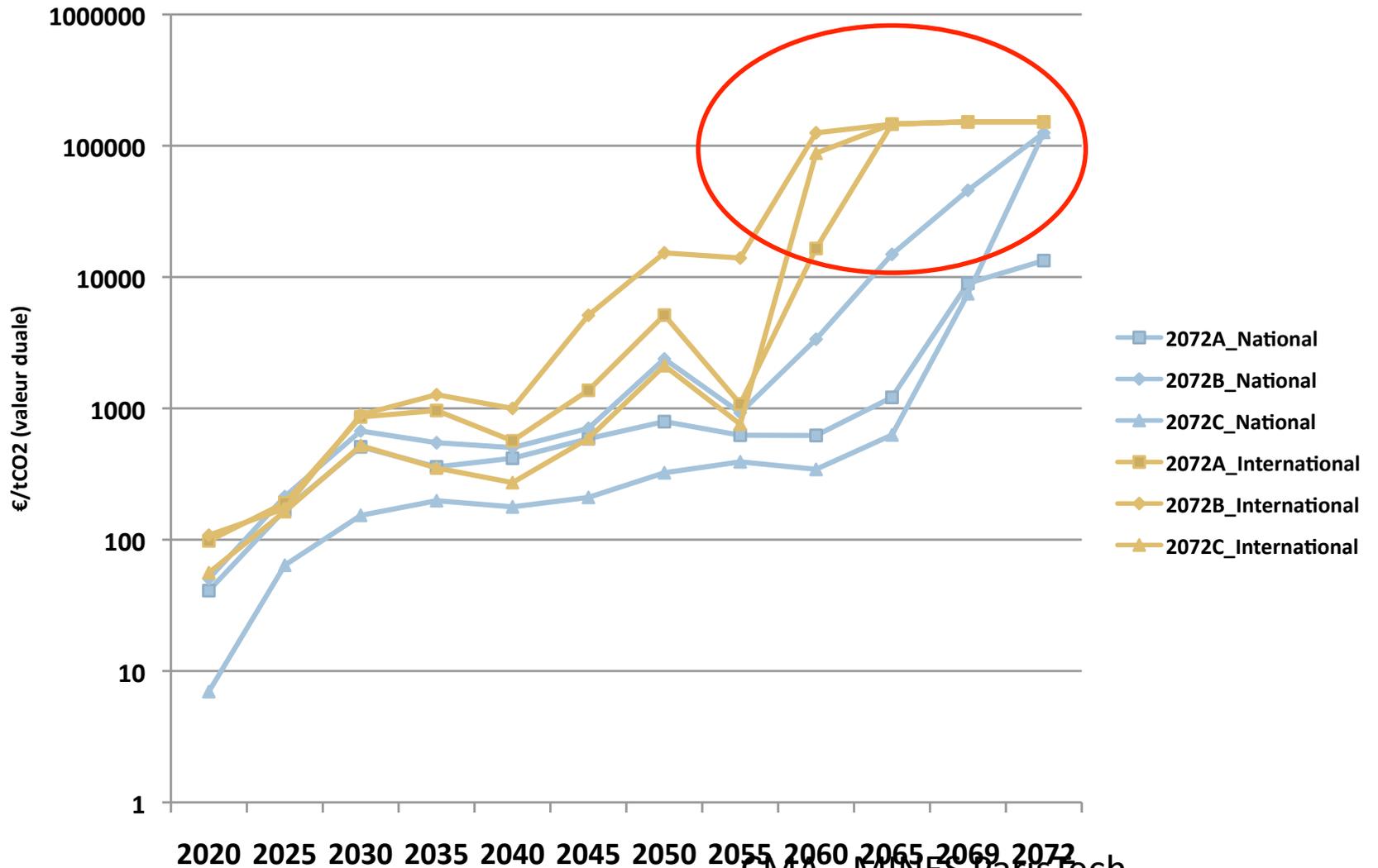
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s CO_2$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$





CONCLUSION & DISCUSSION

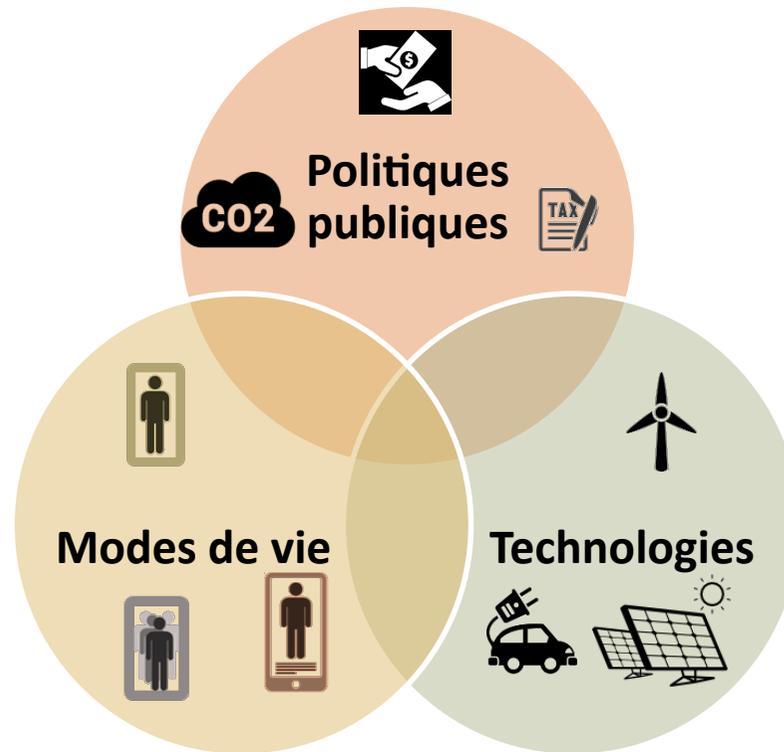
CONCLUSION

- Dessiner une France zéro émissions : modélisation prospective avec approche multidimensionnelle (Modes de vies / politiques / technologies)
- Difficulté d'atteindre la neutralité carbone
 - Variable en fonction des modes de vie
 - Quel que soit le périmètre d'émissions considéré
 - Egalement avec des hypothèses optimistes
- Les leviers de décarbonation incluent :
 - De nouvelles technologies (CCS...)
 - Mais aussi une modification de la demande
 - « Planifiée » (modes de vie)
 - « Forcée » (élasticité)



SYNTHÈSE/PERSPECTIVES

Quel accompagnement des politiques publiques ?



Des modes de vie plus ambitieux ...

...ou plus dispendieux !

Evaluer la place de nouvelles filières

Exemple du gaz :
Power-to-gas,
biométhane,
H2

