

INDE

Les scénarios de transition bas-carbone de l'Inde

L'Inde s'est engagée lors de la COP26 à atteindre la neutralité carbone nette à horizon 2070, mais cet objectif n'est pas encore adossé à un plan national de transition détaillé. À cette fin, des centres d'analyse et de recherche travaillent sous l'égide du NITI Aayog¹ à l'élaboration de scénarios qui inscrivent cet objectif d'atténuation dans la stratégie indienne pour devenir un pays économiquement développé et autonome sur le plan énergétique en 2047. La forte croissance attendue pour y parvenir induit un bouleversement de la structure économique qui rend impérieuse la nécessité de faire interagir le climat et l'économie dans la même modélisation.

La décarbonation du secteur énergétique est au coeur de ces travaux de modélisation. Dans la plupart des scénarios elle passe par une électrification massive et une sortie progressive du charbon au profit des énergies renouvelables, associées à des capacités de stockage. L'atteinte de la neutralité carbone en 2070 impose de multiplier par six les capacités de production électrique installées d'ici 2050. Ces travaux visent à opérationnaliser la transition bas-carbone, chiffrent les besoins en investissements, étudient les effets indirects sur l'emploi et les transformations sectorielles. Mais ils peinent à prendre en compte la transition du secteur agricole et les coûts croissants du changement climatique. Alors que les mesures d'atténuation attirent encore la majorité des financements internationaux, la construction de politiques d'adaptation à la hauteur des enjeux reste à réaliser.

I. La modélisation d'une transition bas-carbone de l'Inde est indissociable des grands objectifs macro-économiques

Lors de la COP26, l'Inde s'est engagée à un objectif Net-Zéro à horizon 2070². Des think tanks et des universitaires indiens et étrangers³ se sont emparés de la question sous l'égide du think tank gouvernemental NITI Aayog au sein du forum ICEMF⁴, chacun proposant leur modèle et scénarios. Pour autant, ces acteurs manquent de transparence passée leur première publication, ce qui diminue l'émulation entre les acteurs. Le sujet gagne en visibilité au niveau politique, la Ministre des Finances ayant annoncé lors de son discours de présentation du budget 2024-25, la publication d'ici la fin de l'année de scénarios de transition énergétique qui concilient les objectifs de croissance économique, d'emploi et de soutenabilité environnementale.

Les enjeux de Net Zéro sont systématiquement subordonnés à deux objectifs. Le premier est le narratif 'Viksit Bharat' - être une économie avancée en 2047⁵. Il induit un important bouleversement de l'économie (doublement de la part encore faible de l'industrie dans le PIB⁶) et du marché de l'emploi (baisse relative de l'agriculture) malgré des faiblesses structurelle persistentes (qualité des infrastructures, capital humain, sous-investissement). Le second, 'Atmanirbhar Bharat', est celui de l'indépendance énergétique à horizon 2047. Ensemble, ces trois objectifs questionnent les finances publiques du pays ; les recettes publiques proviennent aujourd'hui pour le cinquième des hydrocarbures⁷. **Plus encore que dans les économies avancées, les transformations profondes de l'Inde imposent de considérer dans des mêmes modèles économie et climat.**

II. Les trajectoires modélisées s'accompagnent d'une explosion de la demande énergétique, et en particulier électrique. Pour y faire face, un recours massif aux renouvelables intermittents est envisagé, avec des coûts indirects importants sur le réseau électrique

Les scénarios s'accordent sur une explosion de la demande énergétique, portée par la forte croissance projetée du PIB. Il s'agit en particulier de multiplier par six le parc électrique installé pour passer à environ

3 000 GW en 2050. Les investissements associés à une telle croissance sont considérables, entre 100 à 200 Mds USD/an.

Les modélisateurs s'accordent sur un parc électrique composé dans sa grande majorité de solaire onshore, et plus minoritairement d'éolien onshore. Les autres sources d'énergie dépendent d'hypothèses incertaines : une persistance significative de **charbon** en cas de combinaison d'une baisse des coûts des technologies de capture et stockage de carbone (CCS) et d'absence de réglementation pour réduire le recours aux centrales à charbon, une part négligeable de **nucléaire** sauf à considérer comme l'IIMA des rendements d'échelle, auquel cas sa participation atteint 10 à 35% des capacités installées contre 2% autrement. Quoiqu'il en soit, la forte intermittence du mix électrique résultant impose d'importantes capacités de stockage, en particulier par **batteries** (1 500 GW en 2050⁸), **ainsi que des coûts indirects sur le réseau électrique que les modèles utilisés peinent à prendre en compte correctement.** Ces scénarios de production sont souvent des réponses à des demandes exogènes, aussi l'effet du prix final de l'électricité sur la demande électrique n'est pas toujours étudié sérieusement. Une baisse de la part du charbon, source d'énergie pilotable, mènerait par substitution à une hausse du nucléaire selon l'IRADe (cf. annexe).

Le rapport de l'IIMA soutenu par le gouvernement scénarise un Net Zero avec des gains d'efficacité énergétique très importants, des innovations et transferts de technologies, et des changements de comportement des consommateurs qui évitent opportunément des politiques volontaristes.

III. La transition bas-carbone, au-delà de la porte d'entrée énergétique

Une transition bas-carbone est particulièrement nécessaire en Inde. Les mesures **d'atténuation** d'émissions de gaz à effet de serre attirent la majorité des capitaux⁹ mais restent insuffisantes : sous les politiques actuelles, les émissions du pays doubleraient pour atteindre 7,2 GteqCO₂ en 2050¹⁰. Les mesures **d'adaptation** sont cruciales car l'Inde est le 7^e pays le plus vulnérable face au changement climatique¹¹. Le NGFS anticipait un PIB réduit de 9,9% sous les politiques actuelles en 2050, un coût réévalué à la forte hausse depuis¹². Pourtant, ce coût n'est pas pris en compte dans les modèles indiens ; les modélisateurs affirment que leurs trajectoires exogènes de croissance les incluent. Néanmoins, cette hypothèse sous-jacente est peu crédible au vu des hypothèses de croissance très allantes utilisées par rapport à celles de l'OCDE.

Dans ce contexte, les modélisations de transition finissent toutes à être utilisées pour chiffrer - et à terme, légitimer - les besoins d'investissements¹³, notamment internationaux. Le gap de financement est particulièrement marqué pour l'adaptation au changement climatique. La banque centrale indienne (RBI) estime que les financements internationaux destinés à l'adaptation au changement climatique en Inde sont cinq à dix fois inférieurs aux besoins, tandis que l'IIMA évalue l'écart à 94 Mds annuels jusqu'en 2040. Ce manque d'investissement est dû à la nature très locale des projets d'adaptation, du modèle associé de réduction des coûts futurs, de l'absence de réglementation d'ampleur, de promotion de modèles assurantiels ou encore à aux faibles marges de manœuvre budgétaires des Etats fédérés¹⁴ en première ligne pour financer ces projets.

Les travaux des modélisateurs s'opérationnalisent et tendent à couvrir un spectre large de politiques et secteurs. D'une part, des think tanks proposent un nombre croissant de rapports dédiés à des secteurs clés difficiles à décarboner (agriculture qui émet le cinquième des émissions en gaz à effet de serre¹⁵, industrie, transports), ou aux vecteurs d'énergie associés (hydrogène vert, biocarburants, production électrique, etc.). D'autre part, certains acteurs proposent des évaluations de coûts d'abattement¹⁶ d'un grand nombre de politiques. Ces deux approches gagneraient à être utilisées conjointement. Certaines mesures sont prioritaires au sens de coûts d'abattements négatifs : taxe carbone sur l'industrie¹⁷ - condition sine qua non d'un Net Zero y compris pour la RBI - dont les effets redistributifs et incitatifs seraient positifs sur le PIB, intermodalités dans les transports, électrification et déploiement ciblé de l'hydrogène, reforestation. D'autres sont plus débattues (biocarburants, CCS). Enfin, les think tanks tendent à couvrir un spectre plus large d'acteurs en collaborant avec des Etats fédérés sur des plans de transition.

* * *

ANNEXE 1 : Liste non exhaustive de scénarios de transition

Plusieurs types de modélisations peuvent être utilisés pour analyser des scénarios de transition en Inde. Les **IAMs** (*Integrated Assessment Model*) sont des modèles qui associent à un bloc économique minimaliste une modélisation du système énergétique, pour estimer l'évolution des émissions de GES suivant les différentes trajectoires - parfois exogènes - de croissance retenues. Ces modèles sont commodes pour évaluer l'impact macroéconomique de mesures comme la taxe carbone, qui vient choquer les fonctions de production, et leur frugalité relative les rend pertinents pour des analyses à très long terme. Ces IAMs intègrent des **modèles énergétiques** parfois très complexes, que certains modélisateurs utilisent de manière indépendante, en utilisant des trajectoires purement exogènes en entrée. D'autres acteurs, davantage intéressés par les questions politiques extra-énergétiques (investissements, emplois, réglementations fines, etc.) peuvent utiliser des **modèles comptables**. Il s'agit désormais d'utiliser des trajectoires macroéconomiques exogènes, et d'utiliser les tables de comptabilité nationale pour simuler les effets d'un large éventail de chocs (fiscaux, réglementaires, offre/demande, etc.) sur la structure économique fine du pays. Il peut alors être possible de reconstruire des variables comme l'emploi ou les émissions de GES, à partir d'un niveau désagrégé. Les **modèles entrée-sortie** leur sont proches, mais sortent de cette perspective top-down (puis bottom-up), en considérant les chaînes de valeur et les interactions qu'elle induisent dans la désagrégation sectorielle, d'où une plus grande pertinence économique. Tous ces modèles sont le fruit de compromis, et souvent la conséquence des données disponibles.

Organisme	Scénario	Description économique	Particularités et usages	Lien
IRADE	BAU-NDC (Business as Usual, avec la réussite des NDC)	Modélisation énergétique, avec l'utilisation de MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives in their General Environmental Impacts), un modèle développé par l'AIE. Les trajectoires macroéconomiques sont exogènes, et seraient les productions d'un modèle interne. Seul le secteur énergétique, et ses émissions, est ici considéré.	Utilise des trajectoires consensuelles et sa modélisation fine de l'intermittence permet d'inclure le stockage électrique parmi les capacités électriques installées	IRADe, 2022, Assessing potential carbon neutrality target years for India's power sector
	NZ60 (Net Zero pour 2060)			
CEEW	REF (Scénario de référence)	Utilise un IAM (le très réputé GCAM : Global Change Assessment Model) adapté à l'Inde, avec des trajectoires macroéconomiques exogènes, qu'il choque à la marge. Le GCAM est très complet, même si son module électrique est relativement simple. Il n'est donc pas pertinent pour modéliser le mix électrique. Les émissions de GES considérées incluent certes l'énergie et les carburants, mais aussi des LULCC (Land-Use and Land-Cover Change), ou certains processus industriels (ciment) et vont au-delà du simple CO ₂ .	La modélisation énergétique est relativement sommaire, et le stockage sera modélisé comme un coût supplémentaire pour les renouvelables. La force du modèle est les trajectoires sectorielles de demandes suite à l'action de réglementations	CEEW, 2021, Implications of a Net-Zero Target for India's Sectoral Energy Transitions and Climate Policy ; Supplementary material
	NZ70-40-CCSN-H2L (Net Zéro pour 2070, scénario qui ne bénéficie pas d'hypothèses particulièrement optimiste pour la capture du carbone, ni pour l'hydrogène vert)			
WRI	BAU (Business as Usual)	Utilise l'Energy Policy Simulator, un modèle énergétique basé sur la comptabilité nationale indienne, qui utilise comme trajectoires macroéconomiques exogènes celles du scénario 'High Growth' produit par le NITI Aayog avec l'outil IESS (version utilisée lors de la conception du rapport : lien). Ce modèle est maintenant doté d'un bloc entrée/sortie. Le spectre des émissions de GES considérées est large (Land Use, énergie, carburants, processus industriels non énergétiques, etc.)	Le modèle est le plus fin dans sa prise en compte de la comptabilité nationale indienne. Il permet d'obtenir les conséquences y compris indirectes de politiques très spécifiques en terme sectoriels et surtout d'emploi, avec les tables ICIO de l'OCDE. Cependant, il utilise des trajectoires macroéconomiques particulièrement favorables qui peuvent sous-estimer les bouleversements sectoriels de l'économie.	WRI, 2021, Pathways for Decarbonizing India's Energy Future : Scenario Analysis Using the India Energy Policy Simulator ; WRI, 2021, A tool for Designing Policy Packages to Achieve India's Climate Targets : Methods, Data, and Reference Scenario of the India Energy Policy Simulator ;
	LTD (Long-Term Development, qui simule l'application des mesures les plus efficaces pour baisser les émissions de GES)			

IIMA	NDCM (Respect des NDC sous une hypothèse médiane de croissance)	Modélisation qui adosse un IAM (Asia-Pacific Intergrated Model/Enduse-India) à un modèle énergétique fin (le TIMES-India, une adaptation d'un modèle de l'AIE, et qui simule le passage des énergies primaires aux utilisations finales) et utilise des trajectoires macroéconomiques exogènes qui sont celles nécessaires pour atteindre l'objectif d'IDH de 0,8 en 2047, suivant une analyse économétrique sur les données historiques mondiales. Comme l'IRADE, l'IIMA développe ici une étude de la transition du secteur énergétique, dont seules les émissions associées sont l'objet du travail	Le modèle simule très bien le mix énergétique. Par rapport à l'AIE ou l'IRADE, il a la particularité de modéliser des rendements d'échelle pour le nucléaire, et de simuler une électrification endogène qui induit une faible croissance de la demande électrique.	IIMA, 2024, Synchronizing energy transitions toward possible Net Zero for India : Affordable and clean energy for all
	NZ1 (Net Zéro en 2070, avec des hypothèses optimistes sur le coût du nucléaire, qui simule une action massive de l'Inde vers cette technologie)			
AIE	NZ4 (Net Zéro en 2070, sans hypothèses particulières)	Modélisation énergétique qui utilise des trajectoires qui sont des déviations des tendances historiques, en jouant sur les moteurs de la croissance. Comme pour l'IRADE, seul le mix énergétique et ses émissions sont ici considérés	La référence en matière d'énergie. Notons les hypothèses peu favorables sur la structure des coûts du nucléaire.	AIE, 2021, India Energy Outlook
	STEPS (Stated Policies Scenario)			
	SDS (Sustainable Development Scenario, un Net Zéro pour 2050)			

Notes : Ce tableau n'est pas exhaustif. Des acteurs comme le Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL), The Energy and Ressources Institute (TERI) (qui utilise les trajectoires de l'OCDE), le Center for Study of Science, Technology and Policy (CSTEP), etc. ou des universitaires ont aussi produit des analyses.

ANNEXE 2 : Les capacités de production électrique installées en Inde

Modélisateur	IRADe		AIE		CEEW		IIMA (fait figure d'exception)		
Modèle	BAU	NZ-60	STEPS	SDS	REF	NZ70-lowCCS-lowH2	NDCM	NZ1	NZ4
Capacité électrique installée en 2050 en GW (hors capacités de stockage)	2 300	3 300	1 552 (en 2040)	1 835 (en 2040)	1 649	3 429	1 004	917	1 166
Croissance annuelle lissée des capacités installées	6,4%	7,8%	7,8%	8,9%	5,1%	8,0%	3,2%	2,8%	3,8%

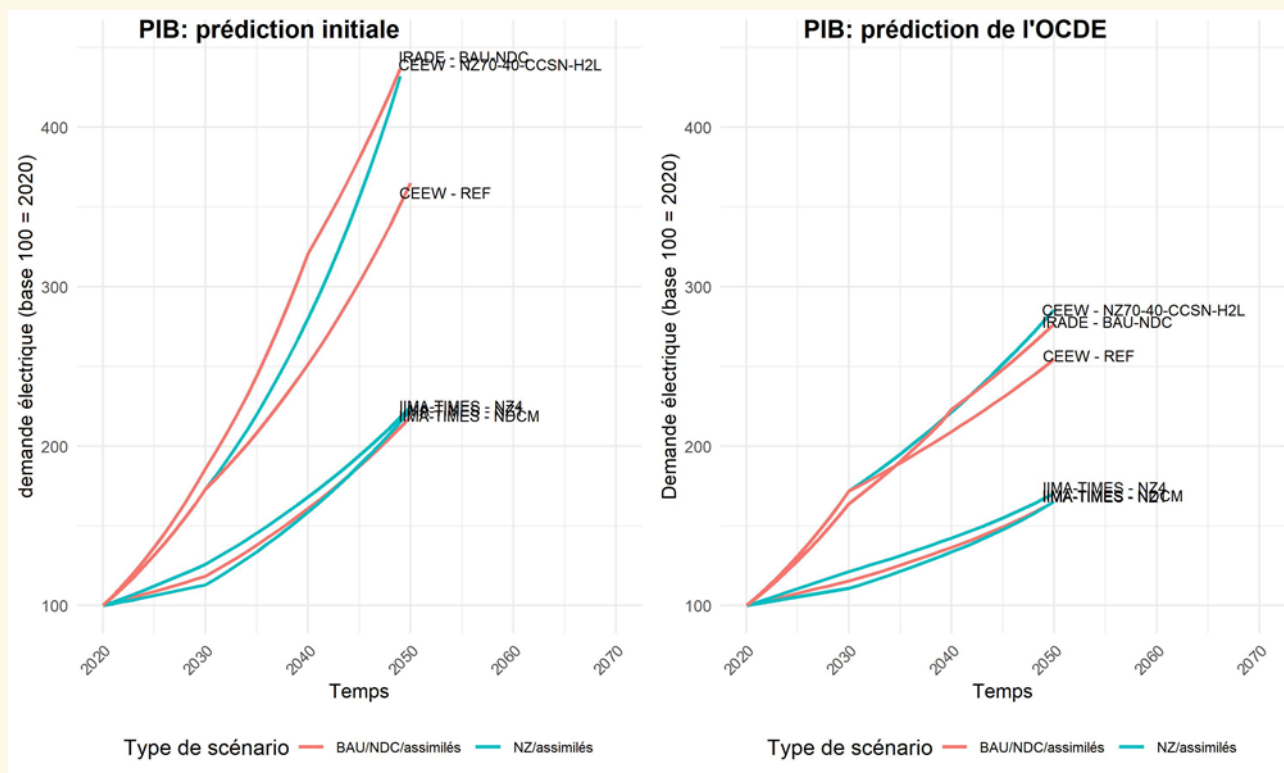
Note : Description des modèles et scénarios en Annexe 1

ANNEXE 3 : Les capacités de production électrique installées en Inde

Modélisateur	IRADe		AIE		IIMA		
Scénario	BAU	NZ-60	STEPS	SDS	NDC	NZ1	NZ4
Plage temporelle	2031-60		2022-30		2020-70		
Investissement annuels (Mds USD)	106	153	160	200	108	149	230

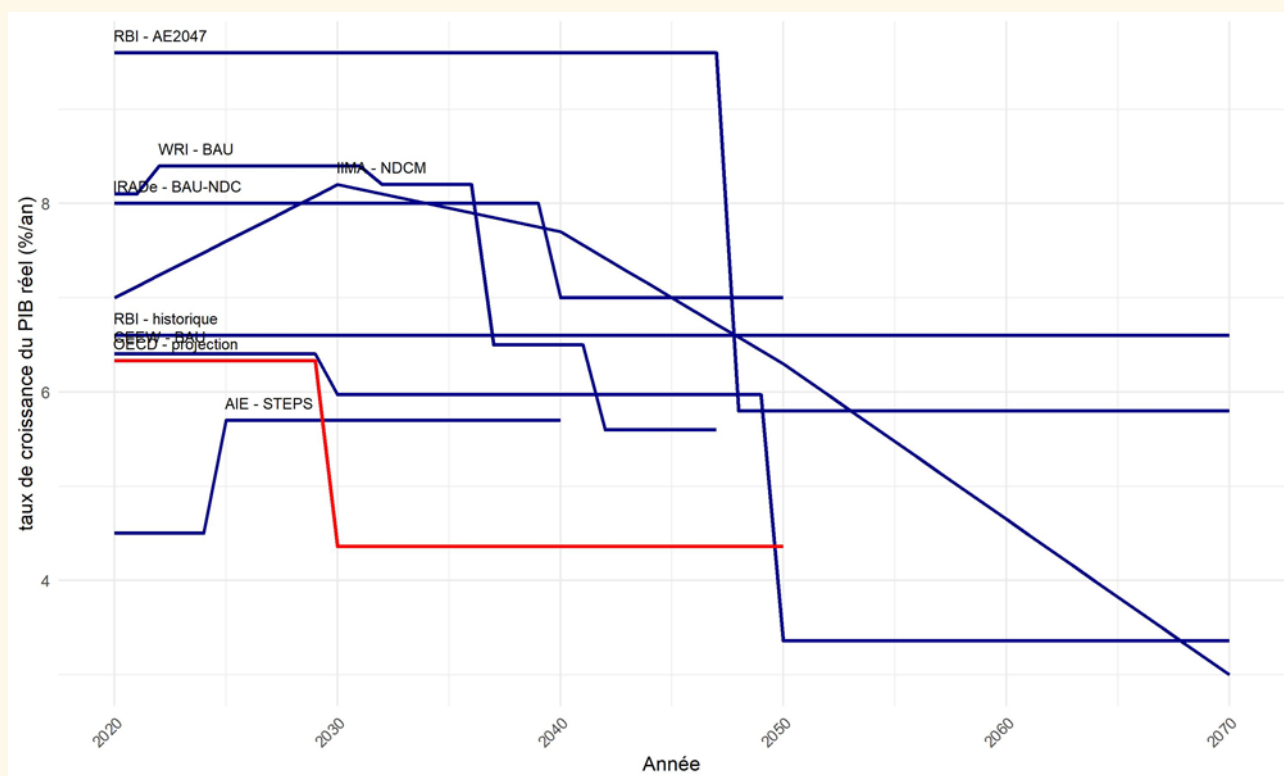
Note : Description des modèles et scénarios en Annexe 1

ANNEXE 4 : Les hypothèses de trajectoire de PIB expliquent une grande partie des écarts de demandes en électricité. Elles réduisent de moitié l'écart entre les demandes de la plupart des scénarios (CEEW, etc.) de celles de l'IIMA



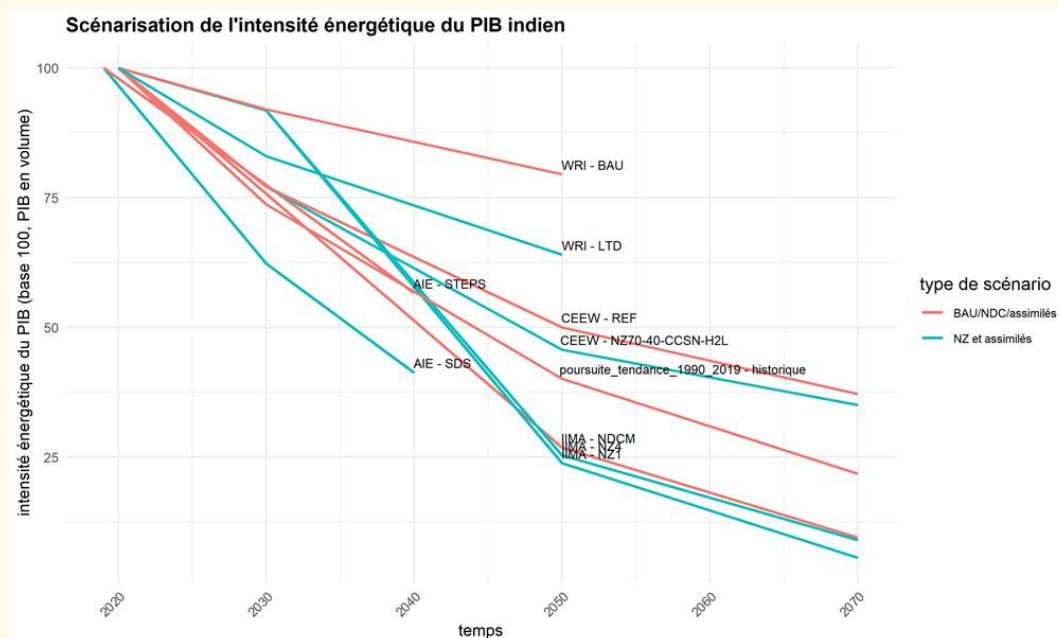
Note : les demandes électriques sont corrigées dans le graphique de droite de la différence entre les trajectoires du PIB choisies par les scénarios et celle de l'OCDE. Cette correction se fait en utilisant une élasticité demande électrique/PIB, estimée pour chaque modèle selon les taux croissances de la demande électrique et du PIB, reconstruits pour chaque scénario. L'utilisation de la base 100 permet de comparer les trajectoires, puisque certains scénarios explicitent la demande électrique, d'autres de la production électrique, et que ces grandeurs ne coïncident pas. La base 100 permet une comparaison étant donné que les moteurs de différence entre ces grandeurs - pertes de réseau, principalement - évoluent peu dans les hypothèses des scénarios. Malgré tout, ils évoluent, et ces élasticités sont calculées sur des pas de temps différents, ce qui limite l'exactitude des résultats. Enfin, le calcul de cette élasticité est contraint par les données disponibles, et est en l'état sujet à un biais d'endogénéité clair.

ANNEXE 5 : Les hypothèses de croissance des scénarios de transition à l'épreuve de la réalité des ambitions 'd'économie avancée' en 2047



Note : Les taux de croissance annuel du PIB utilisés sont reconstruits au besoin sur les plus petits pas de temps possible. La courbe rouge est la trajectoire de l'OCDE, clairement moins optimiste que les autres scénarios. L'IIMA utilise la même trajectoire de croissance pour tous ses scénarios NZ, qui est celle de son scénario 'NDCM'.

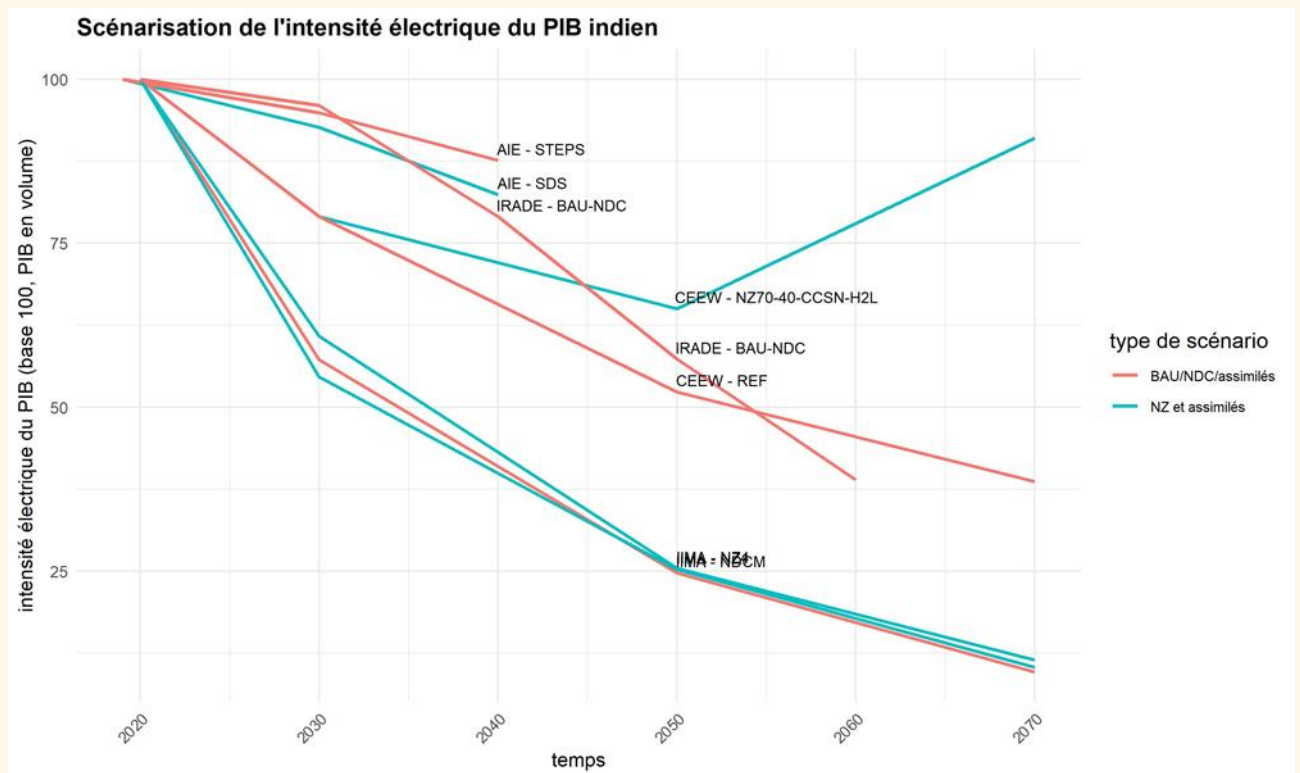
ANNEXE 6 : Les scénarios ne retiennent pas tous les mêmes gains d'intensité énergétique du PIB



Note : L'utilisation de la base 100 permet de faciliter la comparaison entre des scénarios qui n'explicitent pas tous les mêmes données (énergie finale, énergie primaire, demande énergétique), car ce sont les tendances qui importent. Reste que les gains dans les pertes du réseaux -qui sont modélisées- faussent un petit peu l'exactitude de ce graphique. Les tendances générales restent cependant instructives. On observe que l'IIMA considère la poursuite à minima des gains d'efficacité énergétique du PIB. Pourtant, le CEEW et le WRI sont moins optimistes. De fait, ils considèrent les hétérogénéités d'efficacité énergétiques des actifs, et le biais de sélection qui consisterait à supposer la poursuite uniforme des gains passés.

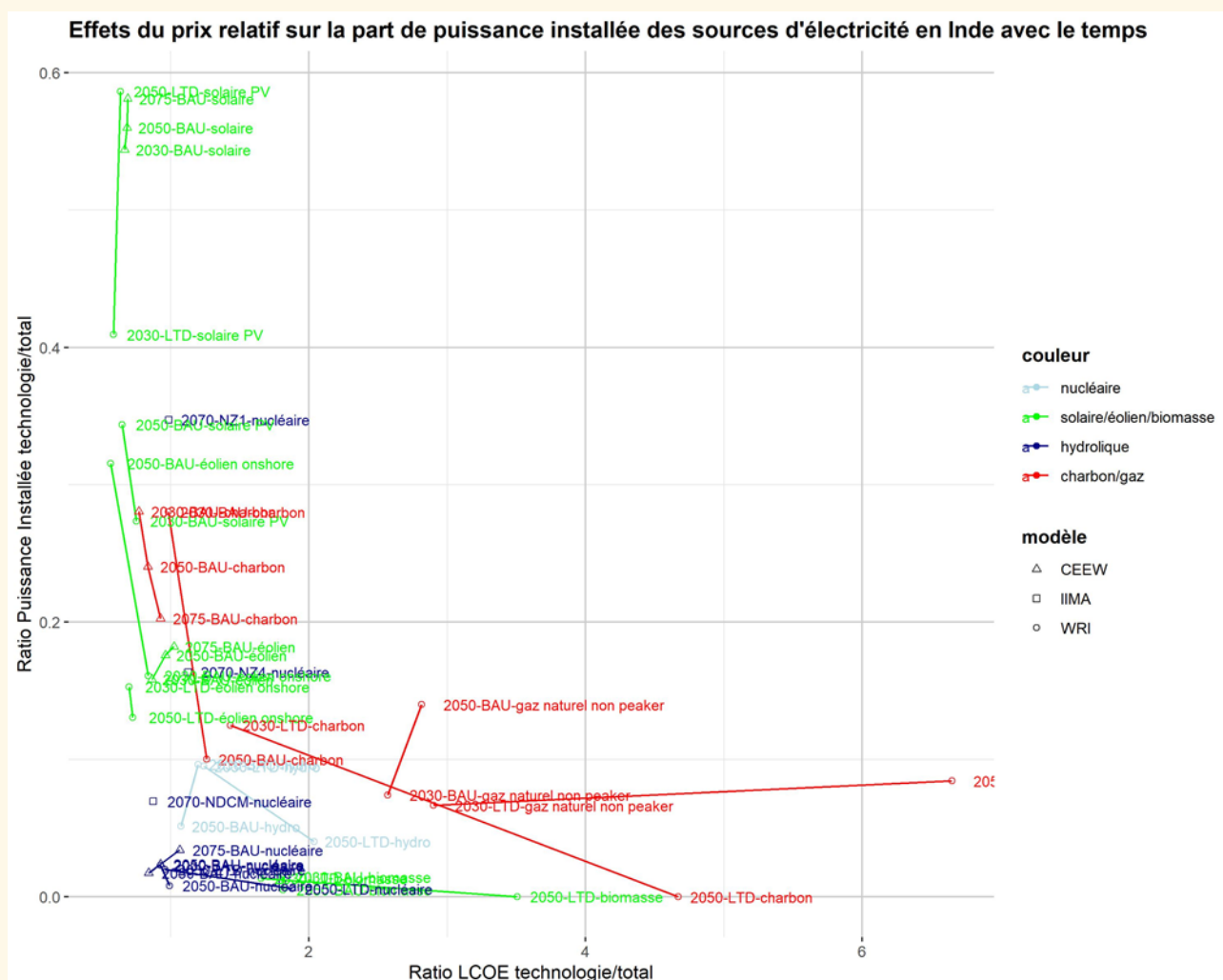
ANNEXE 7 : La visualisation de l'intensité électrique du PIB trahit les hypothèses des modélisateurs : supposer la poursuite des gains historique d'efficacité faits sur les actifs les plus rentables, ou bien considérer les gains de productivité plus faibles pour

certains actifs, qui imposent pour leur électrification l'action réglementaire de l'Etat à partir de 2047



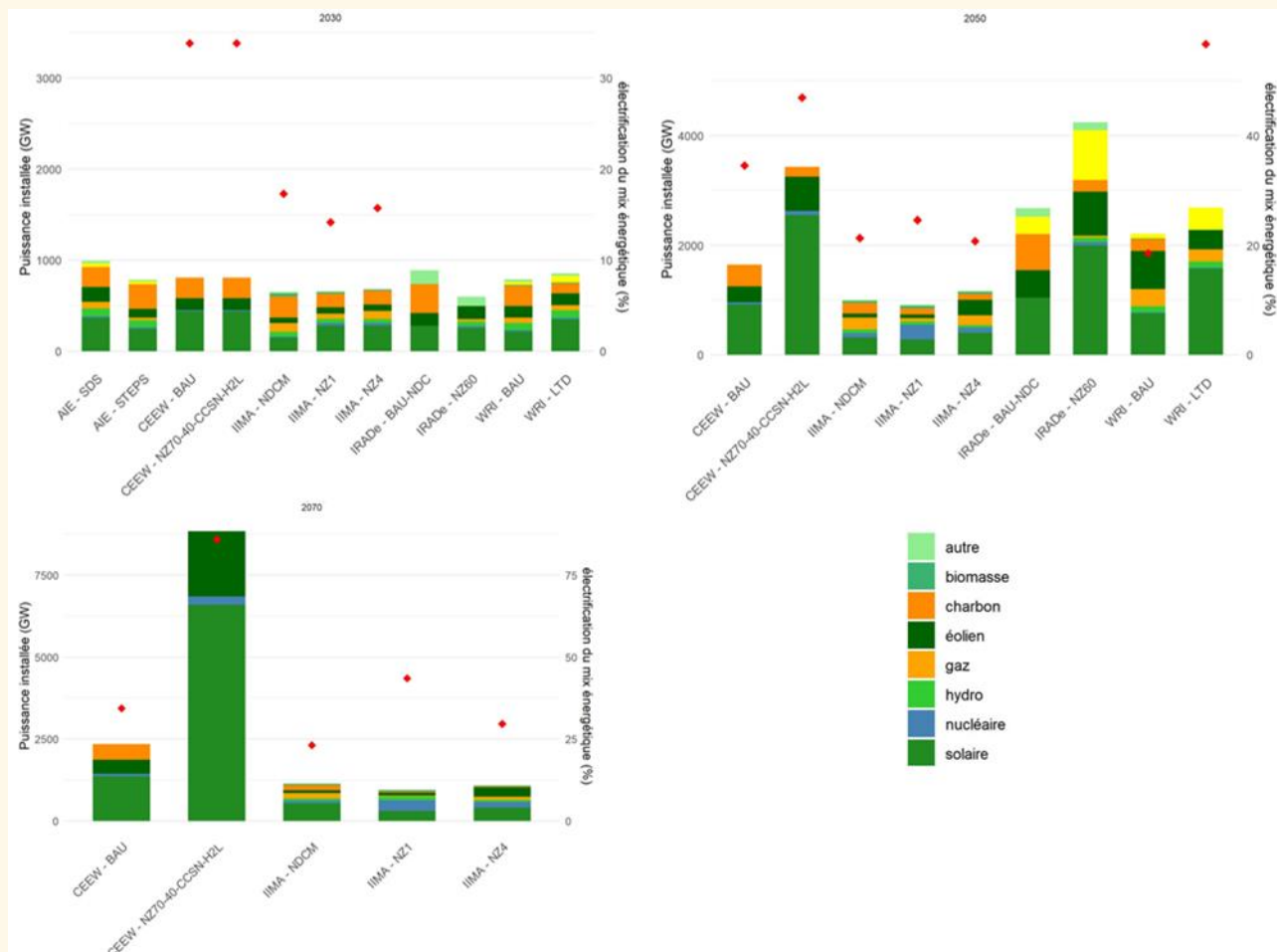
Note : L'IIMA suppose la poursuite des gains historiques, ce qui lui permet d'endogénéiser l'électrification des actifs. Le CEEW considère l'hétérogénéité de productivité entre les actifs électrifiables. Ainsi, l'électrification endogène conduit à des intensités électriques décroissantes : l'importance de l'électricité augmente dans le PIB. En 2050, l'échéance exogène de croissance permet aux modélisateurs de scénariser l'action du gouvernement dans le NZ, qui impose l'électrification massive des actifs qui ne l'ont pas encore été (transports, etc.), d'où l'inversion de la tendance de l'intensité, qui traduit un coût pour le PIB de cette électrification. Alors, l'électrification croît très vite, plus que le PIB. De fait, les capitaux sont utilisés pour acheter des actifs (camions électriques, etc.) fonctionnant à l'électricité mais donc le supplément de prix ne correspond pas à une différence de productivité.

ANNEXE 8 : Seule une transgression d'une règle d'optimisation des coûts permet de respecter l'objectif de 15% de gaz dans le mix électrique en 2030, et le nucléaire est pénalisé par des variables limitantes techniques



Note : Chaque courbe correspond à l'évolution d'une technologie pour un scénario en fonction du temps. Une évolution Nord-Ouest/Sud-Est correspond à un respect d'une règle d'optimisation suivant le prix : la part relative dans les capacités installées et le prix relatif sont sensés étre négativement corrélés. Seules les courbes du gaz naturel (en rouge) des scénarios BAU et LTD du WRI suivent une évolution Sud-Ouest/Nord-Est, en l'occurrence une hausse du prix relatif qui s'accompagne pourtant d'une hausse dans la part du mix relatif. A noter qu'il aurait été plus exacte de considérer l'énergie produite et non les capacités installées, mais ce graphique est contraint par les données disponibles. De même, le LCOE n'est pas la métrique d'optimisation du mix considérée par tous les scénarios. Enfin, il convient de noter que les points du nucléaire sont 'décalés vers la droite' par rapport aux tendances données par les autres sources d'électricité. Cela traduit un effet fixe, de modèles qui pénalisent le nucléaire sur la base d'autres arguments que celui du prix (limitation empirique des capacités au nom d'une cohérence avec l'historique du déploiement).

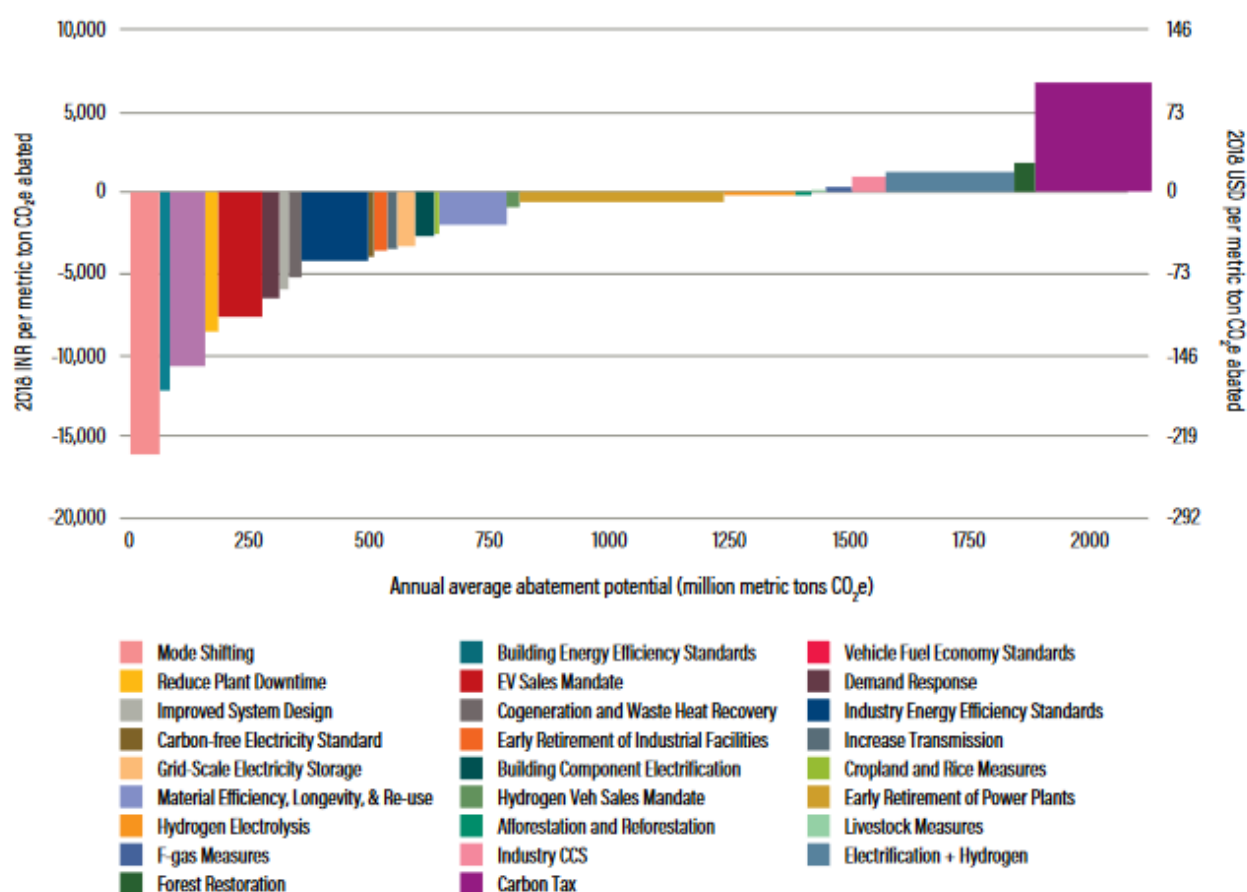
ANNEXE 9 : Les scénarios annoncent des capacités installées en forte hausse, presque exclusivement composées de PV et d'éolien onshore



Note : Les losanges indiquent la proportion de l'électricité dans la consommation d'énergie finale (axe de droite), reconstruite avec les données disponibles. Seul l'IIMA se démarque avec une faible électrification, plafonnant à 40% en 2070, qui induit une faible demande électrique. Seul son mix contient une proportion non négligeable de nucléaire. On observe la forte électrification du mix énergétique dans les NZ du CEEW, autour de 80% en 2070. Le stockage (batteries) n'est indiqué que lorsque les scénarios le modélisent comme une capacité de production électrique et non comme un coût supplémentaire pour les intermittents. Dans tous les scénarios, le charbon et le gaz restant en 2070 sont principalement associés à de la capture de carbone.

ANNEXE 10 : Estimation des coûts d'abattement de différentes technologies

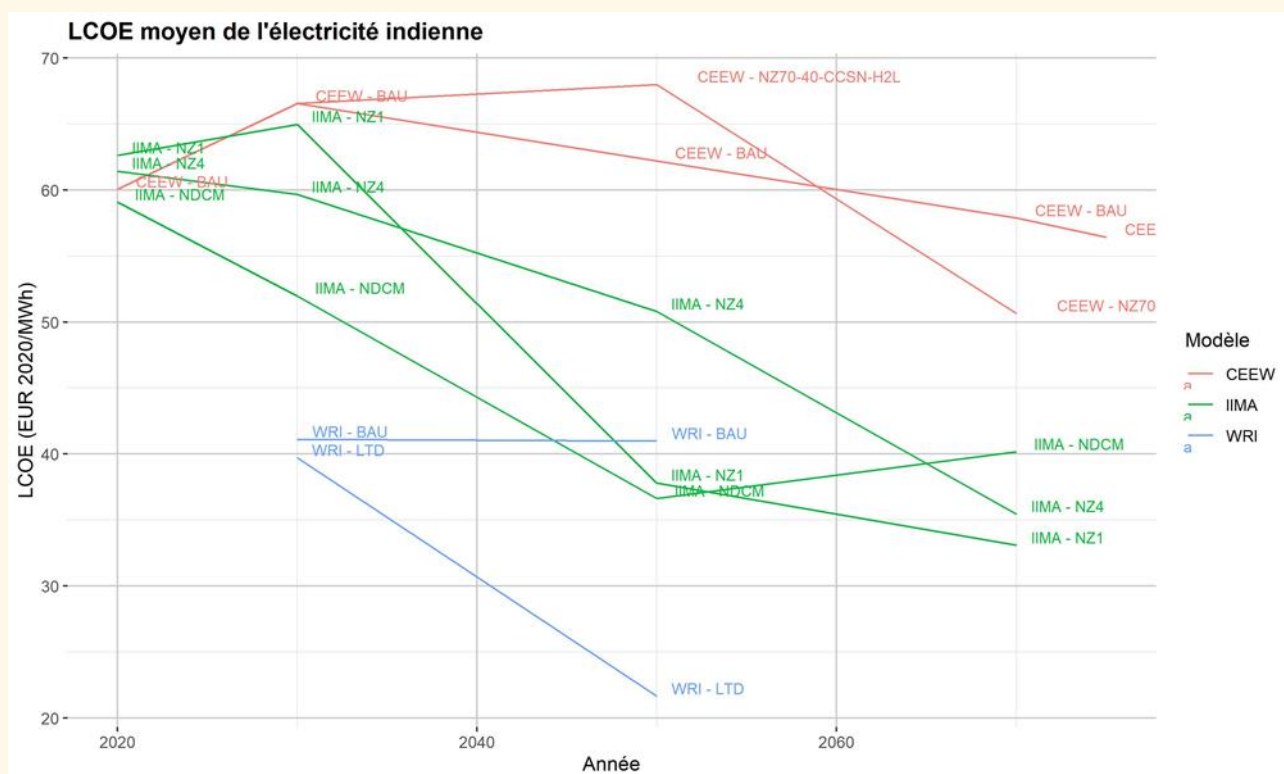
Figure 14 | CO₂e Abatement Cost Curve for Policies in the LTD Scenario (Net Present Value through 2050)



Source: Authors, using FPS India Model.

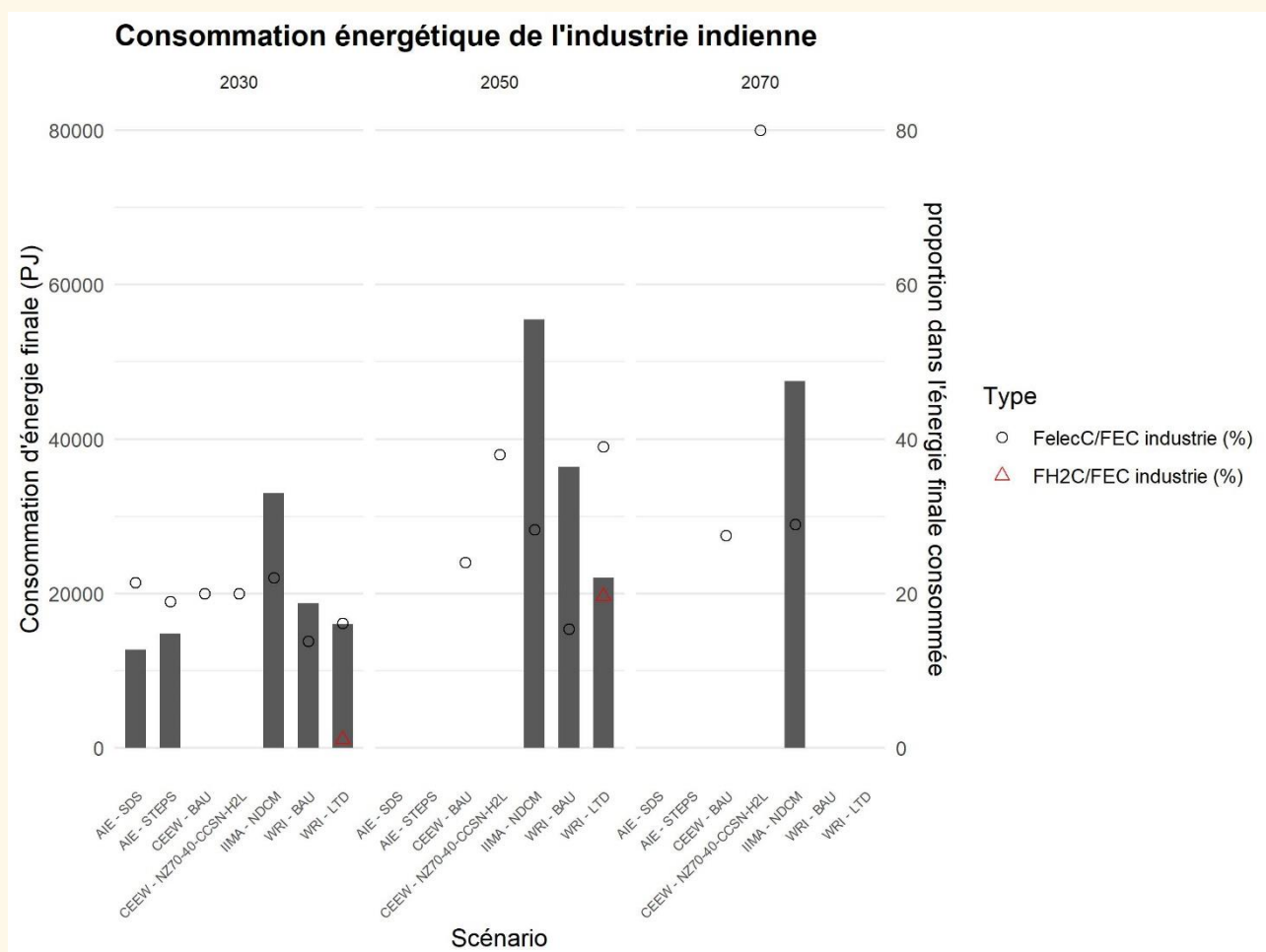
Note : Graphiques issus du rapport du WRI de son working paper « PATHWAYS FOR DECARBONIZING INDIA'S ENERGY FUTURE: SCENARIO ANALYSIS USING THE INDIA ENERGY POLICY SIMULATOR », publié en 2021, DOI : <https://doi.org/10.46830/wriwp.21.00096>. Le coût d'abatement est le quotient des investissements et des coûts d'opération par la quantité d'émissions de GES évités.

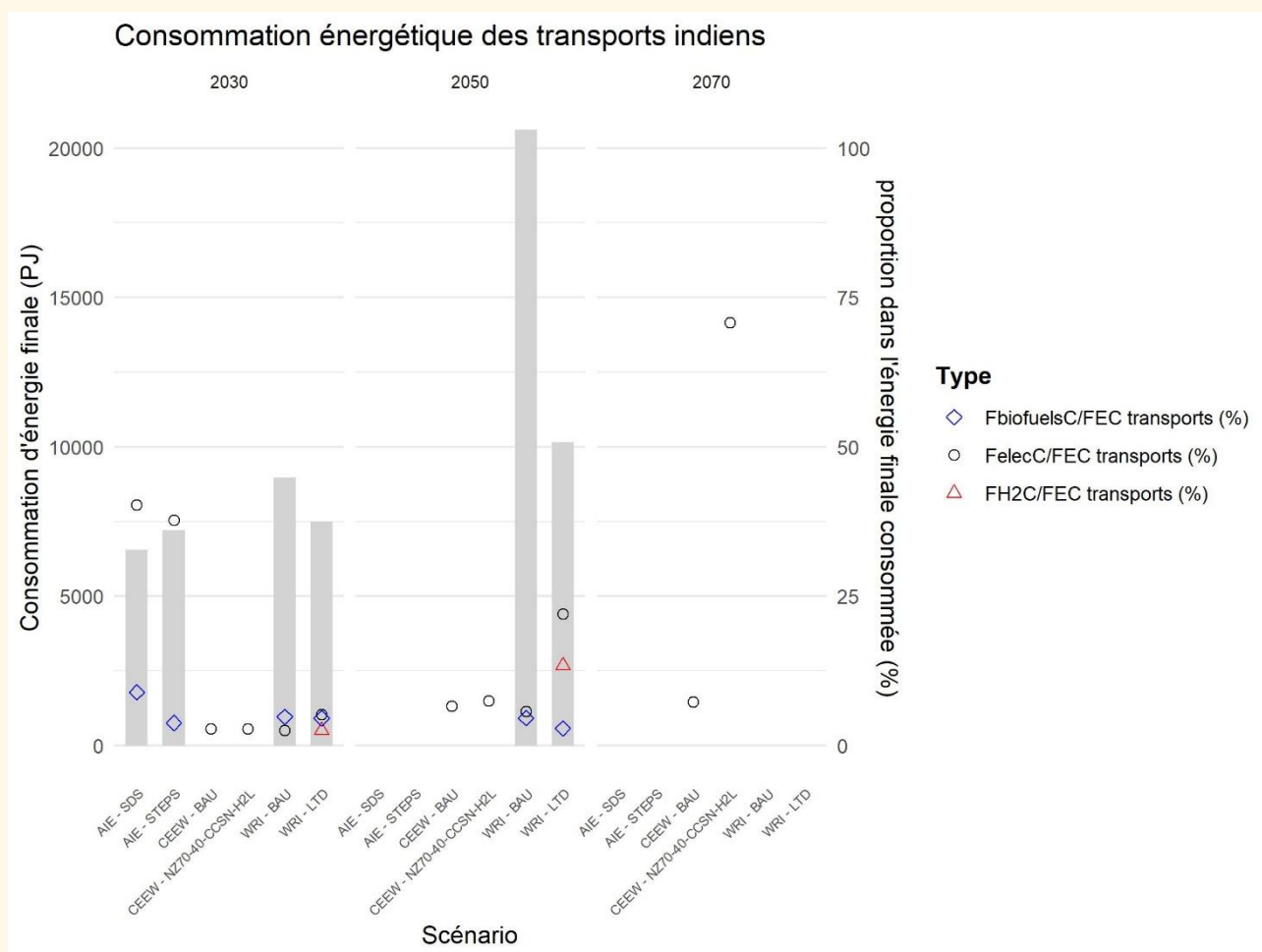
ANNEXE 11 : Evolution du coût final moyen de l'électricité selon les scénarios, qui illustre l'incompatibilité de l'optimisation relative du mix à court terme (charbon + CCS) ou à long terme (nucléaire ou renouvelables intermittentes)



Note : Le LCOE moyen n'est pas nécessairement le prix payé par le consommateur final. Le contribuable paie la différence, qui inclut aussi les coûts de réseau. Ce LCOE moyen est reconstruit comme la moyenne pondérée des LCOE avec les données disponibles. Pour un même modélisateur, les scénarios les moins verts sont les moins coûteux à court terme.

ANNEXE 12 : Illustration des hypothèses des scénarios en termes d'électrification, d'usage de biocarburants ou d'hydrogène pour l'industrie et les transports





Note : F[vecteur énergétique]C signifie consommation finale d'énergie via le vecteur considéré. FEC est la consommation d'énergie finale.

ANNEXE 13 : Le modélisation des scénarios de transition en France

La France a étudié les effets macroéconomiques de sa Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) avec un modèle annexe. Le Ministère de la Transition Ecologique (MTE) lance la première SNBC en 2015. De nombreux acteurs participent à sa conception, qui consiste en l'établissement de budgets carbone sectoriels pour répondre à l'engagement de la France d'atteindre la neutralité carbone nette en 2050. La SNBC compare ainsi deux scénarios : AME (avec mesures existantes) et AMS (avec mesures supplémentaires). Ces deux scénarios se basent sur les trajectoires de croissances prédites par la Commission Européenne. Le MTE souhaite connaître les enjeux économiques de ces scénarios : les investissements requis et la croissance.

Les besoins en investissements supplémentaires sont produits par la I4CE et la DGEC¹⁸, qui déclare pour les secteurs du bâtiment, des transports, de l'énergie et des réseaux que « les investissements verts ainsi chiffrés reflètent ainsi majoritairement un redéploiement des investissements plus qu'un surcroît d'investissement »¹⁹. La SNBC donne les objectifs annuels de 46 Mds EUR en 2019 montant jusqu'à 126 Mds EUR en 2050.

Les effets macroéconomiques de la SNBC ont été évalués par le modèle ThreeME²⁰ de l'ADEME, de l'OFCE et du CGDD. Le modèle permet le changement de comportement des agents modélisés dans le cadre d'une réaction à cette stratégie. Il prend finement en compte les secteurs clés -dont celui de l'énergie-, ainsi que leurs interactions. Le modèle conclut à un effet positif de cette stratégie sur la croissance, puisque les investissements publics stimulent la croissance et l'emploi, et les Français économisent en fin de compte 2 000 EUR par an en 2050 sur leur facture énergétique. La réallocation des dépenses économisées est la source des gains de 3,8% pour le PIB en 2050 dans le scénario AMS par rapport au scénario AME. Ce modèle ne considère pas les risques physiques du changement climatique, à savoir le surcroît des catastrophes naturelles et l'effet moyen de la hausse des température sur les productivités (agricole, travail).

La nouvelle SNBC sera réalisée à l'aide du modèle TiTAN²¹. Cet outil n'est pas un modèle économique conçu pour modéliser les équilibres macroéconomiques, le comportement des agents, et les rétroactions associées. Il apporte à la place une aide à la décision au long terme sur les technologies, en dépend aussi peu que possible des hypothèses de modélisation. L'économie est considérée par une approche *bottom-up*, où l'on considère la synthèse sans rétroaction les effets des scénarios sur les secteurs-clés considérés.

D'autres acteurs institutionnels travaillent à des scénarios de transition. RTE a fourni des scénarios très poussés pour instruire les décisions énergétiques. Le cadrage macroéconomique n'est donc pas le cœur²² de ce travail. Il utilise la même légère modification de la trajectoire de PIB que celle des scénarios du SNBC. Les risques physiques sont étudiés pour leur effet sur les infrastructures électriques plus que sur l'économie.

NOTES DE FIN

¹ Le Niti Aayog est un centre public d'analyse et de prospective, héritier de la commission au plan.

² Les objectifs chiffrés fixés à la COP 21 sont, à horizon 2030, par rapport à 2005 : 1- la création de puits de carbone de capacité de 2.5 à 3 Mds tCO₂eq ; 2- la réduction l'intensité carbone de son PIB de 33 à 35% ; 3 - 40% de capacités de production électriques non-fossiles (atteint en 2021). Ils ont été réhaussé à la COP 26 pour 1- intensité carbone du PIB à 45% ; 2- capacités de production électriques non-fossiles à 50%.

³ Lawrence Berkeley National Laboratory ;

⁴ India Climate and Energy Modelling Forum ;

⁵ Il n'existe pas de méthode consensuelle pour définir un pays 'd'économie avancée'. Aussi, les modélisateurs utilisent des métriques différentes. [L'Indian Institute of Management d'Ahmedabad \(IIMA\)](#) utilise dans son étude une cible **d'indice de développement humain** de 0,8. La RBI considère à la place des objectifs en **PIB/hab**, définit suivant les seuils empiriques retenus par la classification de la Banque Mondiale (21 664 USD/hab en 2047, qui suppose pour l'Inde une croissance réelle de 7,6%/an, et une croissance nominale de 9,8%/an) ou le FMI (30351 USD/hab en 2047, qui suppose pour l'Inde une croissance réelle de 9,1%/an et une croissance nominale de 11,3%/an). Par comparaison, la période de 25 ans la plus faste pour l'Inde a culminé à un taux de croissance nominal de 8,1%/an (1993-2017). Sources : [RBI, 2023](#) et [RBI, Report on Currency and Finance, 2023](#). Le NITI Aayog utilise un objectif en **PIB national** ([dépasser les 1000 Ts INR₂₀₁₇ en 2047](#), soit 12400 Mds USD₂₀₁₇), qu'il définit dans ses scénarios à forte croissance de son outil IESS. Cette trajectoire de PIB nationale est reprise par des modélisateurs comme le [WRI](#). Le [CEEW](#) utilise lui aussi une cible du PIB du même ordre (17 100 Mds USD₂₀₁₅) pour 2050. Le [gouvernement](#) annonce lui une cible de 30 à 35 000 Mds USD pour 2047, en sus d'un objectif de sécurité énergétique ;

⁶ [RBI, 2023, Bulletin July](#). Ce travail étudie les transformations macroéconomiques qui devront accompagner l'objectif de *Viksit Bharat* et les défis associés. En particulier, le lancement en 2014 du *Make in India* ambitionnait une part de 25% de la production manufacturière dans le PIB en 2022, et 100 M d'emplois créés. Ces objectifs sont bien loin d'avoir été atteints : la part dans le PIB a stagné autour de 17% et les emplois du secteur industriel sont restés autour de 65 M, source : [AIE, 2021, India Energy Outlook](#) ;

⁷ Gambhir et al., 2021, *Energy : Taxes and Transition in India*, [lien](#). En particulier, le pétrole et le gaz naturel comptent à eux seuls 20% des recettes du gouvernement fédéral ; la part est légèrement plus faible mais reste importante pour les recettes des Etats fédérés.

⁸ Le stockage est parfois modélisé comme un coût supplémentaire pour la technologie solaire (CEEW). Quand le modèle électrique le permet, il est modélisé comme une technologie de production d'électricité. Le chiffre de 1500 GW est celui du scénario 'NZ en 2060' construit par l'IRADE. Le potentiel de stockage sous autre forme est limité : l'IRADE indique un potentiel technique de 96 GW par station de transfert d'énergie par pompage (STEP) ;

⁹ Selon la RBI, 58 (resp. 66%) des financements climatiques en Inde sont alloués à des mesures d'atténuation (respectivement hybrides avec de l'atténuation) ;

¹⁰ D'après le scénario 'Baseline' présenté par la RBI dans son [rapport de 2023](#). Il annonce des émissions brutes et nettes presque identiques ;

¹¹ <https://www.germanwatch.org/en/crj>, ce *Global Climate Risk Index* est repris par l'ONU. Cet indice porte sur l'exposition aux événements climatiques extrêmes, en se basant sur des données historiques ;

¹² Le NGFS (Network for Greening the Financial System), qui regroupe 114 banques centrales et superviseurs financiers, a développé un modèle très complet qui vise à compléter les études de risques financiers. La troisième édition (Phase III) de ce modèle a été [reprise par la RBI](#) qui évoque ce coût marginal sur le PIB de 9,9% du changement climatique en 2050. Le NGFS a publié la [Phase IV](#) quelques mois après, qui améliore la prise en compte des risques physiques. En particulier, elle y ajoute la considération des risques considérables des vagues de chaleur et des inondations. Malheureusement, seuls les chiffres moyennés de la région 'Asie et Australie' sont disponibles : 12% supplémentaires pour les vagues de chaleur, 5% pour les sécheresses. Pour autant, la RBI ne corrige pas explicitement ses ambitions de croissance de cette estimation des risques ;

¹³ Une [analyse a été menée par le CEEW](#). Ils évaluent les coûts annuels des politiques nécessaires à leurs scénarios NZ 2070. Les coûts sont croissants, jusqu'à atteindre 4,5% /an, du PIB en 2070 puis baissent. Leurs variantes dans lesquelles la CCS est moins coûteuse réduisent ce coût dont le pic n'est 'que' de 3%/an du PIB ;

¹⁴ Plan national : *National Action Plan on Climate Change*, Déclinaison fédérale : *State Action Plan on Climate Change*. Sur l'état des lieux du financement de l'adaptation en Inde, voir entre autres : CPI, 2024, *Financing Adaptation in India*, [lien](#) ;

¹⁵ La fermentation entérique est responsable de 55% de ces émissions. Suivent 17.5% des émissions dues à la culture du riz, 19% dues aux engrais, 6.7% dues à la gestion du fumier ou 2.2% issus de la combustion des résidus agricoles. Notons enfin que l'agriculture utilise 17% de la production électrique nationale, et consomme énormément d'eau - de carburant pour l'extraire (600 000 t de diesel/an) ;

¹⁶ Coût monétaire pour l'ensemble de la société associé à chaque tonne de CO₂ évitée. Ce coût est ici obtenu comme l'effet marginal de chaque mesure sur la société après l'exécution du modèle, ce qui prend donc en compte des effets indirects de chaîne de valeur ou de redistribution. Une autre manière d'estimer ce coût consiste à partir de chaque technologie et d'en analyser finement, localement, les effets. Ces deux approches sont complémentaires.

¹⁷ Une partie de l'industrie est déjà soumise à un dispositif de marché ciblé sur l'efficacité énergétique (Perform Achieve Trade) peu performant. L'Inde œuvre à la mise en place progressive d'un marché carbone national auquel serait soumis l'industrie. Cf. Note du SER 24-156 [PE] Inde- Les premiers contours du marché carbone national.

¹⁸ DGE : Direction Générale de l'Energie et du Climat

¹⁹ [2020-03-25 MTES SNBC2.pdf \(ecologie.gouv.fr\)](#), page 60, note 46

²⁰ MTE, 2022, « *Evaluation macroéconomique de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) avec le modèle ThreeME* »

²¹ TITAN : Trajectoires optimisées des technologies d'abattements pour la neutralité carbone. Ce modèle est porté par le Commissariat général au développement durable (CGDD), la DGE, et France Stratégie. MTE, 2022, « *TiTan, Renforcer l'analyse économique pour réussir la transition climatique* »

²² RTE, 2022, « *Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050* »