



Réconciliation des modèles top-down/bottom-up : Retour d'expérience sur l'approche combinée TIAM-FR / IMACLIM-R

Edi ASSOUMOU¹, Frédéric GHERSI², Jean-Charles HOURCADE²,
Jun LI², Nadia MAÏZI¹ et Sandrine SELOSSE¹

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

(¹): MINES ParisTech (CMA) et (²): CIRED

Origine et contexte du projet

- **2008 - Chaire Modélisation prospective : les deux types dominants de modèles Energie-Economie**
 - CMA : Modèle Bottom-up (BU) : TIMES
Modèle d'optimisation technico-économique
 - CIRED : Modèle Top-down (TD) : IMACLIM
Modèle d'équilibre général calculable (MEGC)
- **Approfondir la connaissance des interactions entre la croissance économique, l'énergie et l'environnement**
 - Fournir des outils pertinents pour promouvoir un dialogue constructif entre les modèles dits des ingénieurs et des économistes
 - Développer une plateforme partagée de modélisation en capitalisant leur expériences communes et complémentaires
 - Réévaluation méthodologique pour combiner des points de vue divergents basée sur une critique comparative

Réconciliation des modèles TD et BU

- **Evaluation des conséquences environnementales et économiques des différentes politiques énergétiques et climatiques**
 - Endogénéisation des déterminants économiques et sociodémographiques de la demande de services énergétiques
 - Intégration de la question de l'emploi
 - Prise en compte des différents secteurs économiques
- **Mise en évidence des conditions d'un dialogue constructif**
 - Effort systématique d'éclaircissement des sources d'incompréhension pour chaque modèle, à un niveau technique fin
 - Fondements théoriques
 - Structure
 - Caractéristiques
 - Niveaux d'applications pour l'évaluation des politiques

Principales spécifications des modèles

1- Principales caractéristiques

TIAM-FR - Modèle bottom-up

Secteur énergétique

Riche description détaillée de technologies
(présentes/futures - offre/usage final)

Evolution du système énergétique : résultats issus d'une
multitude de décisions d'adoption de technologies et
d'investissements

Modèle d'optimisation : minimise le coût total actualisé
du système pour satisfaire les demandes de services
énergétiques sous une série de contraintes
prédéterminées

Equilibre partiel : ne considère pas les feedbacks des
marchés non-énergétiques, le prix des facteurs de
production primaire et les effets d'équilibre général
(revenu, épargne)

Ex: pas d'impact des investissements sur le coût du
capital (ni sur les prix du pétrole)

IMACLIM-R - Modèle top-down

Interaction entre le secteur énergétique et
le reste de l'économie

Description agrégée du système

Modélise l'offre et la demande des Biens et Services :
données de la comptabilité nationale en données
monétaires : consommation, prix, revenus,
coûts des facteurs

Modèle d'équilibre général calculable

Simulation des marchés pour les facteurs primaires de
production, les biens et services domestiques et
importés qui sont équilibrés par des
ajustements de prix

Ils réduisent les technologies à des échanges entre les
facteurs de production agrégés ou
des biens de consommation

Ex: les coûts du capital sont traités par défaut comme
le reste de la valeur ajoutée, une fois les coûts du
travail et les rentes des ressources naturelles
soustraites

Principales spécifications des modèles

2- Principaux inputs

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

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

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

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_k(s)$$

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

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

TIAM-FR - Modèle bottom-up

- Evolution de la population
- Croissance du PIB
- Croissance des secteurs
- Coûts de l'approvisionnement en énergie et des technologies d'usage final
- Coûts d'extraction des ressources primaires
- Réserves ou potentiel des ressources primaires

IMACLIM-R - Modèle top-down

- Evolution de la population
- Evolution de la population active
- Productivité du travail
- Taux d'épargne
- Elasticités de substitution de la consommation des ménages
- Elasticités de substitution du commerce international
- Ressources primaires

Principales spécifications des modèles

3- Principaux outputs

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

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

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_k(s)$$

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

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

TIAM-FR - Modèle bottom-up	IMACLIM-R - Modèle top-down
Séries d'investissements dans toutes les technologies	
Niveaux de production de chaque technologie	PIB
Quantités importées et exportées de chaque type d'énergie commercialisable	Emploi
Niveaux d'extraction de chaque forme d'énergie primaire	Production (12 secteurs)
Flux entrée/sortie de chaque commodité de chacune des technologies	Demandes finales et intermédiaires (12 biens) incluant la demande d'énergie finale
Emissions de CO2, CH4 et N2O de chaque technologie, secteur, et globales	Les salaires réels
Evolution de la concentration atmosphérique de GES, le forçage radiatif induit et le changement dans la température globale lui-même induit par ce dernier	Emissions de CO2
	Investissements dans les secteurs de l'énergie
	Emissions de GES

**Structure du système
énergétique**

**Série de variables
macroéconomiques**

Expérimentations préliminaires : premiers échanges de données entre les modèles

Première étape de l'harmonisation : une base commune

POP : Evolution démographique jusque 2100 (données Nations Unies)

IMACLIM-R

- (1) PIB : scénario d'évolution
- (2) Désaggrégation sectorielle de l'évolution du PIB [2005-2100]

TIAM-FR

Implémentation de nouveaux déterminants de la demande de services énergétiques

Analyse des résultats

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

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

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_i$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_{ks}$$

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

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



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

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

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

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

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

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

Réagrégation régionale dans IMACLIM-R suivant la répartition dans TIAM-FR

IMACLIM-R	
AFR	Afrique
BRA	Brésil
CAN	Canada
CHI	Chiné
EU	Europe
IND	Inde
MEA	Moyen-Orient
OECDpac	Japon, Australie, Nouvelle-Zélande, Corée du Sud
RoA	Reste de l'Asie
RoLA	Reste de l'Amérique Latine
USA	Etats-Unis d'Amérique

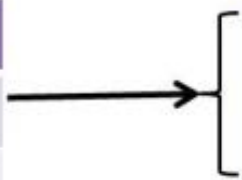
TIAM-FR	
AFR	Afrique
AUS	Australie / Nouvelle-Zélande
CAN	Canada
CHI	Chine
CSA	Amérique Centrale et du Sud
EEU	Europe de l'Est
FSU	Ancienne Union Soviétique
IND	Inde
JPN	Japon
MEX	Mexique
MEA	Moyen-Orient
ODA	Autres pays en développement d'Asie
SKO	Corée du Sud
USA	Etats-Unis d'Amérique
WEU	Europe de l'Ouest



Désagrégation des sorties de l'industrie lourde dans IMACLIM-R selon les demandes industrielles de TIAM-FR

IMACLIM-R
Output Industrie lourde
Output Services
Output Agriculture

TIAM-FR
Chimie
Fer & Acier et métaux non-ferreux
Minéraux non-métalliques et Papier
Autres Industries intensives en énergie
Input Services
Input Agriculture



Scenarios analysés : BAU et politique climatique (450 ppm)

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

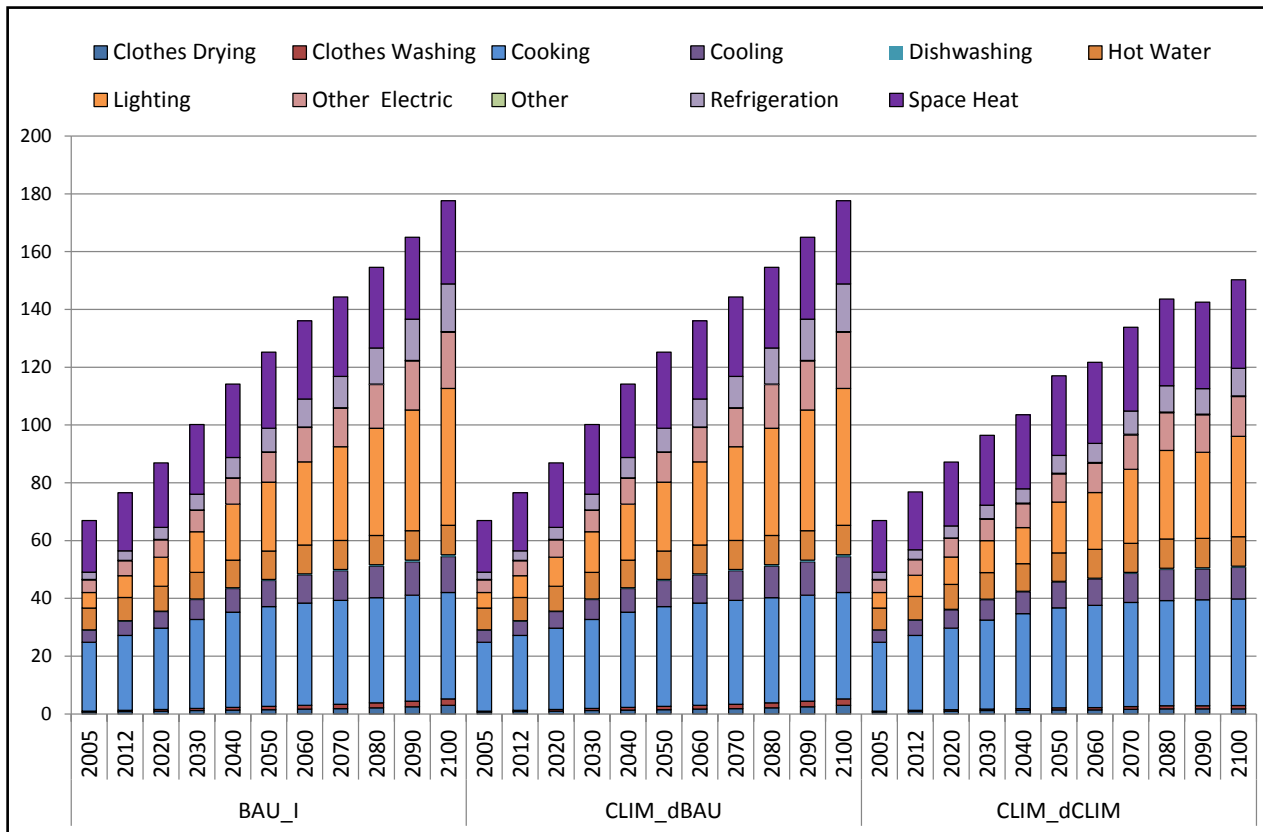
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

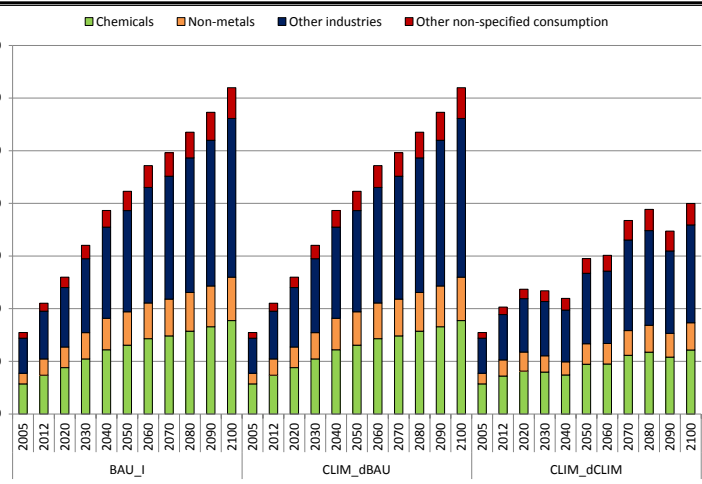
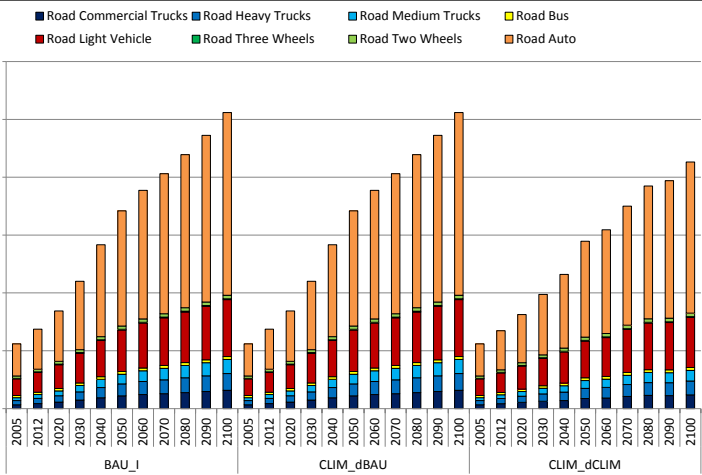
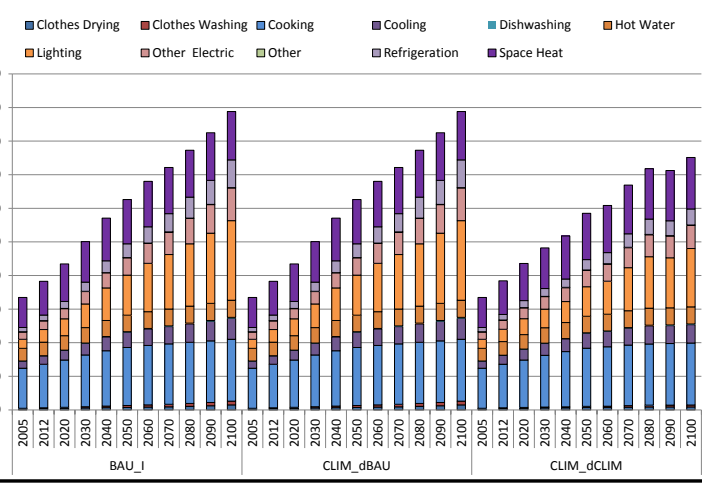
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_s$$

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

Scénarios exécutés dans TIAM-FR	Indicateurs macroéconomiques provenant de :	
	Scénario BAU dans IMACLIM-R	Scénario CLIM dans IMACLIM-R
	BAU	X
CLIM_dCLIM		X
CLIM_dBAU	X	



Demandes de services énergétiques dans le secteur résidentiel (EJ)



R
é
s
i
d
e
n
t
i
e
l

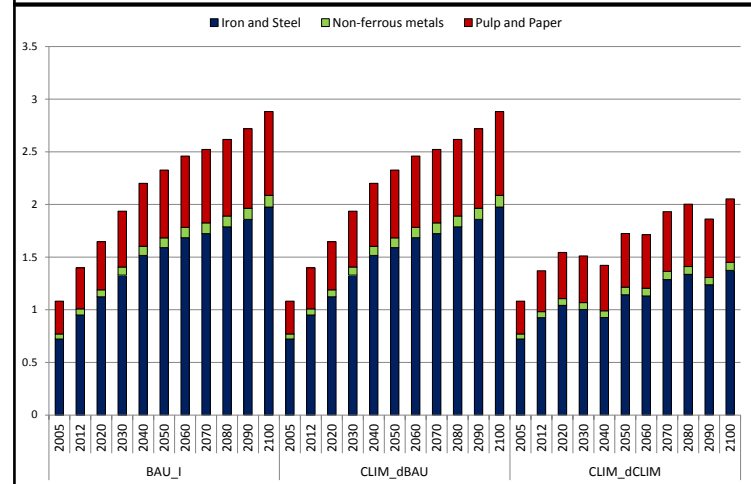
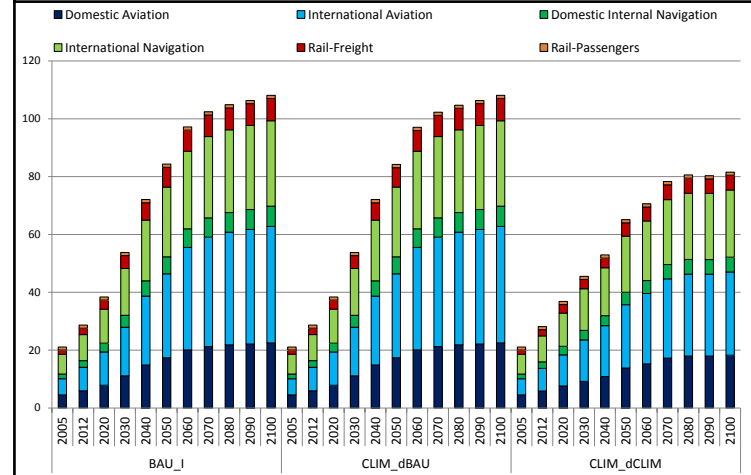
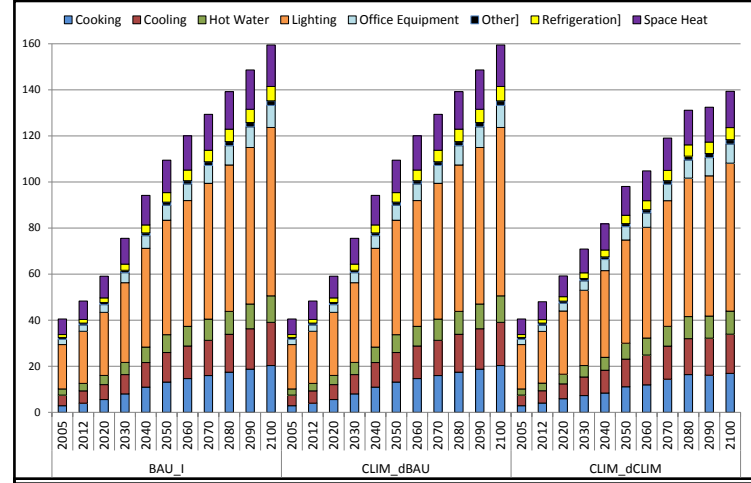
T
r
a
n
s
p
o
r
t

I
n
d
u
s
t
r
i
e

T
e
r
t
i
a
i
r
e

T
r
a
n
s
p
o
r
t

I
n
d
u
s
t
r
i
e



Scenarios analysés : BAU et politique climatique (450 ppm)

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

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

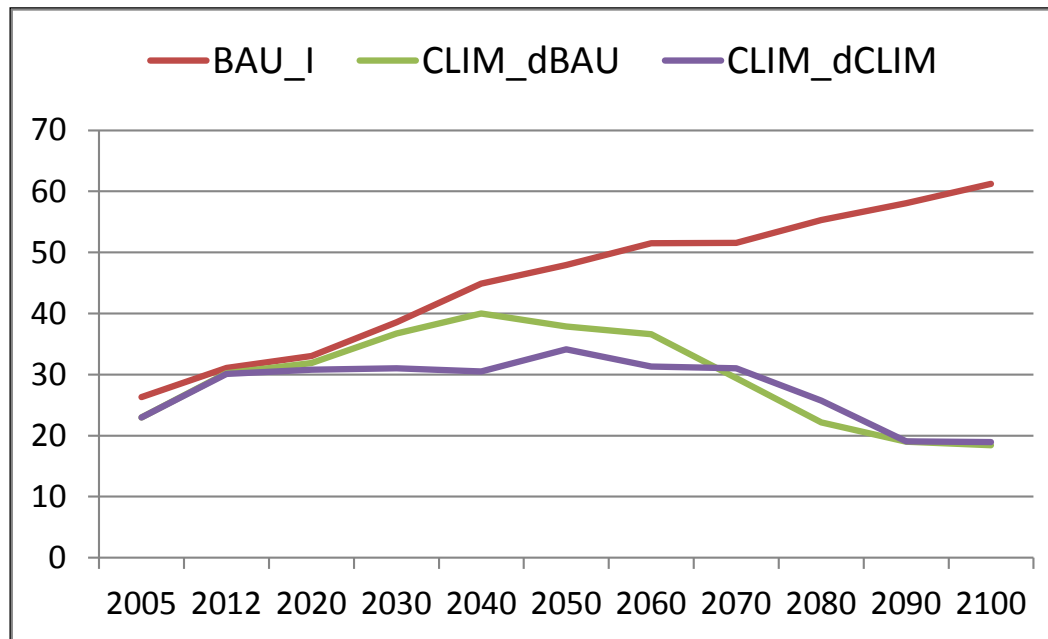
$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_k(s)$$

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

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

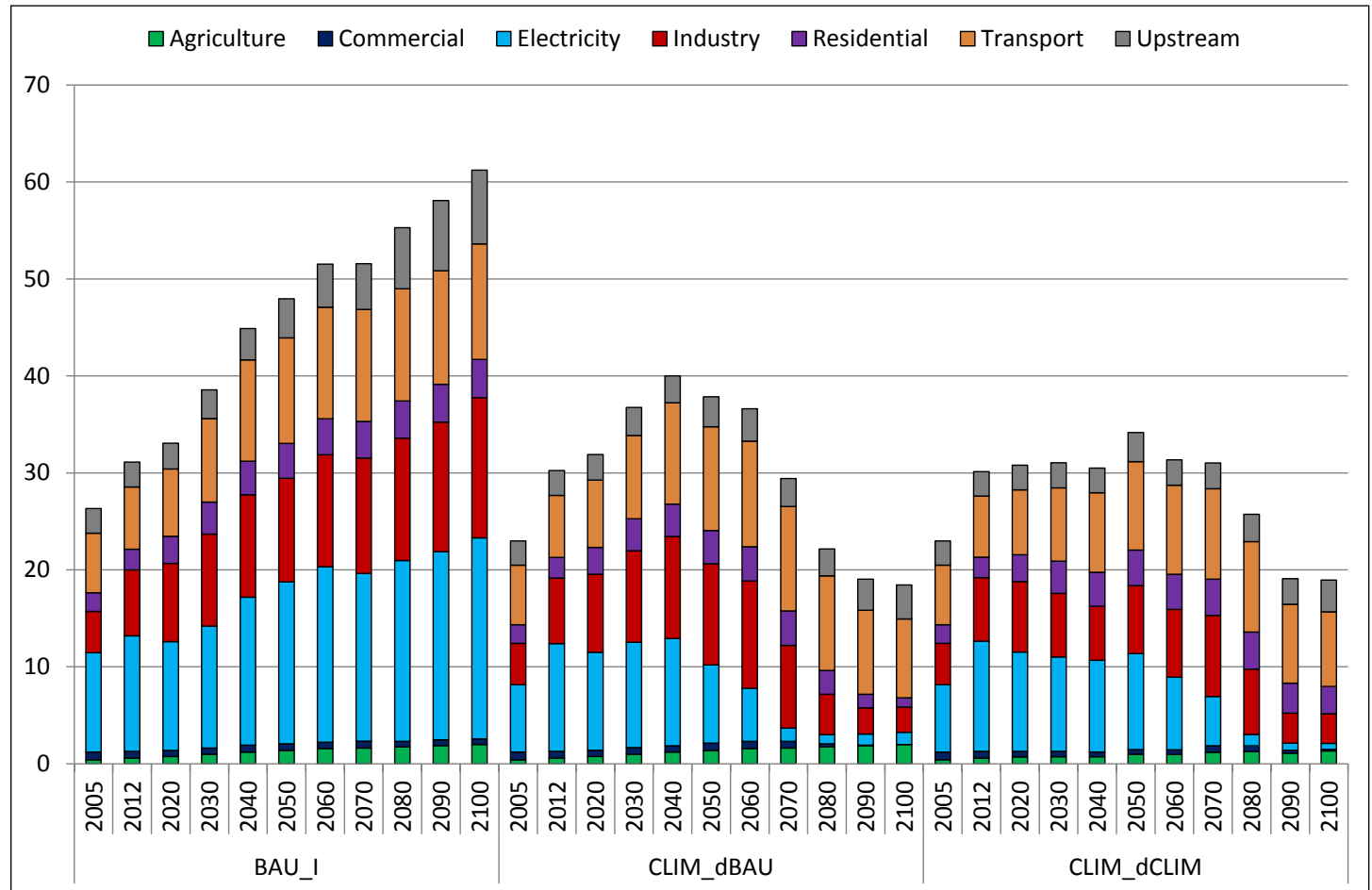
Scénarios exécutés dans TIAM-FR	Indicateurs macroéconomiques provenant de :	
	Scénario BAU dans IMACLIM-R	Scénario CLIM dans IMACLIM-R
	BAU	X
CLIM_dCLIM		X
CLIM_dBAU	X	



**Emissions
mondiales
de CO₂ (Gt)**

Deux trajectoires différentes cohérentes avec une cible de 450ppm en 2100 pour les émissions de CO₂

Emissions mondiales de CO2 par secteur (Gt)



Les trajectoires d'émissions sont différentes en raison des niveaux différents des demandes

Consommation mondiale d'énergie primaire (mtep)

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

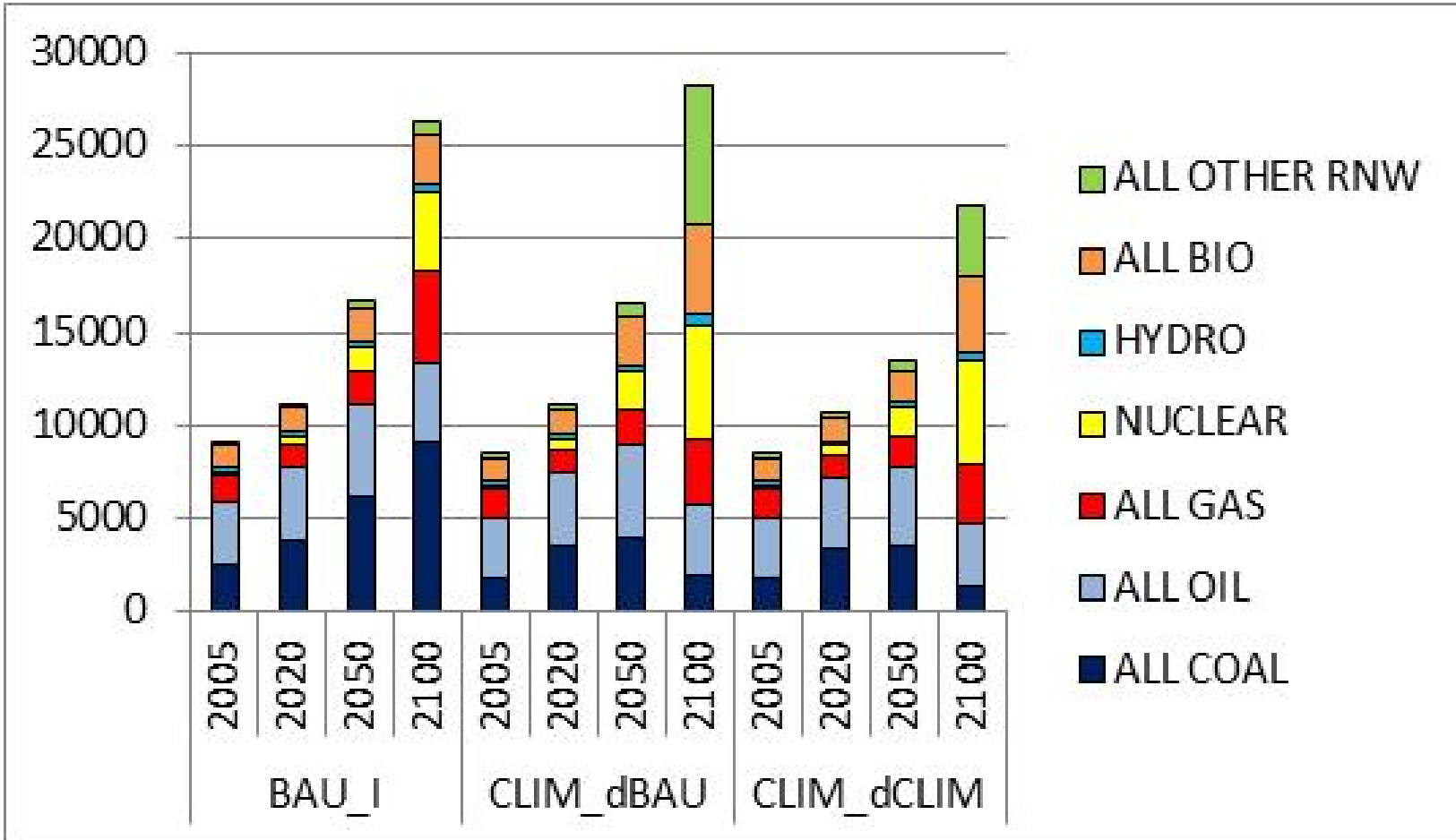
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Consommation mondiale d'énergie finale (mtep)

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

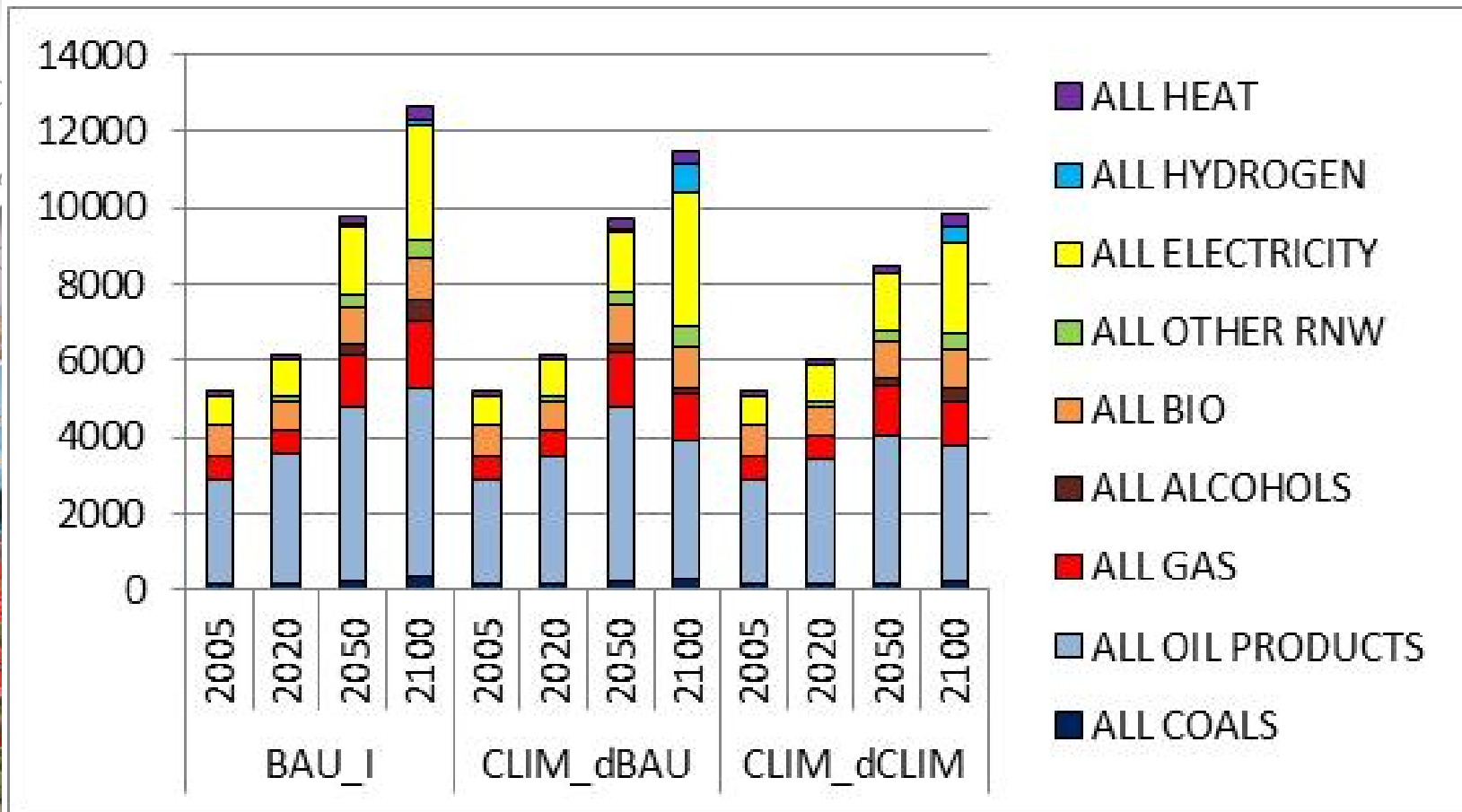
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

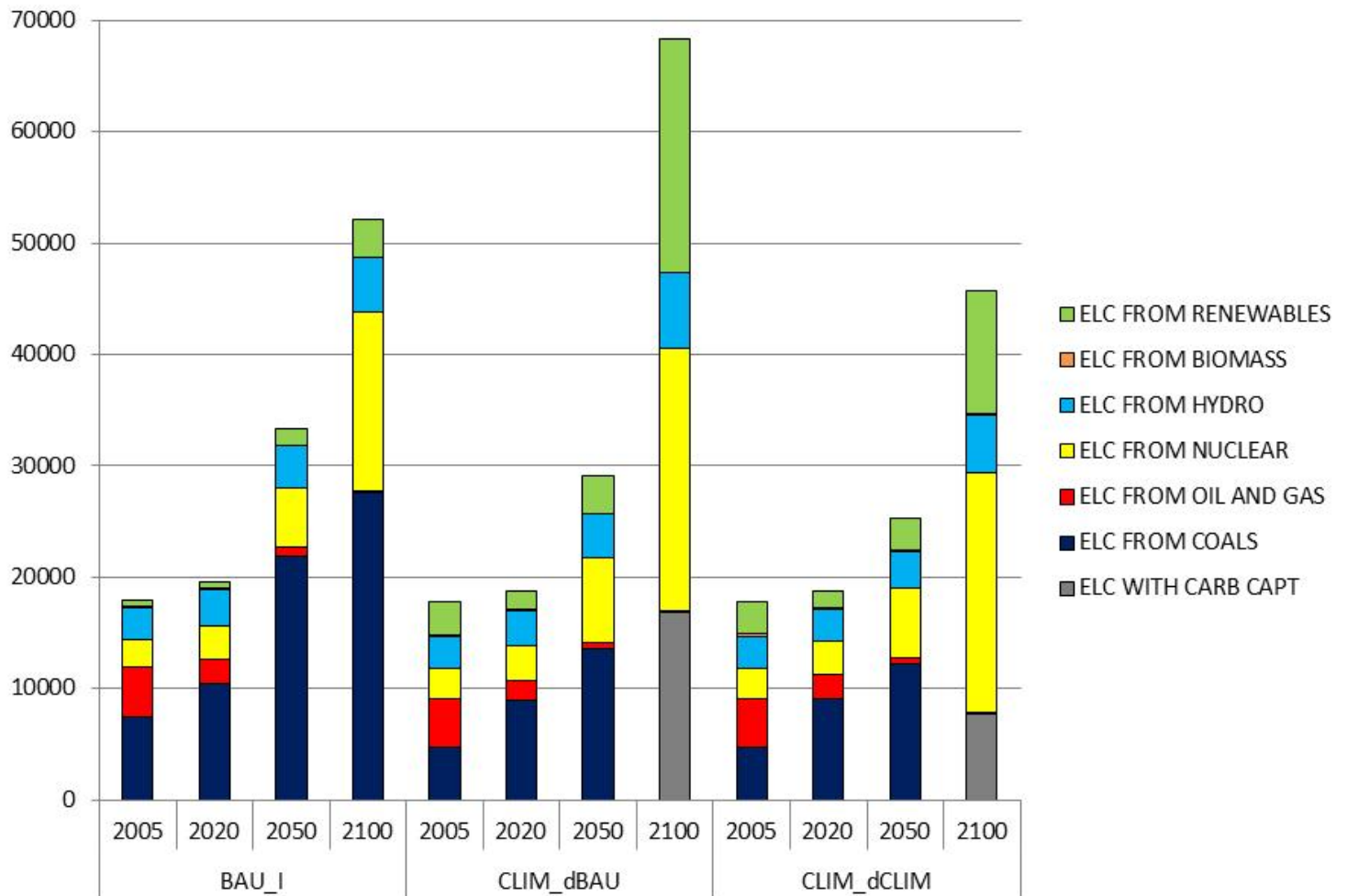
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$

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

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



Production mondiale d'électricité (TWh)



Le défi du couplage des modèles

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

Couplage des modèles
Bottom-up/Top-down

Portée

Nomenclature

Cadres conceptuels

CLARIFICATION – HARMONISATION - CONCILIATION

Le cadre conceptuel : le challenge de la conciliation

- Le principal obstacle à l'harmonisation des deux cadres
 - Avec des divergences dans les prédictions en tant qu'indicateur du degré d'harmonisation
- Optimisation vs approche récursive des dynamiques de temps
 - TIAM-FR: les résultats décrivent les investissements et les trajectoires de consommation minimisant le coût du système sous anticipation parfaite
 - IMACLIM-R: résultats sous anticipations imparfaites
 - Gap mais passerelle potentielle avec des contraintes représentant des caractéristiques sous-optimales (ex : contexte du pétrole brut avec des contraintes exogènes exprimant des marchés internationaux stratégiques et des coûts d'échanges croissants représentant les rentes)
- Programme lourd pour faire retourner le modèle tous les 5 ans, les périodes étant alors recalibrées en fonction des retours d'IMACLIM-R
- Travail autour des élasticités de la demande



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

$$\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRG} varom_i(t).$$

$$\sum_{E \in LA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varom_i(t) \cdot P_{lzy}$$

$$\sum_{E \in ENC} \sum_s cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ELCs}$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCs}(t) \cdot EXP_{ELCs}(t)$$

Merci pour votre attention !

Static equilibrium and dynamic nexus coupling in IMACLIM-R

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

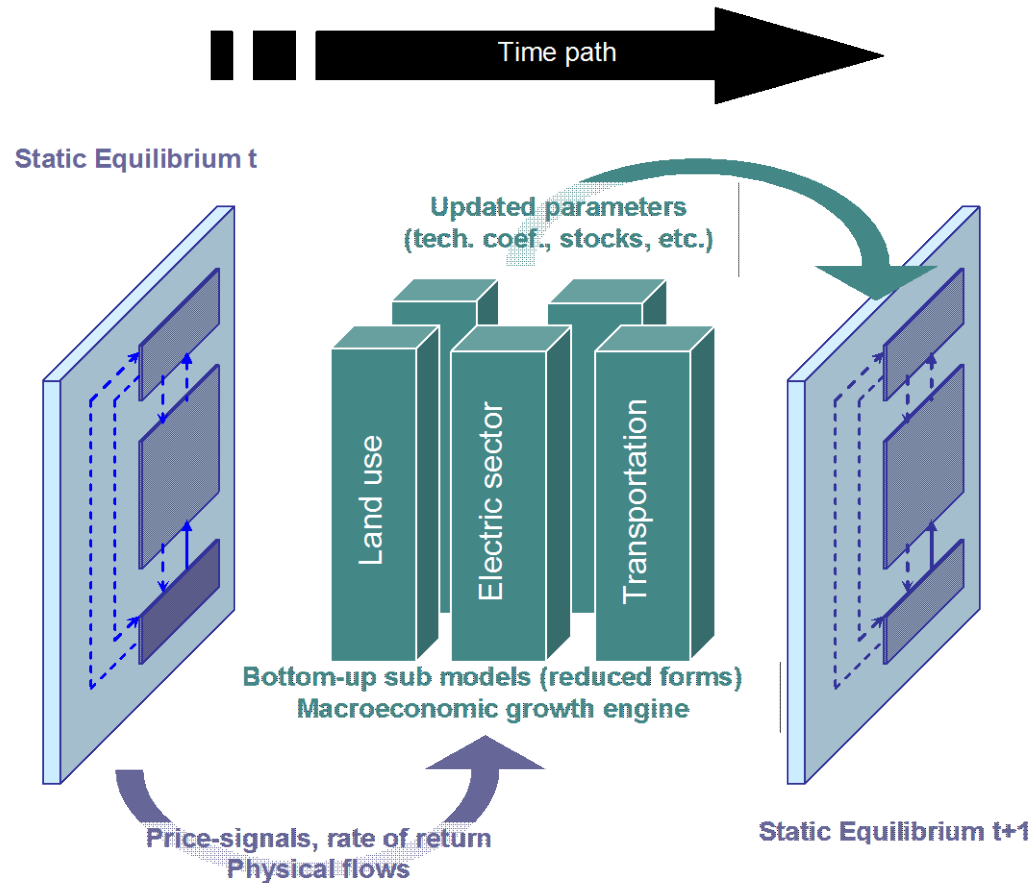
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_k(s)$$

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

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



Energy services demands

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

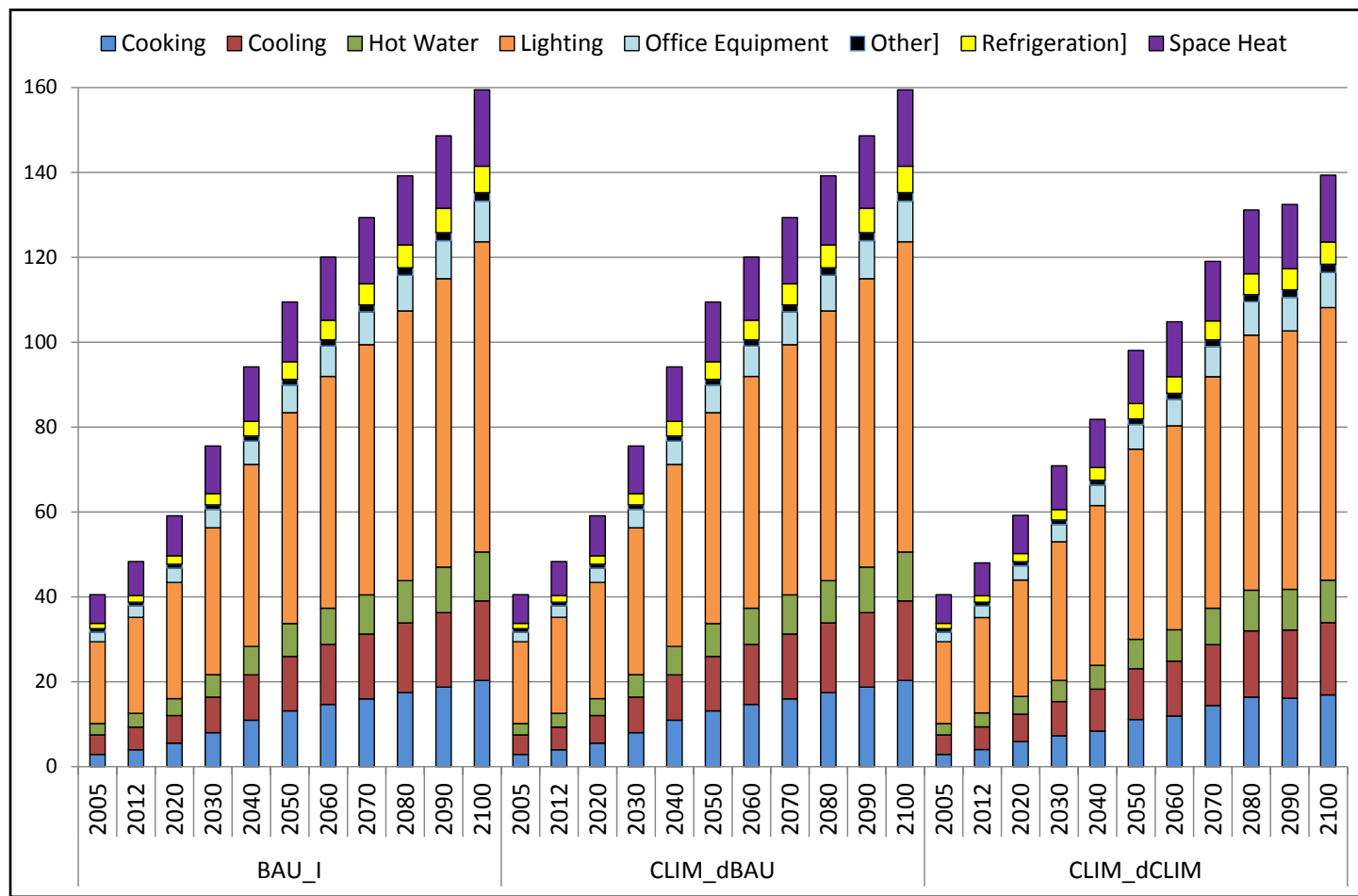
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_i$$

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

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

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



Demands for energy services in commercial sector (EJ)

Energy services demands

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

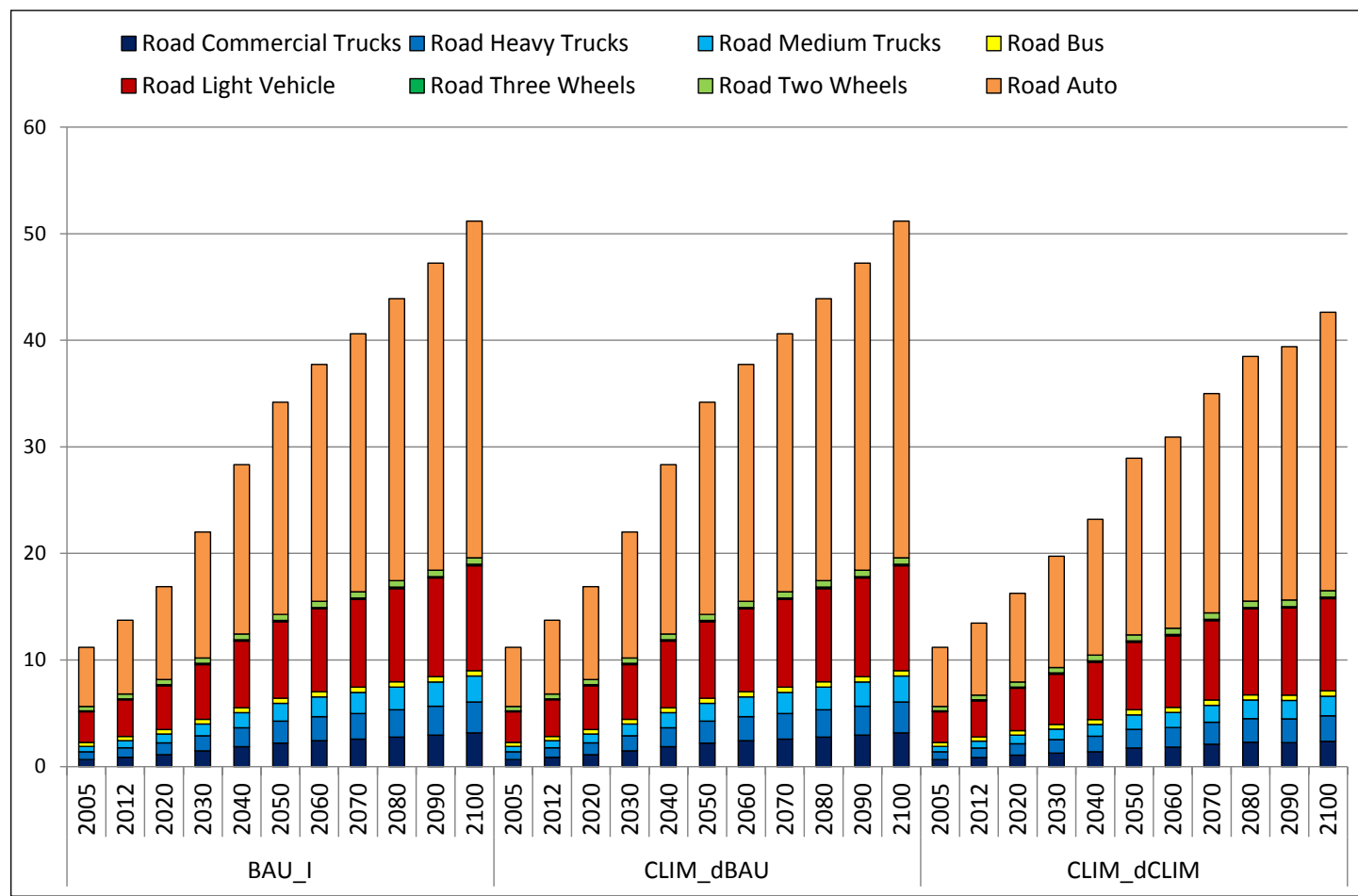
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

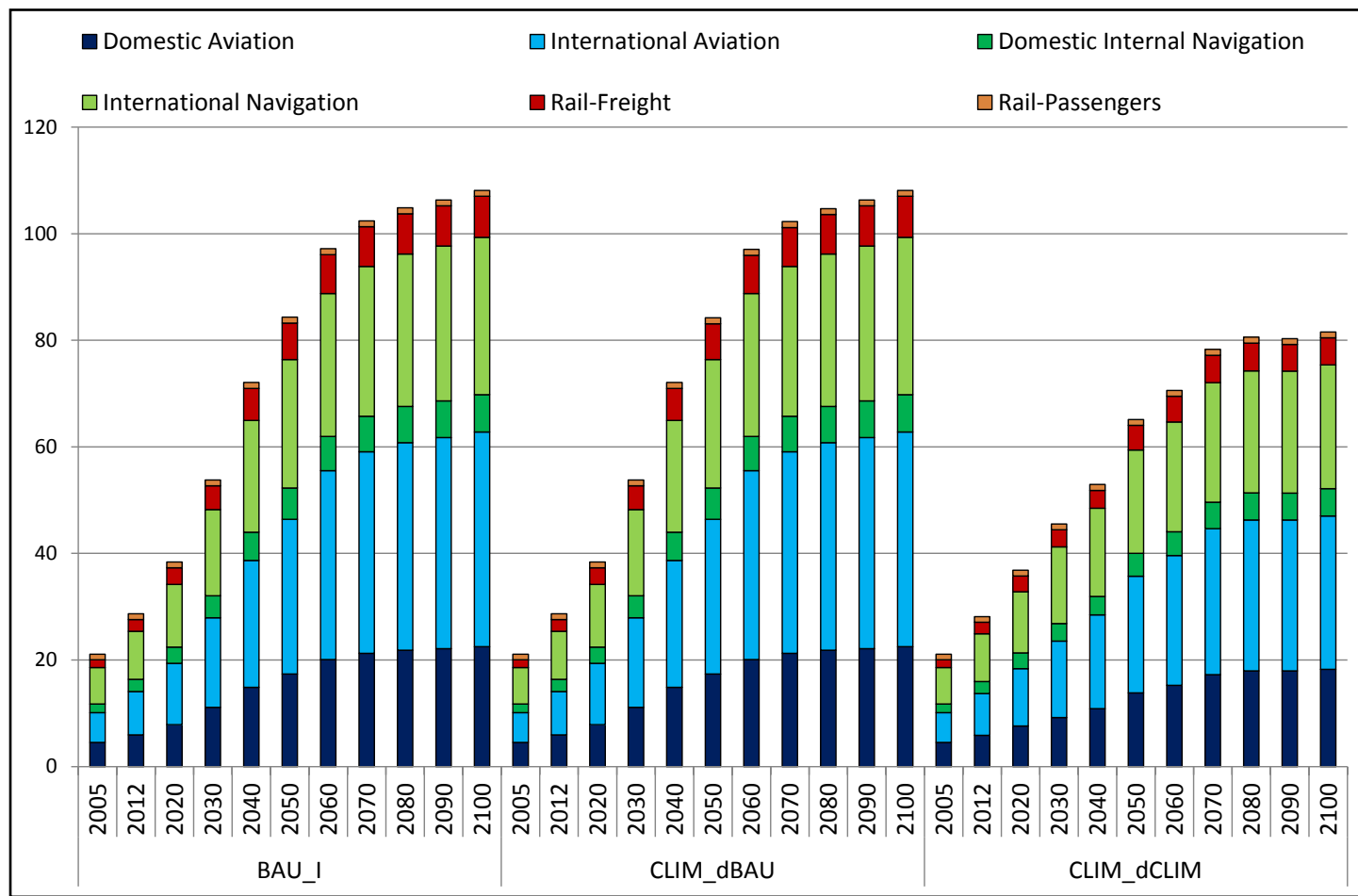
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

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



Demands for energy services in transport sector (road transportation) (Bv/km)

Energy services demands



Demands for energy services in transport sector (excl. road transportation) (EJ)

Energy services demands

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

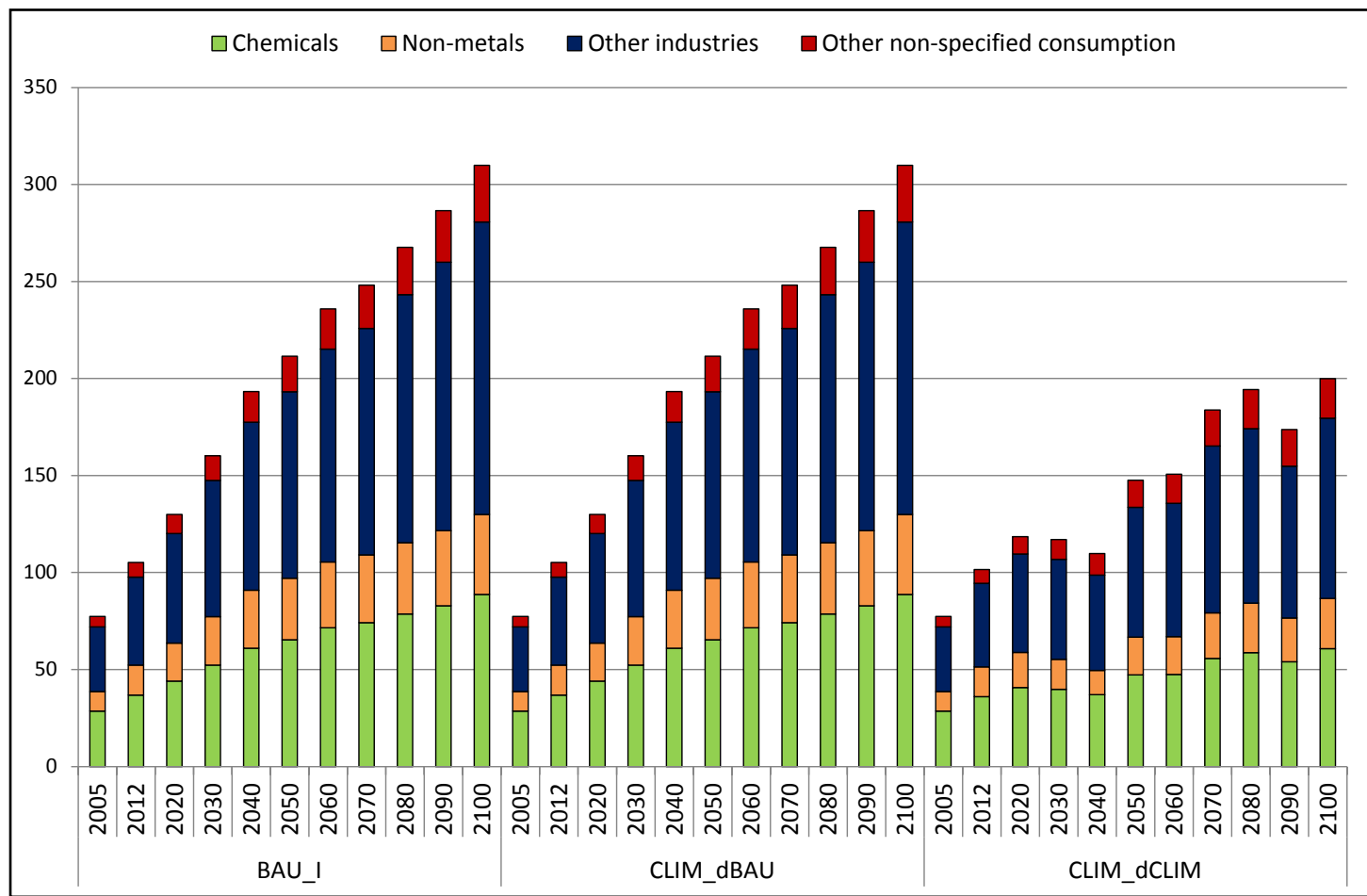
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

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

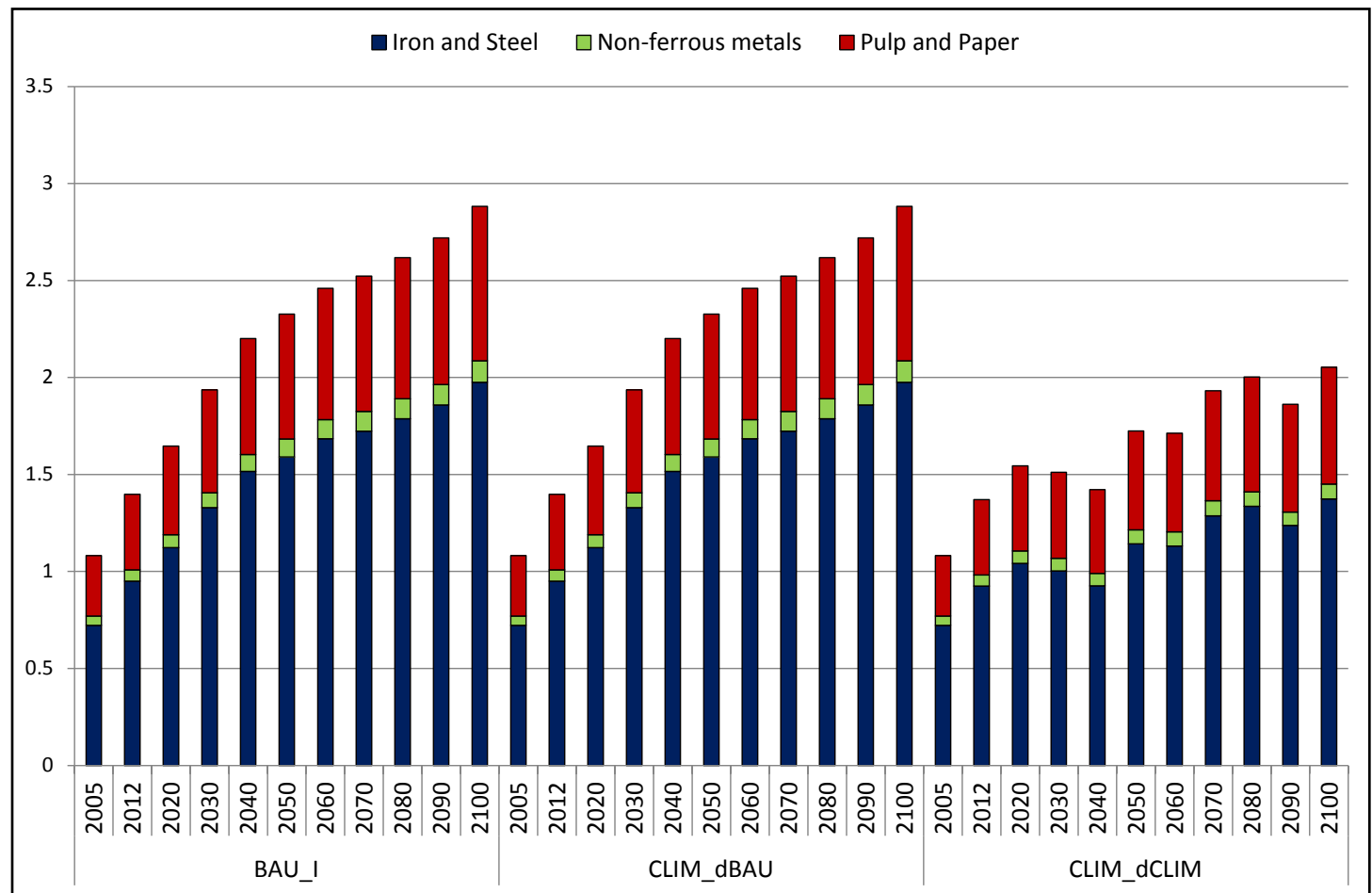
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

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



Demands for energy services in industry sector (EJ)

Energy services demands



Demands for energy services in industry sector (Mt)