



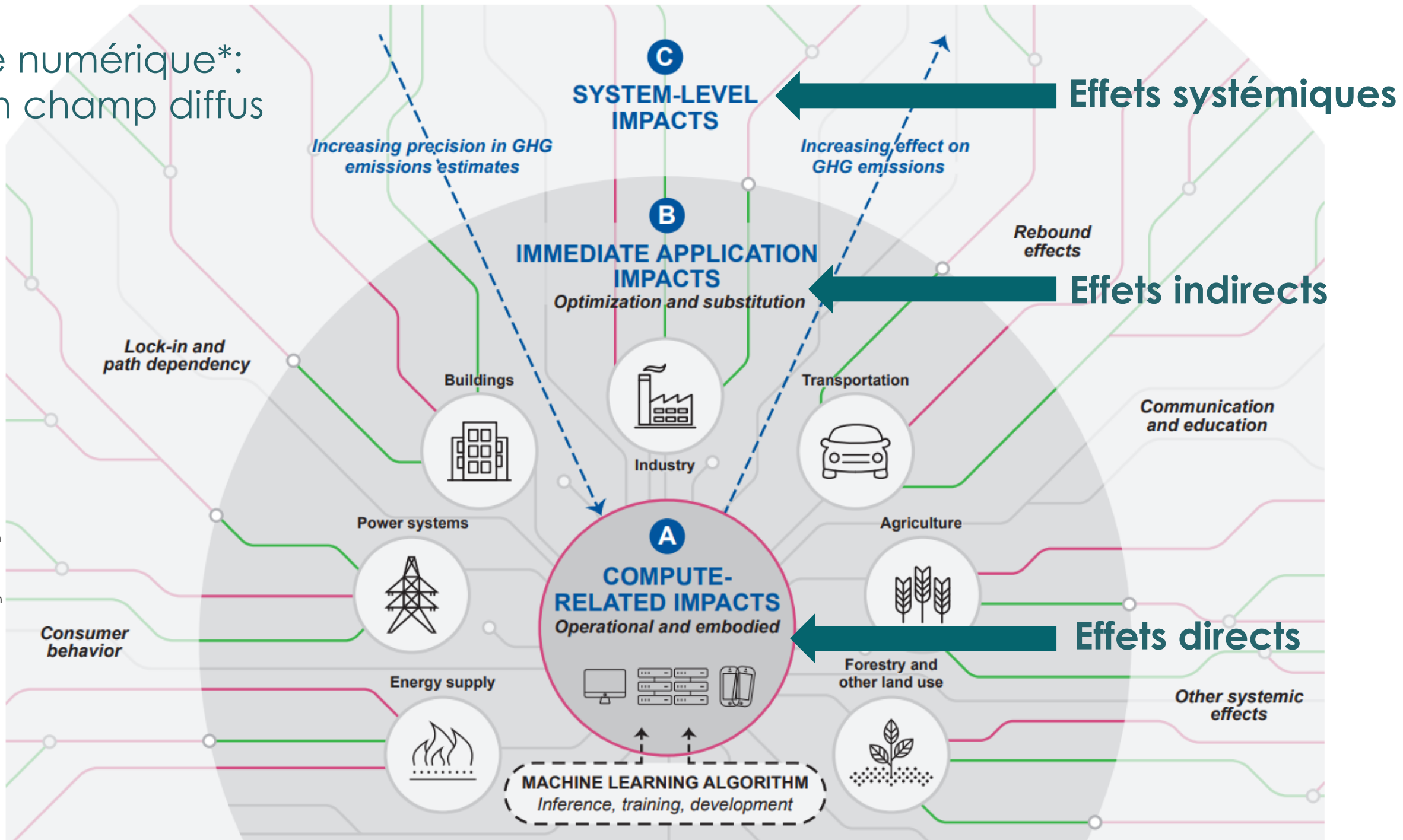
Impacts de la numérisation sur les scénarios énergie/climat

Rémi PACCOU, doctorant au CIRED
Sous la direction de Franck LECOCQ

Journée MPDD 8 octobre 2025



Le numérique*: Un champ diffus



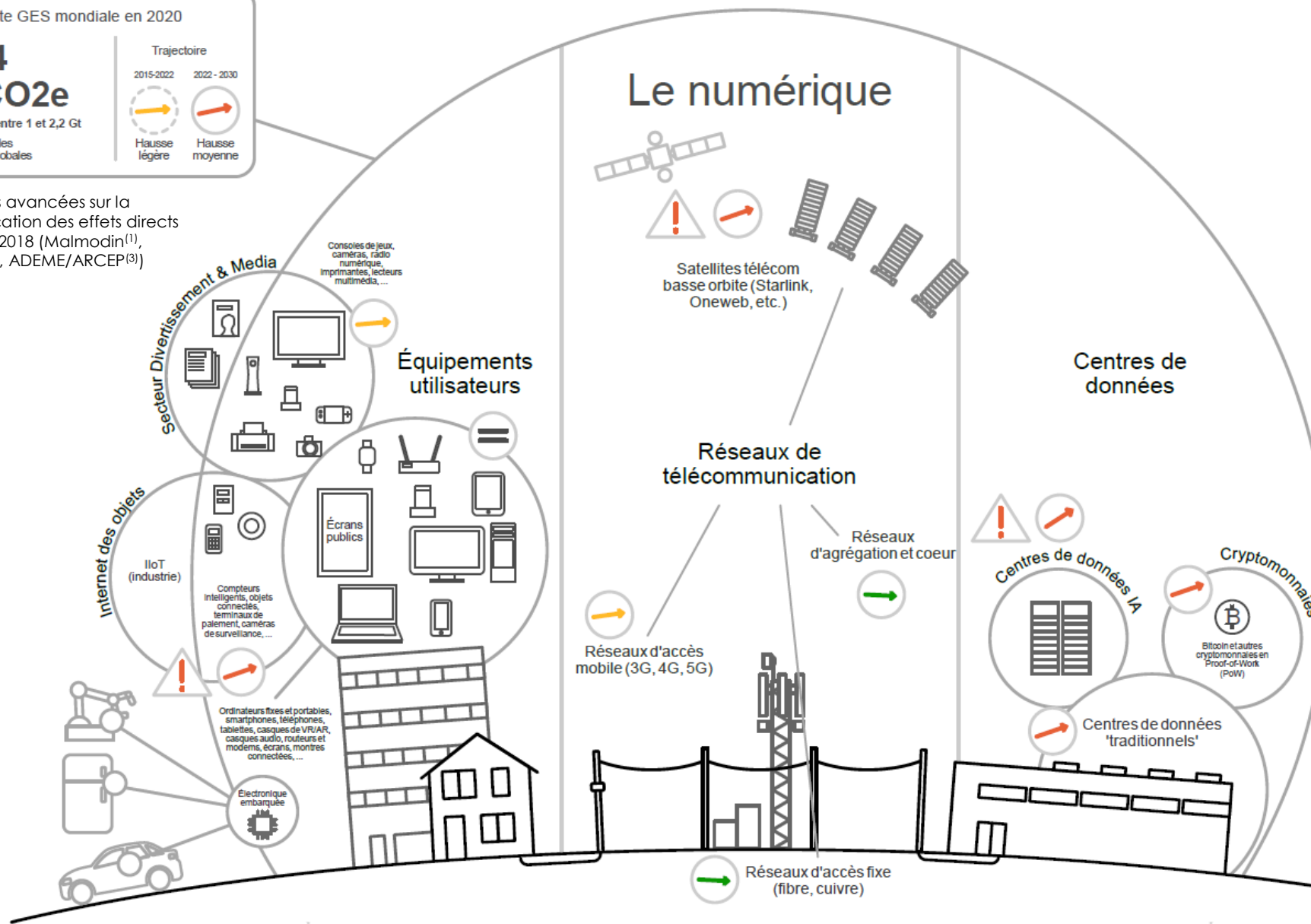
*Par convention numérique = ICT: Information and Communication Technologies

Kaack, L et al, (2022). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. Nature Climate Change, 12(6), 518–527

L'empreinte directe: ~4/6% de la demande électrique mondiale⁽¹⁾



De fortes avancées sur la quantification des effets directs depuis ~2018 (Malmudin⁽¹⁾, Freitag⁽²⁾, ADEME/ARCEP⁽³⁾)



- (1) Malmudin, J., & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. Sustainability, 10(9), 3027.
- (2) Freitag, C., et al. (2021). The real climate and transformative impact of ICT. Patterns, 2(9).
- (3) ADEME, ARCEP (2025), Actualisation des chiffres de l'impact du numérique en France, Librairie ADEME

Légende

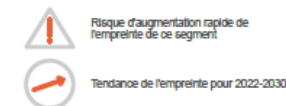
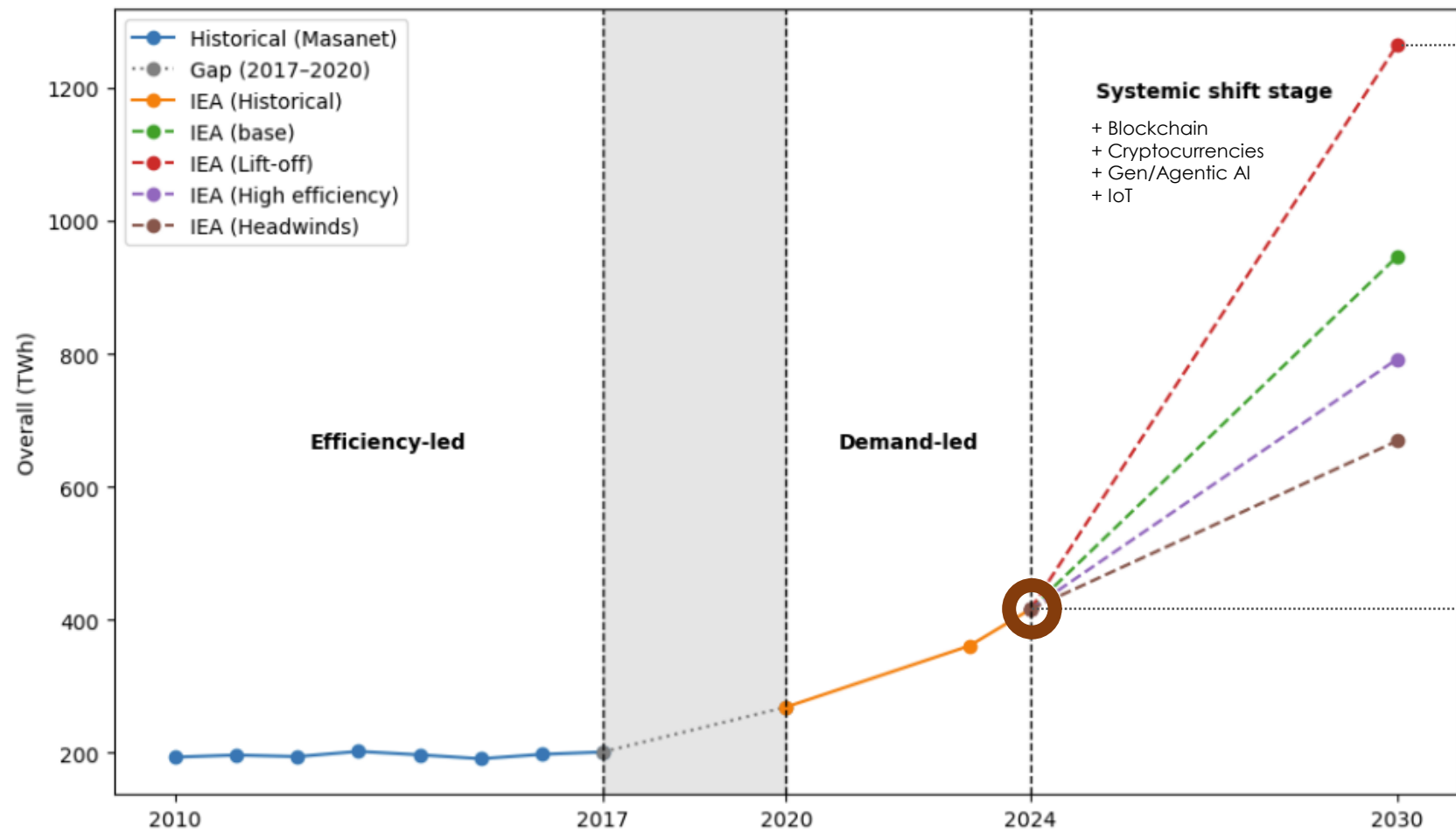


Schéma basé sur standards ITU et référentiels ARCEP.

L'empreinte directe: Puissance de calcul et demande électrique^(1,2,3,4)



Une puce IA actuelle* effectue 82 milliards de fois plus d'opérations que l'ordinateur de bord d'Apollo 11⁽⁵⁾

*H100, 2 000 TFLOPS (FP16), 700W, $1,4 \times 10^{12}$ FLOPS/W, $6,3 \times 10^{22}$

Quelle orientation pour cette puissance de calcul?

Enjeux environnementaux, développement socio-économique, ou usages plus larges et multiformes ?

Capacités computationnelles Ordre de grandeur dans l'histoire		Nombre d'opérations avec 1 TWh/an
Antiquité	Abacus babylonien/romain : calcul manuel (opérations humaines)	~10 ⁷ à 10 ⁸
Renaissance	Bâtons de Napier (~1617) : premier calcul mécanique manuel	~10 ¹¹ à 10 ¹²
Révolution industrielle	Machine analytique de Babbage (théorique) : première machine mécanique à calculer automatiquement	~10 ¹³ à 10 ¹⁴
Après-guerre (WWII)	Colossus (1944) : décryptage des codes allemands (crypto nazi, Bletchley Park)	~10 ¹⁷
Apollo (1969, Lune)	Apollo Guidance Computer : calcul embarqué pour navigation spatiale	~8 × 10 ¹⁷
IA actuelle (2025)	GenAI/Large Language Model (H100e, modèles 2025) : inférence et entraînement de pointe	10 ²⁷ à 10 ²⁸

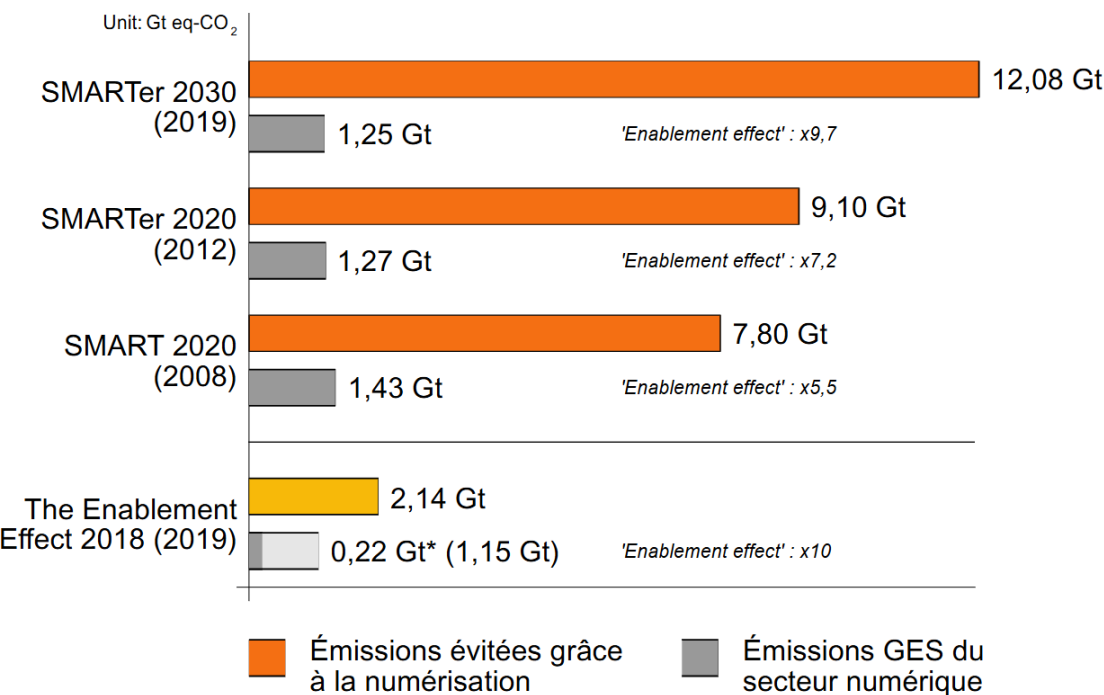
(1) Freitag, C., et al. (2021). The real climate and transformative impact of ICT. Patterns, 2(9).
(2) IEA (2024). Electricity 2024 & Data Centres and Data Transmission Networks. IEA Publications.
(3) Schneider Electric Sustainability Research (2025), Artificial Intelligence and Electricity: A System Dynamics Approach
(4) IEA (2025), AI and Energy. IEA Publications
(5) Robi Rahman (2025), "Leading ML hardware becomes 40% more energy-efficient each year". Published online at epoch.ai. Retrieved from: 'https://epoch.ai/data-insights/ml-hardware-energy-efficiency'



Les effets indirects liés à l'usage

Le « potentiel » d'effets positifs de la numérisation à l'épreuve de la taxonomie

Plusieurs études, notamment celles du GeSI ^(1,2,3) et de la GSMA⁽⁴⁾, soulignent les gains d'efficacité potentiels de la numérisation pour la transition écologique, bien que leurs méthodologies et résultats restent difficilement comparables.



*Le rapport GSMA compare uniquement les émissions des télécommunications mobiles aux émissions potentiellement évitées par ces dernières. L'empreinte totale du secteur numérique est rappelée entre parenthèses.

Ces études ne prennent en compte que les effets de substitution/efficacité. ⁽⁵⁾

Source/effect		Taxonomy									
		ITU L.14xx Standards	Börjesson Rivera et al.		Horner et al.		Rattle	Williams	Berkhout & Hertin	Hilty & Aebischer	Pohl et al.
Lifecycle of ICT	Raw material acquisition	First order effects	First order effects	First order effects/direct effects	Direct	Embodied	ICT infrastructure and devices	Direct effects	Life-cycle impact	Direct effects	Direct footprint
	Production					Operational					
	Use					Disposal					
	End-of-life treatment										
Substitution		Second order effects		Substitution effects	Indirect: single service	Substitution	Substitution	Applications	Indirect effects		
Optimization					Efficiency	Optimization					
Direct rebound		Higher order effects	Second order effects	Direct economic rebound effects	Indirect: complementary services	Direct rebound	Induction			Enabling impact (micro level)	Higher order effects
Indirect rebound				Indirect economic rebound effects		Indirect rebound	Supplementation				
				Time rebound							
				Space rebound							
Transformational rebound				Transformational rebound effects	Indirect: economy-wide	Economy-wide rebound (structural change)	Creation	Effects on economic growth and consumption patterns			
Induced consumption				Economy-wide rebound							
Sustainable lifestyle & practices				Rematerialisation and induction							
				Learning about production and consumption							
				Changed practices							
Systemic transformation & structural economic change					Scale effects and learning in production and consumption	Indirect: society-wide	Systemic transformation	Systemic effects on technology convergence and society		Structural impact (macro level)	

(1) The Climate Group, GeSI, "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age," GeSI, 2008.
(2) Boston Consulting Group, GeSI, "SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future," GeSI, 2012.
(3) Accenture Strategy, GeSI, "#SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges," GeSI, 2015.
(4) GSMA, The Carbon Trust, "The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions," GSMA, 2019.
(5) Bremer, et al. (2024). Assessing energy and climate effects of digitalization: Methodological challenges and key recommendations. Digitalization, energy and climate(p10). Springer.

Les effets indirects liés à l'usage

Vers les effets nets environnementaux: Des méthodologies encore complexes

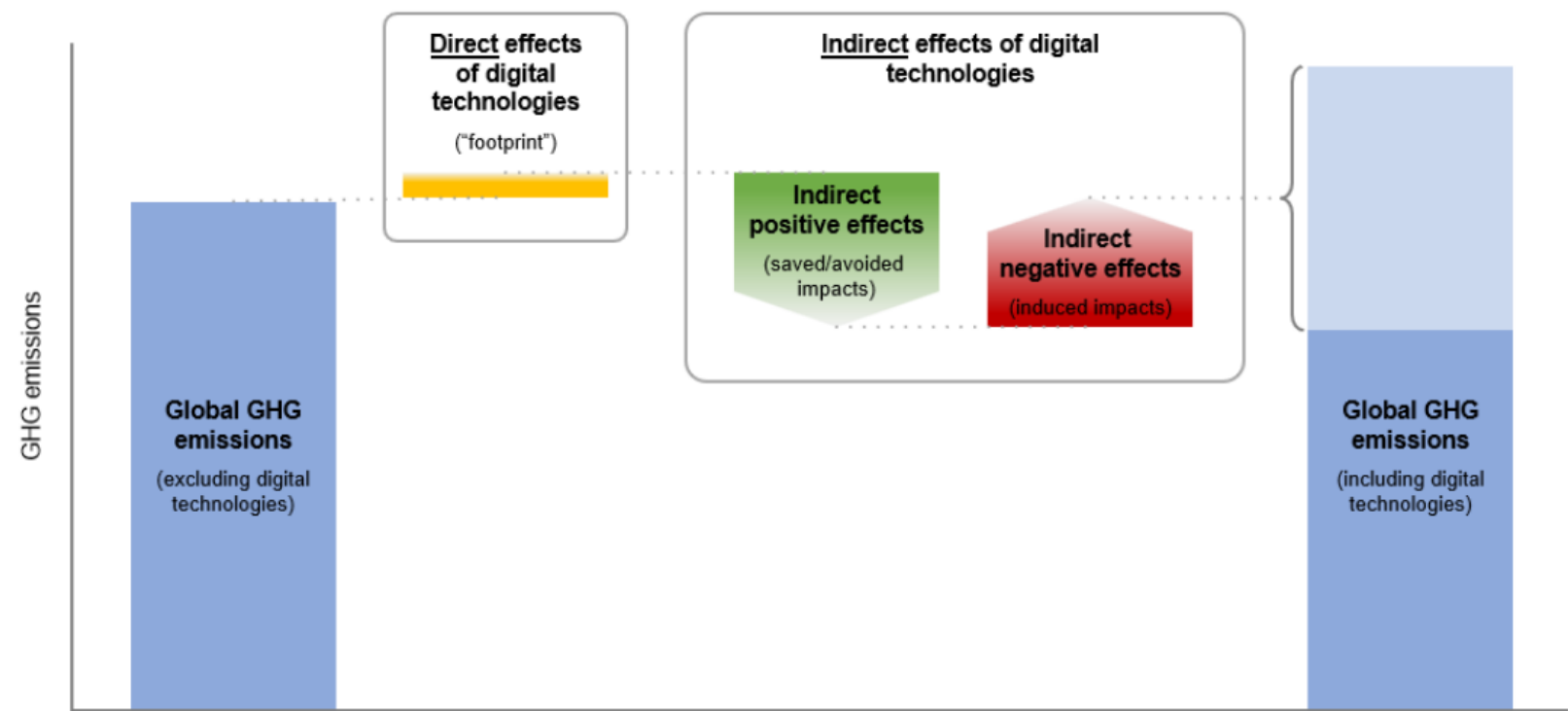
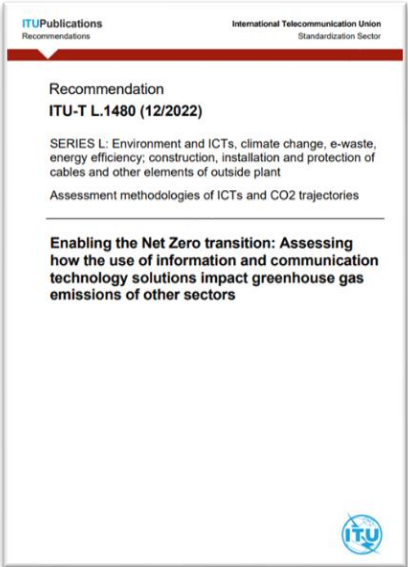
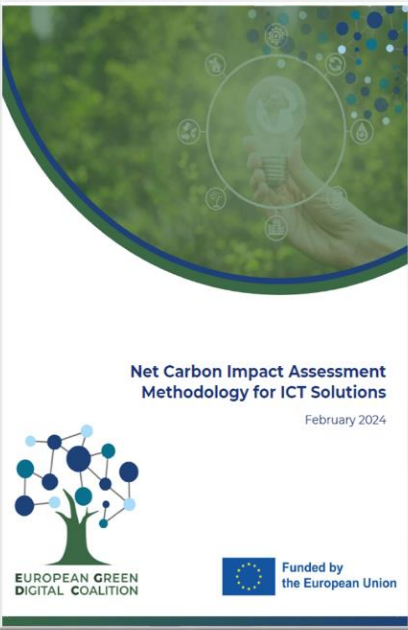


Figure (1): (a) émissions directes du numérique (CV matériel/infrastructures, jaune), (b) effets indirects positifs (bénéfices évités, vert), (c) effets indirects négatifs (rebonds, usages facilités, rouge) ; incertitudes majeures : échelle purement indicative.



(2)



(3)

(1) Bremer, C., Kamiya, G., Bergmark, P., Coroamă, V. C., Masanet, E., & Lifset, R. (2024). Assessing energy and climate effects of digitalization: Methodological challenges and key recommendations. Digitalization, energy and climate(p5). Springer.

(2) ITU-T L.1480. Enabling the Net Zero transition: Assessing how the use of information and communication technology solutions impact greenhouse gas emissions of other sectors.

(3) European Green Digital Coalition (EGDC). (n.d.). Net Carbon Impact Assessment Methodology for ICT Solutions. Green Digital Coalition.

L'histoire des systèmes d'information révèlent des mécanismes causaux

Transmettre l'information...



Optique...



Electrique...



Electrique...



Electro-magnétique...



(sans fil)...



Électronique numérique
Optoélectronique...



Télégraphe électrique 1830 – 1910

Amélioration de la rapidité et de l'efficacité des communications → substitution des modes traditionnels, notamment le courrier postal et messenger physique → effet d'entraînement important via l'accélération du commerce, des décisions politiques et de la coordination économique ^(1, 2, 3).

Stocker l'information...



Manuel sur
argile/pierre...



Manuel sur
parchemin/papier...



Typographique sur
papier...



Optique-chimique



Electro-magnétique



Acoustique-
mécanique...



Electro-
magnétique...



Numérique-électronique-
électromagnétique
(sans fil)



Électronique numérique
Optoélectronique...



Ecriture cunéiforme, Sumer 2600BC

Instructions agricoles codifiées → coordination de systèmes d'irrigation centralisés (possible à grande échelle, impossible localement) → gains de productivité + expansion territoriale → salinisation des sols ^(4,5).

Traiter l'information...



Numérique-Manuel...



Numérique-
Mécanique



Numérique-
Electromécanique



Analogue-électronique



Électronique numérique



IA moderne

Automatisation et optimisation massive des processus, croissance rapide de la demande numérique et des nouveaux services (cloud, IA générative), effets rebond par la multiplication des usages et une consommation accrue d'énergie et de ressources, diffusion sociale de l'IA à usage générale.

- (1) Musée des Arts et Métiers-Cnam/photos S.Pelly/P. Faligo
- (2) Maurer, N. (1996). "The Telegraph and the Growth of the Firm in Nineteenth-Century America." Journal of Economic History, 56(2), 456-472.
- (3) Belloc, Alexis. La télégraphie historique depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. Ouvrage illustré de 76 gravures. Paris : Firmin-Didot, 1894.
- (4) Jacobsen, T., & Adams, R. M. (1958). Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture. Science, 128(3334), 1251-1258.
- (5) Creutzig, F., et al. (2022). Digitalization and the Anthropocene. Annual Review of Environment and Resources, 47, 479-509.

La numérisation (« digital ICT ») intensifie systématiquement ces interactions

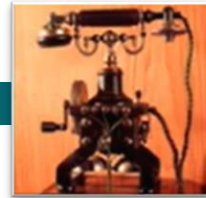
Transmettre l'information...



Optique...



Electrique...



Electrique...



Electro-magnétique...



(sans fil)...



Électronique numérique
Optoélectronique...

Stocker l'information...



Manuel sur
argile/pierre...



Manuel sur
parchemin/papier...



Typographique sur
papier...



Optique-chimique



Electro-magnétique



Acoustique-
mécanique...



Electro-
magnétique...



Numérique-électronique-
électromagnétique
(sans fil)



Électronique numérique
Optoélectronique...

Traiter l'information...



Numérique-Manuel...



Numérique-
Mécanique



Numérique-
Electromécanique



Analogue-électronique

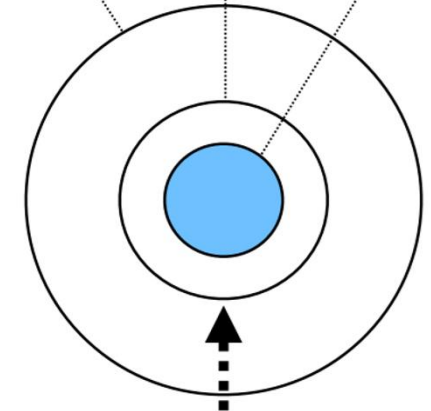


Électronique numérique

Technology

ICT

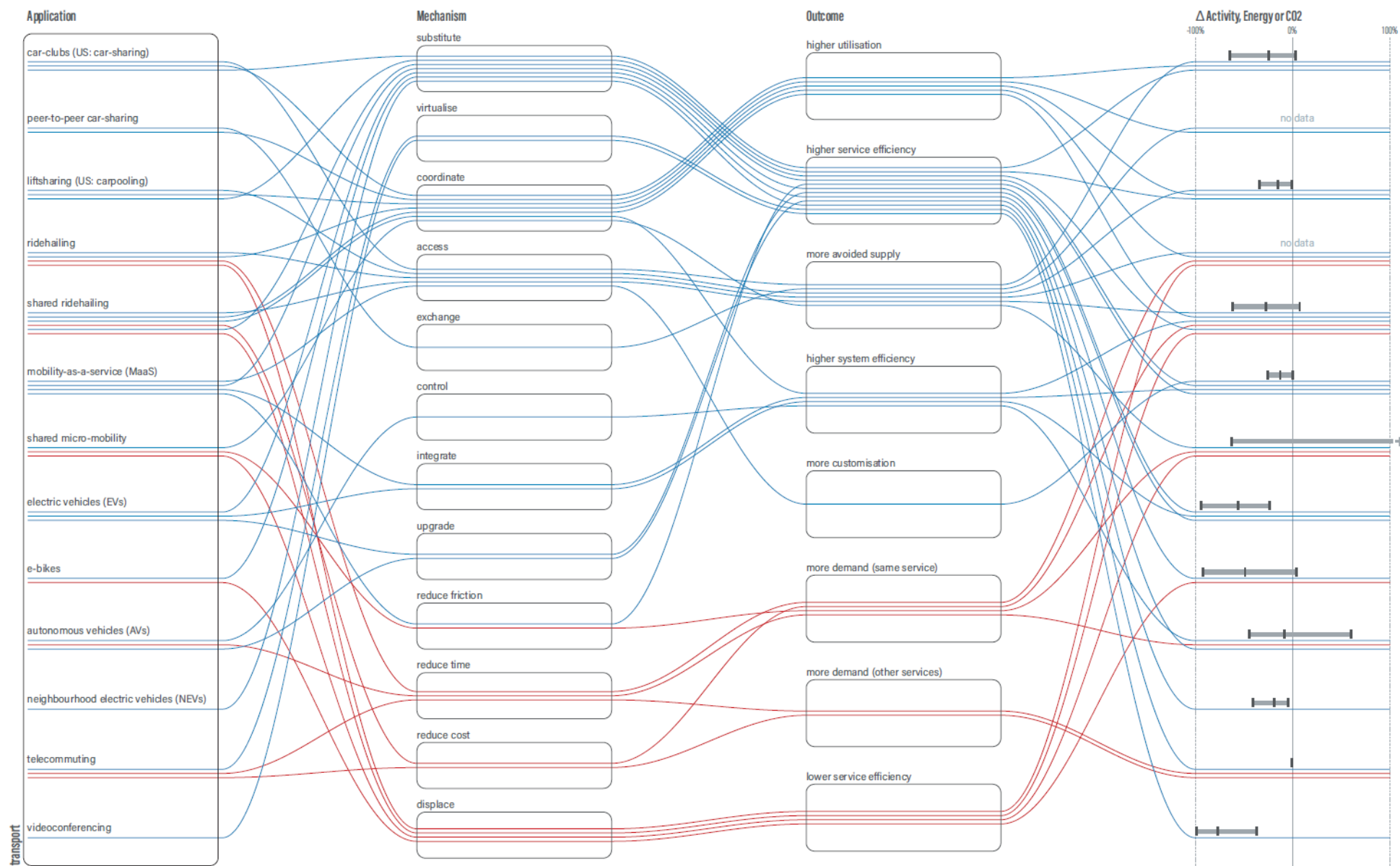
Digital
ICT *



Le «Digital ICT est
« juste » la dernière
forme des systèmes
d'information

- (1) Musée des Arts et Métiers-Cnam/photos S.Pelly/P. Faligo
- (2) Maurer, N. (1996). "The Telegraph and the Growth of the Firm in Nineteenth-Century America." Journal of Economic History, 56(2), 456-472.
- (3) Belloc, Alexis. La télégraphie historique depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. Ouvrage illustré de 76 gravures. Paris : Firmin-Didot, 1894.
- (4) Jacobsen, T., & Adams, R. M. (1958). Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture. Science, 128(3334), 1251-1258.
- (5) Creutzig, F., et al. (2022). Digitalization and the Anthropocene. Annual Review of Environment and Resources, 47, 479-509.

Vers une taxonomie des mécanismes et leur quantification empirique



Petitfor, H,
(2024),
Disentangling the carbon
emissions impact of
digital
consumer
innovations



4 problématiques de modélisation rencontrées dans le cadre de la thèse

Analytique

- Les typologies d'impacts de l'ICT actuelles sont descriptives : elles listent des effets sans détailler les mécanismes articulant les niveaux micro (comportements, pratiques, etc.) et macro (infrastructure, production, capital, etc.). Le manque de vocabulaire commun freine les comparaisons.

Disciplinaire

- La littérature macroéconomique porte principalement sur l'automatisation et la productivité (Acemoglu, 2024 ; Aghion, 2025).
- Les études énergie/économie (Hambye-Verbruggen, Heun, 2025) quantifient les impacts globaux sans causalités spécifiques à l'ICT.
- Les sciences environnementales de l'ICT (Hilty, 2015-2025) progressent sur les mécanismes mais la communauté reste émergente.

Vitesse

- La disruption numérique génère une asynchronie (Stiegler, 2016) entre la rapidité de diffusion des technologies et la vitesse d'adaptation des structures sociales, économiques, énergétiques, réglementaires et infrastructurelles.

Finalité d'usage vs. données statistiques

- L'impact du numérique varie selon la finalité de son déploiement (optimisation productive, inclusion sociale, consommation, etc.). Les données statistiques existantes (OCDE, Eurostat) ne classifient pas les déploiements numériques selon leurs finalités d'usage.

Pratiques de modélisation (1)

ETH Zurich

- Modélisation hybride : couplage SEED⁽¹⁾ (agent-based socio-technique) et TIMES-STEM (optimisation techno-éco du mix énergétique suisse à horizon 2050) avec itérations convergentes sur les décisions et la faisabilité système.
- Représentation par agents : modélisation de l'adoption des technologies et pratiques numériques par groupes sociaux hétérogènes, prise en compte des interactions et spillovers intersectoriels.
- Simulation explicite des effets rebond énergétiques numériques, compensés par l'intégration de dispositifs ICT (smart tech, IoT), et quantification sectorielle des impacts.
- Scénarios contrastés ("Digitalisation figée" vs "Accélérée") avec calibration sur taux d'adoption, budgets, digital skills et quantification des bénéfices énergétiques et économiques (jusqu'à 15% de réduction de consommation résidentielle, baisse des coûts de transition, alignement sur net-zero).

The role of digital social practices and technologies in the Swiss energy transition towards net-zero carbon dioxide emissions in 2050

L. Stermieri^a, T. Kober^a, R. McKenna^{d,e}, T.J. Schmidt^{b,c}, E. Panos^{a,*}

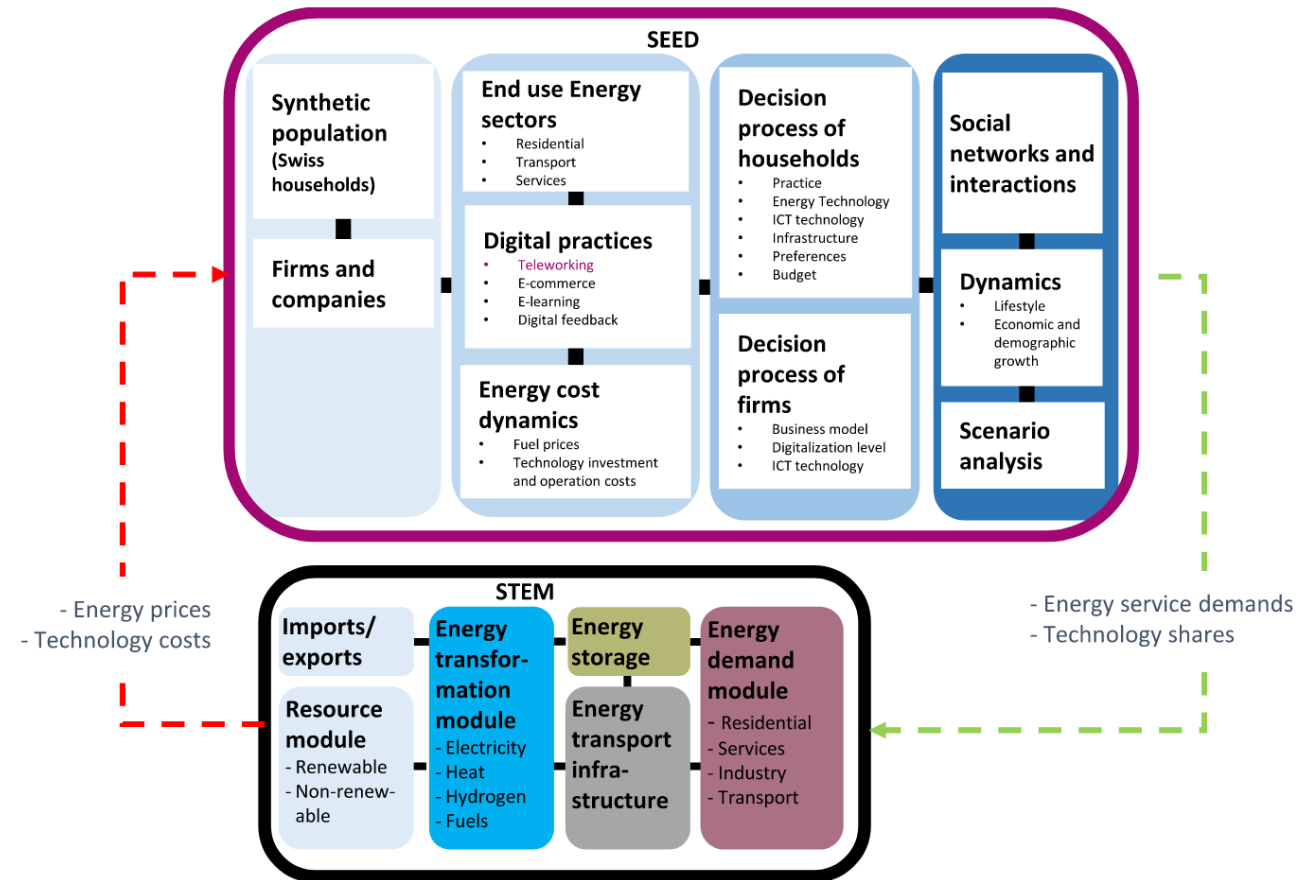
^a Paul Scherrer Institute, Laboratory for Energy Systems Analysis, Energy Economics Group, Forschungsstrasse 111, 5232, Villigen PSI, Switzerland

^b Paul Scherrer Institute, Research Division Energy & Environment, Forschungsstrasse 111, 5232, Villigen PSI, Switzerland

^c ETH Zurich, Institute for Molecular Physical Sciences, Dep. of Chemistry and Applied Biosciences, Vladimir-Prelog-Weg 1-5/10, 8093, Zurich, Switzerland

^d Paul Scherrer Institute, Laboratory for Energy Systems Analysis, Forschungsstrasse 111, 5232, Villigen PSI, Switzerland

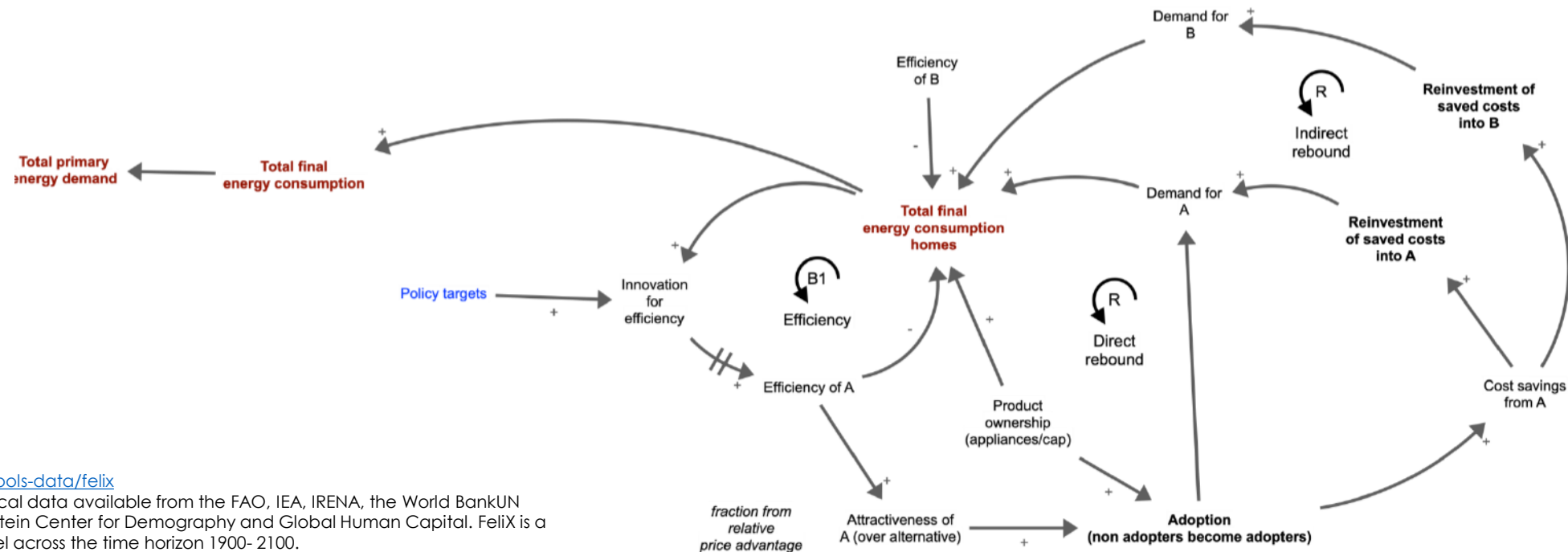
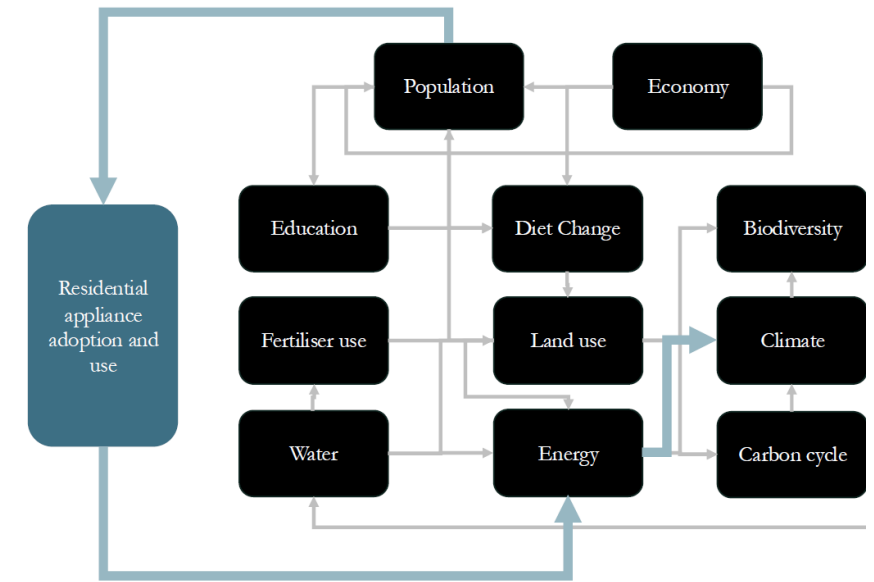
^e ETH Zurich, Chair of Energy System Analysis, Institute of Energy and Process Engineering, Dep. of Mechanical and Process Eng., Clausiusstrasse 33, 8092, Zurich, Switzerland



Pratiques de modélisation (2)

IIASA/Felix: Exploration des dynamiques de la numérisation

- Introduction d'indicateurs de numérisation dans Felix.
- Exploration des interactions entre boucles de rétroaction à différents niveaux du système et leur impact sur la numérisation.
- Intégration des recherches empiriques dans la modélisation quantitative des effets du numérique par la dynamique des systèmes.



(1) <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/felix>

The model is calibrated to historical data available from the FAO, IEA, IRENA, the World Bank UN Population Division and Wittgenstein Center for Demography and Global Human Capital. Felix is a time-continuous simulation model across the time horizon 1900- 2100.

Approche: Modèle heuristique

Premiers travaux de modélisation

Approche méthodologique

- Modèle « parcimonieux » / heuristique combinant dynamique des systèmes (aspects structurels) et multi-agents (aspects comportementaux), fondé sur les mécanismes causaux.

Structuration par finalités d'usage (non par infrastructure)

- Finalité environnementale (4S) : sobriété, substitution, etc.
- Finalité de socio-développement (4D) : inclusion, éducation, etc.
- Autres finalités (4C) : consommation, divertissement, etc.

Cœur du modèle

- L'évolution de la structure du capital ICT, déterminée par les orientations structurelles (investissements, institutions) et les pratiques socio-numériques (comportementales), impacte la demande énergétique, les émissions, l'emploi et le bien-être.

Objectif

- Observer comment l'allocation des investissements dans le capital ICT (obsolescent vs. frugal) et les dynamiques comportementales orientent les trajectoires énergétiques, climatiques et de bien-être.



Partie Macro (SD)

Utilisation d'un modèle de croissance simple.

- Fonction de production

$$Y_t = A_{ND}(t) K_t^{\alpha_1} L_t^{\alpha_2} E_t^{\alpha_3}, \quad \alpha_i > 0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \leq 1.$$

- Investissements fléchés par finalités

$$I_{x,j,t} = \sigma_t Y_t \pi_j(t) \chi_{x|j}(t), \quad \sum_j \pi_j(t) = 1, \quad \sum_x \chi_{x|j}(t) = 1.$$

- Capitaux: Numérique, numérisé, non-numérisé

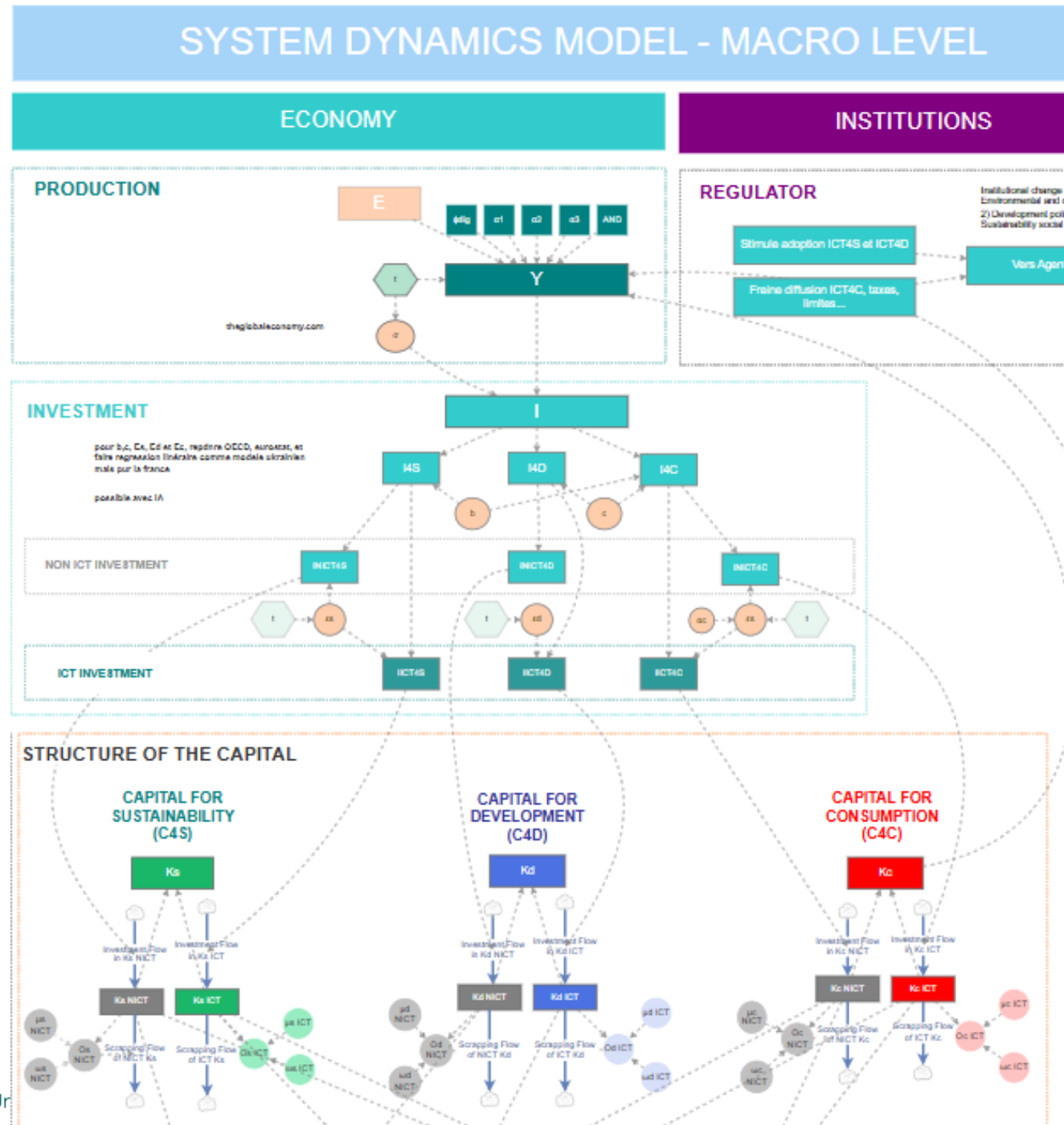
$$K_t = \sum_j (K_{ICT,j,t} + K_{NICT,j,t})$$

- Energie: Effets directs et indirects ICT, énergie hors ICT

$$E_{dir} = \alpha_{dir} \sum_j K_{ICT,j}^{\lambda_{j,ICT}} e^{\theta_{dir}^T M_t}, \quad E_{ind,num} = \alpha_T \sum_j K_{NICT,trans,j}^{\lambda_{j,T}} e^{\theta_T^T M_t}, \quad E_{ind,non} = \alpha_N \sum_j K_{NICT,non,j}^{\lambda_{j,N}} e^{\theta_N^T M_t}.$$

$\alpha_{dir}, \alpha_T, \alpha_N$	Énergie	Échelles de canaux	Param./calage > 0	S
$\Lambda = [\lambda_{j,x}]$	Énergie	Élasticités $K \rightarrow E$ (par j, x)	Matrice 3x3	S
$\theta_{dir}, \theta_T, \theta_N$	Énergie	Sensibilités mécanismes	Vecteurs dans $e^{\theta^T M_t}$	S
M_t	Méca.	Mécanismes agrégés	[SAVE, REB, PUSH, IND, SPILL, LOCK, HORD] ^T	

- Pollution, travail, bien-être



Partie micro (ABM)

ABM : structure des utilités et mécanismes émergents

Chaque agent h évolue selon deux fonctions d'utilité hiérarchisées, correspondant à deux temporalités de décision.

1. Utilité d'orientation (long terme). Cette utilité décrit la propension d'un agent à s'aligner sur un *vecteur dominant* $j^* \in \{\text{ICT4C, ICT4D, ICT4S, Out, Synergic}\}$. Elle agrège cinq dimensions : préférences intrinsèques, éligibilité (ressources et compétences), impulsions externes, apprentissage social et inertie comportementale.

$$U_{h,j,t}^{\text{ori}} = f(\text{pref}_{h,j,t}, \text{elig}_{h,j,t}, \text{skill}_{h,j,t}, \text{push}_{h,j,t}, \text{inertic}_{h,j,t-1}), \quad j_{h,t}^* = \arg \max_j U_{h,j,t}^{\text{ori}}.$$

Ce premier niveau détermine la *trajectoire identitaire* de l'agent (orientation consumériste, développementale, soutenable, ou hybride).

2. Utilité de pratiques (court terme). Conditionnée par le profil $j_{h,t}^*$, cette utilité pondère les déterminants du choix entre différentes pratiques $p \in \{C, D, S\}$ au sein de l'année. Elle intègre le coût, l'accès aux infrastructures, les préférences et l'influence sociale :

$$U_{h,p,t}^{\text{pra}} = A_{j^*}^{\text{pref}} \text{pref}_{h,p,t} - A_{j^*}^{\text{cost}} \text{cost}_{h,p,t} + A_{j^*}^{\text{infra}} \text{infra}_{h,p,t} + A_{j^*}^{\text{soc}} \text{soc}_{h,p,t}.$$

Le choix est modélisé par une répartition logit :

$$s_{h,p,t} = \frac{\exp(U_{h,p,t}^{\text{pra}}/\sigma)}{\sum_q \exp(U_{h,q,t}^{\text{pra}}/\sigma)}, \quad \pi_{j,t} = \frac{1}{H} \sum_h \sum_{p:j(p)=j} s_{h,p,t}.$$

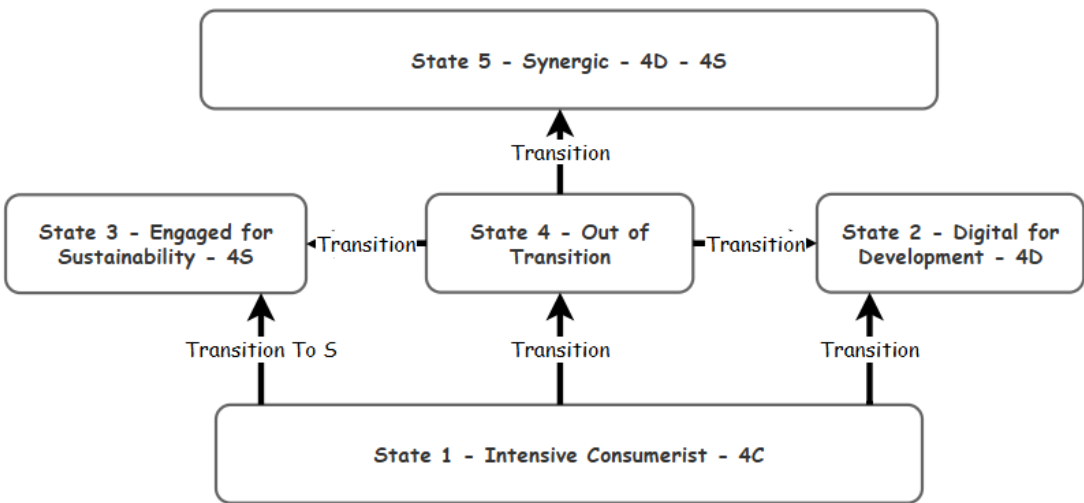
Cette étape traduit les arbitrages effectifs de consommation et d'usage numérique.

3. Génération ex post des mécanismes. Les mécanismes émergent de l'agrégation des comportements réalisés, sans intervenir dans les utilités elles-mêmes. Ils traduisent les effets comportementaux observables du système :

$$M_t = [\text{SAVE}, \text{REB}, \text{IND}, \text{LOCK}, \text{SPILL}, \text{HORD}, \text{PUSH}]^T, \quad M_t = \frac{1}{H} \sum_h M_{h,t}.$$

Chaque composante correspond respectivement à un effet d'efficacité, de rebond, d'induction, de verrouillage, de diffusion sociale, de rétention d'équipements ou de diffusion sobre.

En synthèse : L'utilité d'orientation détermine la posture structurelle de l'agent, l'utilité de pratiques régit ses choix opérationnels, et les mécanismes M_t condensent les rétroactions comportementales collectives produites par ces dynamiques.



10 Synthèse — mécanismes : description, capture ABM, capture SD

Mécanisme	Description	ABM : où c'est capté	SD : où ça agit
SAVE	Efficience/pratiques sobres	Générateur (indicateurs d'efficience) → SAVE _t	$\theta_{\text{dir}}, \theta_T, \theta_N \downarrow$; $m_{\text{out},j} \uparrow$; parfois $\omega_{x,j} \uparrow$
REB	Rebond post-efficience	Générateur (intensification usages 4C) → REB _t	$\theta_{\text{dir}}, \theta_N \uparrow$; indirect $\pi_{4C} \uparrow$
PUSH	Diffusion techno sobre	Générateur (politiques/réseaux) → PUSH _t	$m_{\text{in},j} \uparrow \Rightarrow \nu_{j,t} \uparrow$; $\theta_T \downarrow$
IND	Induction d'usages	Générateur (émergence segments) → IND _t	$m_{\text{in},j} \uparrow$; via $\chi_{x j} \Rightarrow I_{\text{ICT}}, I_{\text{trans}} \uparrow$; $\theta_{\text{dir}}, \theta_N$ parfois $\uparrow$
SPILL	Diffusion sociale	Dans $U_{h,p,t}$ via $S_{p,t}$	Réoriente π_j ; diffuse $m_{\text{in/out},j}$ via M_t
LOCK	Verrouillage	Dans $U_{h,p,t}$ (inertie)	$m_{\text{out},4C} \downarrow \Rightarrow \delta_{4C}^{\text{dec}} \downarrow$; $\omega_{.,4C} \downarrow$; $\pi_{4C} \uparrow$
HORD	Rétention ICT	Générateur (dormance/veille) → HORD _t	$\omega_{\text{ICT},j} \downarrow$; charge passive $E_{\text{dir}} \uparrow$