Introduction aux politiques et à la réglementation climatiques dans le contexte des applications de l'IA

Vaibhav Chugh
Pallavi Das

5 août 2026

© Council on Energy, Environment and Water, 2026

Déroulé du cours

(15 min) Partie 1 : compréhension de base, périmètre et implications

- pourquoi les politiques existent, ce qu'elles ciblent, la lutte pour l'équité, les arbitrages récurrents

(10 min) Partie 2 : paysage, acteurs, évolutions et cadres dans différents contextes mondiaux.

- Grands accords mondiaux, institutions multilatérales et mécanismes de financement et de mise en œuvre
- Politiques climatiques nationales en Inde

(25 min) Partie 3 : implications pour l'innovation, le déploiement et la prise de décision

- Comprendre comment les politiques et la réglementation climatiques façonnent l'innovation, le déploiement et la prise de décision, en théorie comme en pratique, en particulier dans le domaine de l'IA et du climat.

Partie 1 : un modèle mental des politiques climatiques



Pourquoi les politiques existent-elles ?

Pour protéger un bien public mondial
Un climat stable est un bien public mondial. Personne ne peut en être exclu, et ce dont profite un pays ne réduit pas ce dont profitent les autres.



Donner un prix à une externalité négative
Les émissions d'un pollueur nuisent à autrui (chaleur, pertes de récoltes), mais ce coût retombe sur des tiers, pas sur le pollueur, et n'entre donc jamais dans sa décision.

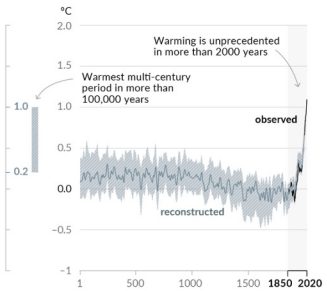


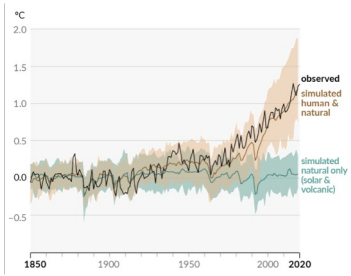
Action collective / problème du passager clandestin
tout le monde gagne quand les autres agissent, donc chacun attend que quelqu'un d'autre agisse.



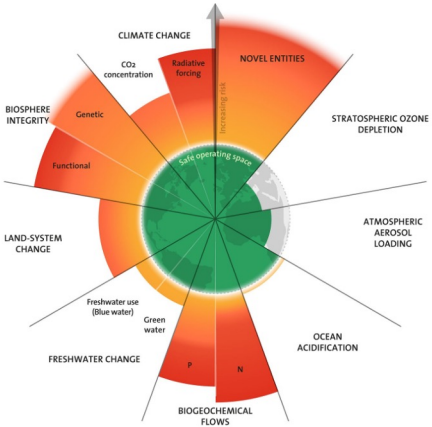
Pourquoi avons-nous besoin de politiques climatiques ?

Changements observés

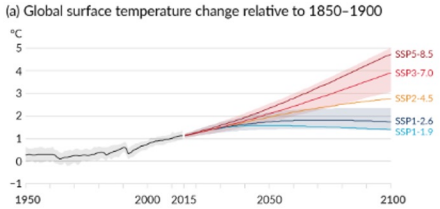


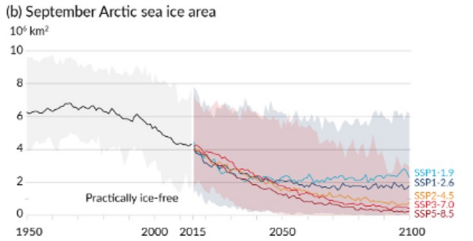


Limites sûres



Changements projetés





https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/

Que ciblent les politiques face au changement climatique ?

Atténuation

Réduire/éviter les émissions

Énergies renouvelables, efficacité, tarification du carbone

Historiquement le cadre par défaut du Nord global

Adaptation

Gérer les impacts inévitables comme la hausse des températures et les phénomènes extrêmes

Solutions fondées sur la nature ; assurance paramétrique ; plan d'action contre la chaleur

Une question existentielle pour un Sud exposé

Moyens de mise en œuvre et instruments des politiques

Financement

Technologie

Renforcement des capacités

Instruments des politiques

- **Fondés sur le marché/les prix** — taxes carbone, systèmes d'échange de quotas (SEQE/plafonnement et échange), suppression des subventions aux combustibles fossiles.
- **Réglementaires (commandement et contrôle)** — normes d'émissions, normes d'efficacité, interdictions/sorties progressives (p. ex. charbon, véhicules thermiques), codes de construction.
- **Fiscaux/financiers** — subventions, crédits d'impôt, obligations vertes, financement mixte, tarifs de rachat, incitations liées à la production.
- **Informatifs/volontaires** — étiquetage, publication d'informations (p. ex. risques climatiques), engagements zéro net des entreprises.

Arbitrages des politiques

- **Coût vs vitesse**
  - Taxe carbone = action rapide, régressive, politiquement fragile.
  - Normes = plus lentes, durables, inscrites dans des calendriers

- **Portée vs profondeur**
  - Paris réunit tous les pays, mais l'application est faible.
  - Les obligations locales (villes, entreprises) ont du mordant, mais ne passent pas à l'échelle

- ***Pourquoi c'est important*** *:* les pays choisissent des instruments différents parce que leurs conditions de départ diffèrent. Il n'y a pas de « bonne » politique unique

Gouvernance des politiques

International
Les traités et les normes fixent le cap

National
Les gouvernements prennent des engagements contraignants et conçoivent les politiques nationales

Infranational
États, provinces et villes vont souvent plus vite et mettent en œuvre sur le terrain

Acteurs non étatiques
Entreprises, investisseurs et société civile façonnent et mettent en œuvre les politiques

Un budget carbone limité, et qui peut l'utiliser

~876 $GtCO_2$

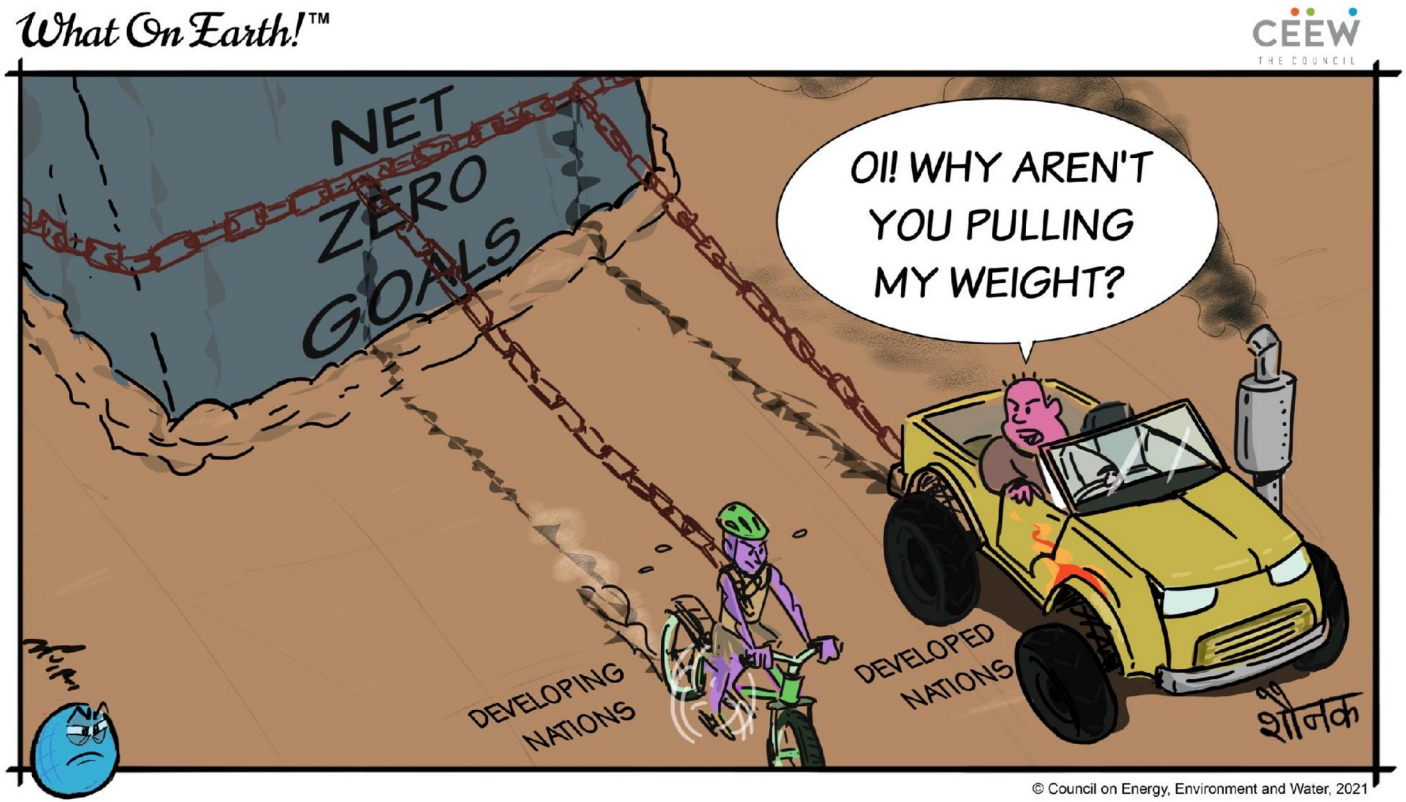
Budget carbone limité pour rester sous 2 °C

Qui peut utiliser cet espace restant : c'est LE combat distributif des politiques climatiques

- **RCMD-CR :** responsabilités communes mais différenciées et capacités respectives (CCNUCC, 1992) : problème partagé, devoirs différenciés selon la responsabilité et la capacité
- **Responsabilité historique :** les émissions cumulées comptent. Les États-Unis, l'UE et les pays en développement ont des émissions historiques très élevées
- **Espace carbone :** répartir le budget selon les émissions actuelles ? par habitant ? cumulées ? Chaque réponse implique des obligations radicalement différentes

https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-economics-and-policy/carbon-clock/remaining-carbon-budget Consulté le 24 juil. 2026

Partie 2 : le paysage des politiques climatiques

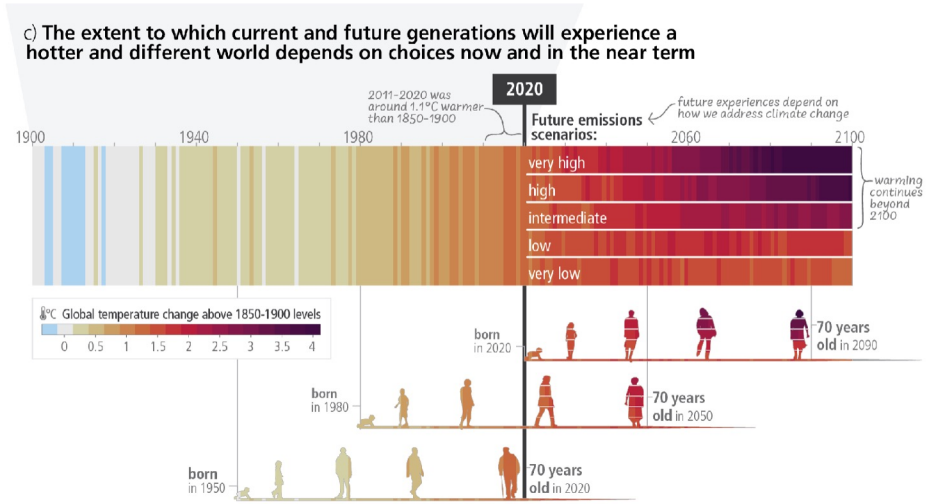


Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : garder la science en avance

- **Il évalue, il ne fait pas de recherche**. Le GIEC ne produit pas de science nouvelle : il examine et synthétise des milliers d'études publiées pour établir ce que l'on sait, avec quel degré de confiance, et où se situent les incertitudes.

- **Gouvernements et scientifiques ensemble**. Les rapports sont rédigés par des centaines d'auteurs experts bénévoles, puis le Résumé à l'intention des décideurs est approuvé ligne par ligne par tous les gouvernements membres.

- **Trois groupes de travail.** GT1 (sciences physiques), GT2 (impacts, adaptation, vulnérabilité), GT3 (atténuation). Les cycles d'évaluation durent environ 6 à 7 ans ; le septième rapport d'évaluation (AR7) est en cours



https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/figures/summary-for-policymakers/IPCC_AR6_SYR_SPM_Figure1.png

La CCNUCC existe pour sortir de cette impasse en amenant tout le monde à s'engager ensemble, publiquement et de façon répétée

Le rôle de la **CCNUCC** (et de l'Accord de Paris qui en découle) :

- Elle réunit **presque tous les pays autour de la table,** pour que personne ne réduise seul pendant que les autres se laissent porter
- Elle rend les **engagements visibles et publics** (CDN), ce qui donne de la prévisibilité aux industriels et rend les pays redevables
- Elle organise des **réunions répétées** (COP annuelles, session de Bonn en milieu d'année) pour entretenir le dialogue, débloquer les négociations et faire respecter les engagements



Groupes de négociation

- **Groupe africain** – l'un des cinq groupes régionaux de négociation de l'ONU, avec 54 États membres
- **Groupe arabe** – officiellement la Ligue des États arabes, organisation régionale créée en 1945
- **BASIC (Brésil, Afrique du Sud, Inde et Chine)** – une coalition de quatre grandes économies émergentes
- **Union européenne (UE)** – les 28 États membres de l'UE, les négociations étant menées par la DG Climat
- **Groupe des 77 + Chine (G77 + Chine)** – une vaste alliance de 134 pays en développement
- **Pays les moins avancés (PMA)** – un groupe des nations les plus pauvres du monde, qui évolue avec les économies
- **Pays en développement partageant les mêmes vues (LMDC)** – un groupe de pays en développement représentant 3,5 milliards de personnes, attaché à ce que les pays riches assument l'essentiel de la responsabilité de la lutte contre le changement climatique
- **Alliance des petits États insulaires (AOSIS)** – un groupe de 44 petites îles et États côtiers de faible altitude
- **Groupe de l'Ombrelle** – un groupe transcontinental de pays, dont beaucoup ont été jugés peu enthousiastes sur le climat ces dernières années, même si ces positions évoluent souvent

Source : https://www.carbonbrief.org/interactive-the-negotiating-alliances-at-the-paris-climate-conference/

L’architecture internationale : un changement de régime (de la contrainte à la pression des pairs)

1992 CCNUCC

Le cadre. Fixe des principes, dont les RCMD-CR, mais pas d’objectifs contraignants

1997 KYOTO

Descendant : objectifs contraignants pour les seuls pays de l’annexe I (riches).

2015 PARIS

Ascendant : chaque pays fixe sa propre CDN, revue via un mécanisme de rehaussement et un bilan mondial quinquennal.

Comment l’accord engage un pays : la CDN de l’Inde

- Réduction de 47 % de l’intensité d’émissions d’ici 2035 par rapport à 2005
- 60 % de capacité électrique non fossile d’ici 2035 par rapport à 2005
- 3,5 à 4,0 milliards de tonnes d’équivalent CO_2 via le couvert forestier et arboré d’ici 2035 (par rapport à 2005)

https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2245209&reg=3&lang=1

Niveau national : économies différentes, boîtes à outils différentes

Le point clé : il n'y a pas de « politique climatique » unique. Ce qu'un pays utilise dépend de sa richesse, de son profil d'émissions et de sa politique.

Le modèle « réglementer + tarifer » des pays à revenu élevé

- **UE** — réglementer + tarifer : Pacte vert / Fit for 55, SEQE-UE (plafonnement et échange), MACF (taxe aux frontières), taxonomie de l'UE

Le reste du Sud global : même logique, pressions différentes

- **Chine** — échelle pilotée par l'État : SEQE national (2021, secteur électrique), objectifs « double carbone » (pic avant 2030, neutralité avant 2060) et domination industrielle dans le solaire, les batteries et les VE
- **Inde** — subventions + mode mission (déployer d'abord, tarifer ensuite) : National Solar Mission, PM-KUSUM (pompes solaires), PM Surya Ghar (toitures, 2024), FAME (VE), LT-LEDS.
- **Brésil** — le modèle *usage des sols* : son atténuation dépend surtout de la déforestation amazonienne, pas de l'énergie ; le succès des politiques = faire appliquer la protection des forêts. Il gère aussi l'un des plus anciens programmes de biocarburants au monde (éthanol).
- **Afrique du Sud** — le modèle de *transition juste* : très dépendante du charbon, et cas test du **Partenariat pour une transition énergétique juste (JET-P)**, un accord multi-donateurs pour financer une sortie maîtrisée du charbon sans effondrer les moyens de subsistance des régions charbonnières.
- **Indonésie / Viêt Nam** — aussi bénéficiaires de **JET-P** : dépendants du charbon, en forte croissance, ils négocient des transitions financées de l'extérieur, où finance climat et politique nationale se rencontrent concrètement.
- **Kenya / Éthiopie** — le modèle du *saut technologique / riche en renouvelables* : réseaux déjà presque entièrement renouvelables (géothermie, hydro), leur frontière est donc l'accès et la résilience, pas la décarbonation d'un réseau sale.

Régimes transversaux : la frontière qui dépasse les frontières

Que fait le MACF ?

Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE taxe le carbone incorporé dans les importations : acier, aluminium, ciment, engrais, électricité, hydrogène.

La phase définitive (payante) a débuté le 1er janvier 2026 ; pénalité de 100 €/tonne en cas de manquement. Extension à ~180 produits en aval proposée pour 2028.

Objectif : empêcher les « fuites de carbone », c'est-à-dire les délocalisations pour échapper au prix du SEQE-UE.

Le débat qu'il suscite…

Pour les exportateurs indiens et du Sud global, le MACF est un coût direct à la frontière de l'UE.

Vu de Delhi :

du « protectionnisme vert » : un bloc riche qui exporte ses coûts climatiques vers des producteurs plus pauvres.

Vu de Bruxelles :

une mesure anti-fuites légitime qui rétablit l'égalité des conditions.

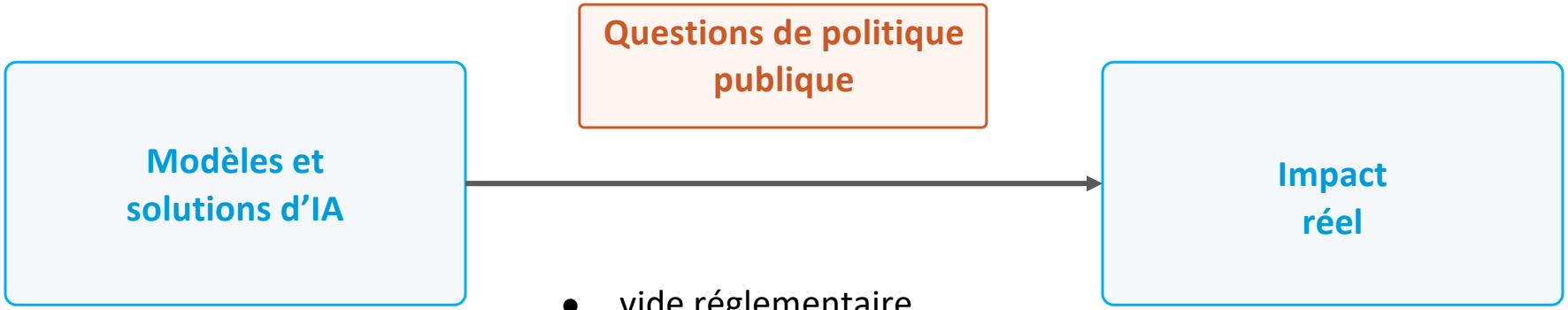
Le meilleur exemple d'un instrument occidental qui transforme les choix du Sud global, aujourd'hui contesté à l'OMC.

Partie 3 : implications pour l’innovation, le déploiement et la prise de décision

Quel rôle les politiques ont-elles à jouer pour le climat et l'IA ?

Les politiques sont structurées et formelles, lentes mais redevables, et fonctionnent mieux quand les problèmes sont bien compris et stables

L'IA est exploratoire, itérative et flexible, adaptée aux défis ambigus ou évolutifs



- vide réglementaire
- dans l'infrastructure de données
- redevabilité
- capacité d'agir

L'IA vantée pour réduire les émissions est elle-même un émetteur non réglementé

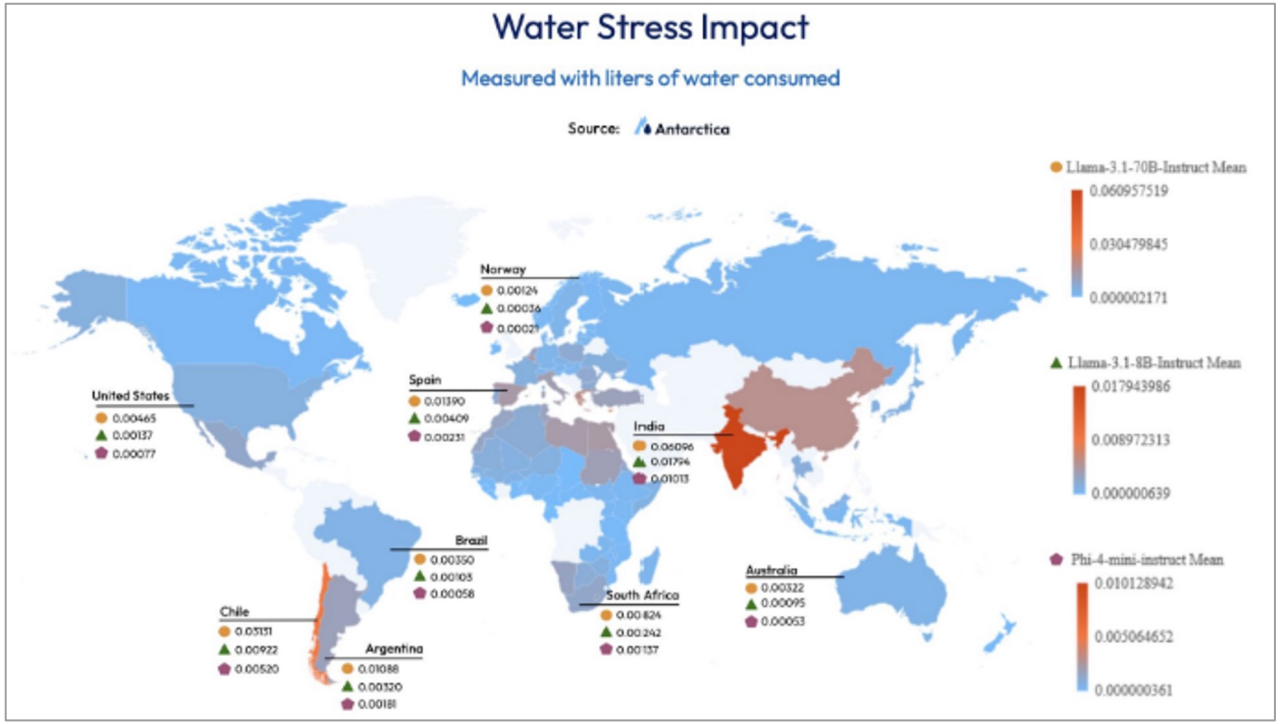
L'IA dans l'énergie, les transports et l'alimentation pourrait réduire de 3,2 à 5,4 milliards de tonnes de CO_2e par an d'ici 2035, des réductions supérieures aux émissions des centres de données et de l'IA elle-même. (Nature*)

Les politiques façonnent l'IA	**Le moratoire de Singapour sur les centres de données** - a imposé un **moratoire sur les nouveaux centres de données en 2019** en raison de la pression sur l'énergie et l'eau - L'autorisation passe désormais par une **allocation compétitive** : efficacité de premier ordre et au moins 50 % d'énergie verte exigées. - ~30 % d'énergie en moins pour les équipements informatiques, en déplaçant **l'effort d'efficacité du bâtiment vers la couche de calcul**
L'IA façonne la mise en œuvre des politiques	**Le CCTS indien lancé en oct. 2026** - Le CCTS, premier marché carbone réglementé de l'Inde, démarre avec les premiers échanges de certificats **couvrant ~490 entités assujetties,** parmi les plus grands SEQE au monde - Les crédits sont émis sur la base des **émissions vérifiées par unité produite** : tout le marché dépend donc de la qualité de la MRV. - **La MRV numérique** (satellite + IA) remplace les audits manuels lents par des données continues et infalsifiables, les prestataires annonçant jusqu'à **70 % de coûts de vérification en moins**

*https://www.nature.com/articles/s44168-025-00252-3

La même requête d'IA envoyée à un centre de données en Inde a un impact en stress hydrique 21 fois plus élevé qu'en Allemagne.

Mathieu François, PDG d'Antartica (publication LinkedIn)

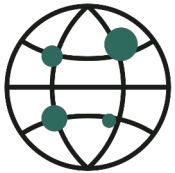


Une requête de longueur moyenne sur **LLaMA 8B** consomme **8,96 mL d'eau en Inde.** La même requête consomme **3,26 mL en Allemagne.** L'écart en volume est inférieur à 3x.

Mais pondéré par la rareté régionale, **l'impact en stress hydrique est de 17,1 en Inde et 0,8 en Allemagne.** L'écart devient 21x.

Avec le **modèle 70B** sur un long prompt, **l'impact de stress atteint 122 en Inde, contre 5,7 en Allemagne.**

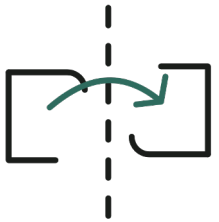
Les coûts carbone de l’IA : trois lacunes de gouvernance



La répartition géographique des coûts carbone de l’IA



Une comptabilité carbone obligatoire pour l’entraînement et l’inférence de l’IA



La redevabilité transfrontalière quand une IA conçue dans un pays nuit à des personnes dans un autre

Ce qui distingue l'IA dans l'action climatique

Construire des solutions d'IA pour l'action climatique exige une approche plus large

	Conventionnelle	Action climatique
Finalité et motivation	• Résultats commerciaux : profit, part de marché, PI	• Résoudre des problèmes communautaires ou systémiques : l'IA fait partie d'un problème plus large
Qui définit le problème Parties prenantes/implication	• Responsables métier, équipes opérationnelles et données	• Communautés concernées, organismes publics, ONG : ateliers participatifs, questionnaires, séances de co-conception
Enjeux sociaux et éthiques	• Plus réactive et axée sur la conformité (p. ex. RGPD)	• Intégrés dès le départ : équité et inclusion, protection de la vie privée
Données et méthodes	• Données structurées, propres, internes	• Données souvent incomplètes et désordonnées, qui exigent interprétation, nettoyage et compréhension du contexte
Redevabilité et succès	• KPI : ventes, réduction des coûts, engagement des utilisateurs	• Bénéfices sociaux, changements systémiques, redevabilité envers les communautés concernées

Sortir du piège du « PILOTE » .

DONNÉES / PROBLÈME

ce qui est construit

Les données doivent être **représentatives de la population** et des **conditions** locales

OXYMÈTRE DE POULS

Des données vérifiées sur le terrain, **détenues par les institutions responsables** de l'action

BRÉSIL INPE (PRODES/DETER)

Identifier le **bon énoncé du problème** dès le départ

MODÈLE D'ÉPIDÉMIE DE DENGUE / MP

DÉPLOIEMENT

si cela atteint quelqu'un

Intégrer l'IA aux **processus existants** avec des mécanismes d'action

INONDATION DE DERNA

Exactitude et références doivent être établies dans des **scénarios de déploiement réels,** pas en laboratoire

DÉPISTAGE DE LA RD PAR GOOGLE - THAÏLANDE

PRISE DE DÉCISION

si l'on peut s'y fier

Pour les systèmes critiques, concevoir un système avec **humain dans la boucle**

PREVISIA - BRÉSIL

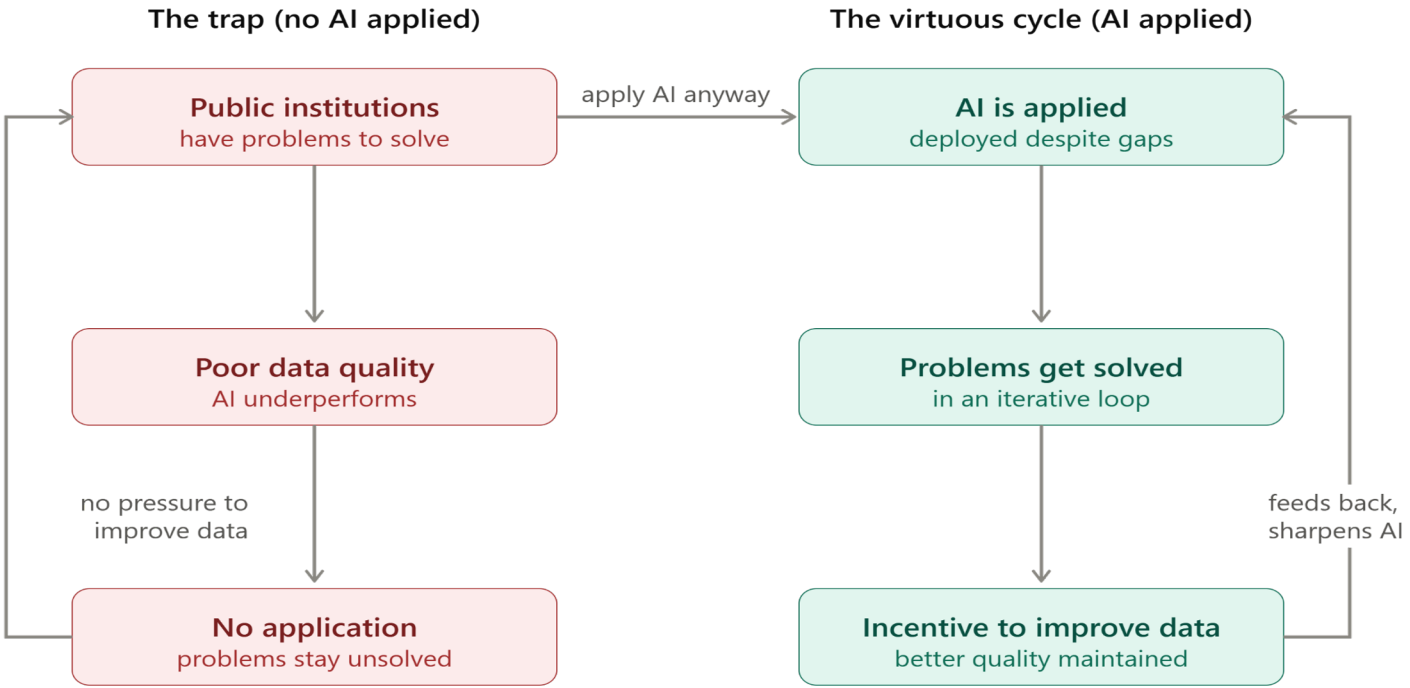
Une appropriation institutionnelle au-delà des pilotes, avec des améliorations itératives permettant une opérationnalisation progressive

PLAN D'ACTION CONTRE LA CHALEUR D'AHMEDABAD

Communiquer l'incertitude du modèle est aussi important que le résultat

FOUDRE - ÉTUDE DE CAS EN ODISHA

La qualité des données n’est pas un prérequis qu’on attend : c’est un produit de l’usage



Cas 1 : des données représentatives

L'appareil auquel tout le monde se fiait ne voyait pas les peaux foncées

24,504

patients étudiés

JAMA Internal Medicine, 2022



Contexte

- Pendant la **COVID-19, les oxymètres de pouls** sont devenus l'outil de première ligne pour surveiller l'oxygène sanguin.
- **Utilisés** en toute confiance

Complication

- Étalonnés depuis 1989 sur des populations majoritairement à peau claire
- chez les patients à peau foncée, ils surestimaient systématiquement l'oxygénation, les faisant paraître en bonne santé alors qu'ils ne l'étaient pas

Actions

- La FDA reconnaît le problème et demande des normes actualisées.
- Les appareils n'ont pas changé, trop ancrés dans les pratiques cliniques.

Le parallèle climatique : une IA entraînée sur des données du Nord global interprète mal la réalité locale de la même façon. Des données représentatives et souveraines ne sont pas un plus : elles sont la condition de la confiance.

Cas 2 : appropriation institutionnelle des données et des résultats

L'INPE du Brésil (PRODES / DETER) : des données souveraines, vérifiées sur le terrain, détenues par l'institution responsable

~95%

exactitude du relevé officiel PRODES de l'INPE



Contexte

- Des projections étrangères de déforestation ont conduit la Banque mondiale à geler ses prêts au Brésil, sur fond de désaccords constants entre organismes sur les vrais chiffres.

Action

- le gouvernement a chargé son propre institut spatial de produire des chiffres officiels de déforestation à partir d'observations satellitaires réelles.
- PRODES fournit le taux annuel officiel (~95 % d'exactitude) ; DETER émet des alertes quotidiennes sur lesquelles l'agence de contrôle s'appuie pour planifier inspections et opérations contre le défrichement illégal

Résultat

- Avec le renforcement des contrôles depuis 2023, la part du Brésil dans la perte mondiale de forêts tropicales primaires est passée de 43 % à 30 %, son plus bas niveau depuis 2015

Le parallèle climatique : l'information sur les risques n'est exploitable que si l'institution responsable détient la réalité de terrain

Cas 4 : une prévision n’est pas un résultat, il faut encore que quelqu’un agisse

Derna, Libye · tempête Daniel · septembre 2023

4,300+

morts, malgré une alerte trois jours avant



Contexte

- Une alerte météorologique a été émise trois jours avant la tempête Daniel, et la prévision s’est révélée exacte.
- Une rupture de barrage avait été signalée dans une étude de 2022, mais aucun système opérationnel ne suivait ce risque ni n’y répondait

Action

- Lorsque les barrages ont cédé aux premières heures, les autorités avaient donné des ordres contradictoires et un couvre-feu qui maintenait les habitants chez eux, sur le passage de l’eau.
- On savait les vieux barrages en mauvais état, mais ils n’ont pas été entretenus.

Résultat

- Plus de 4 300 personnes sont mortes. La prévision était juste ; c’est le système autour qui a échoué : pas de mandat clair, pas d’évacuation, pas de réponse au dernier kilomètre.

Le parallèle climatique : un système d’alerte précoce par IA exact ne vaut rien sans les moyens d’agir : mandats clairs, logistique d’évacuation, communication qui atteint les gens. La prévision est la partie facile.

Cas 5 : l'exactitude des modèles d'IA en conditions réelles de déploiement

Dépistage de la rétinopathie diabétique · Thaïlande, 2019

>90%

exactitude en laboratoire · Beede et al., 2020



Contexte

- La Thaïlande voulait **dépister 60 % de ses 4,5 millions de patients diabétiques**, mais ne comptait que **~200 spécialistes de la rétine, soit un ratio de 1 pour 3 000.**
- Un outil d'apprentissage profond promettait des **lectures de niveau spécialiste en minutes plutôt qu'en semaines**.

Complication

- En clinique, un éclairage faible a conduit le système à **rejeter 21 % des images** prises.
- **Une connexion internet lente** rendait les envois peu fiables, 60 à 90 secondes par image. Les infirmières qui réalisaient le dépistage n'avaient jamais été associées à la conception.

Conséquence

- Les infirmières ne p**ouvaient dépister qu'environ 10 patients par séance de deux heures ; l'outil créait des goulets d'étranglement,** pas de la vitesse.
- Il rendait leur **travail plus difficile** : elles l'ont jugé pire que ce qu'il remplaçait.

Le parallèle climatique : un modèle brillant sur les benchmarks peut échouer sur le terrain : les phénomènes extrêmes réels et les alertes précoces mettent l'IA climatique à l'épreuve dans les conditions et les processus réels où elle doit fonctionner.

Cas 6 : l’appropriation institutionnelle pour un impact durable

Plan d’action contre la chaleur d’Ahmedabad · institutionnaliser une mesure efficace

46,8 °C

Pic de mai 2010 à Ahmedabad



Contexte

- La vague de chaleur de mai 2010 a causé 1 344 décès excédentaires à Ahmedabad en un seul mois, soit une hausse de 43 % par rapport à la normale.
- La télédétection montre que les quartiers informels à faibles revenus sont 5 à 10 °C plus chauds que les quartiers aisés de la même ville.

Action

- La corrélation entre mortalité quotidienne et température a révélé un seuil de déclenchement (~41 °C) au-delà duquel les décès s’envolaient, base d’un système d’alerte par niveaux.
- Ahmedabad a créé le premier plan d’action contre la chaleur d’Asie du Sud : alertes précoces, programme de toits frais et heures de repos obligatoires pour les travailleurs en extérieur.

Résultat

- Une étude de suivi a montré que le plan évite ~1 190 décès par an (2 380 sur les étés 2014–2015 étudiés).
- La NDMA l’a adopté comme modèle national : des plans d’action contre la chaleur existent désormais dans plus de 20 États indiens.

Le parallèle climatique : l’impact durable arrive quand une institution responsable s’approprie et finance l’outil au-delà du pilote. Le plan d’Ahmedabad a perduré parce que la NDMA en a fait une politique nationale

CEEW THE COUNCIL

Cas 7 : s’appuyer sur des modèles d’IA qui nécessitent un humain dans la boucle

PrevisIA (Imazon, avec le ministère public de l’État du Pará)

~70%

exactitude pour le contrôle humain



Contexte

- **Perte de forêts en Amazonie : les contrôles réagissent lentement**, car la surveillance classique ne montre que les dégâts déjà commis
- PrevisIA applique **l’IA à l’imagerie satellitaire pour prévoir** où frappera la déforestation illégale, surtout en **détectant les routes ouvertes en premier**, puisque 95 % des défrichements ont lieu à moins de 5,5 km d’une route

Action

- **Alertes de risque** via un tableau de bord public, mais ni amendes ni embargos
- Le ministère public examine les prévisions et établit des protocoles d’action : **l’IA prédit → les humains décident → l’action suit**

Résultat

- Il a signalé environ 5 000 km² de forêt à haut risque pour 2024
- Avec ~30 % de faux positifs, **l’exactitude seule ne suffit pas.** Le contrôle humain et l’appropriation institutionnelle permettent à l’IA de renforcer la gouvernance, pas de la remplacer.

Le parallèle climatique : pour les décisions climatiques à fort enjeu, l’exactitude est nécessaire mais pas suffisante. Gardez une institution humaine responsable dans la boucle : l’IA doit renforcer la gouvernance, pas s’y substituer.

Les politiques ne décident pas si l'IA advient

Elles décident

- **quels problèmes valent la peine d'être résolus,**
- **quelles données existent pour les résoudre,** et
- **ce que vous devez prouver avant que quiconque agisse sur vos résultats.**

Cas à discuter : la foudre

Le problème de la « lassitude des alertes » et des faux positifs (le défi de modélisation)

Pour chaque hausse de 1 °C de la température ambiante mondiale, les projections estiment une hausse de 12 % des coups de foudre

L'Inde connaît une hausse de la fréquence de la foudre, concentrée dans certains États

- 96 % des décès liés à la foudre en Inde surviennent exclusivement en zone rurale
- 77 % des victimes sont des journaliers agricoles travaillant dans des rizières à découvert ou des éleveurs en pâturage ouvert
- La période la plus meurtrière se situe entre 14 h et 19 h

- La prévision immédiate de la foudre porte sur des nuages convectifs rapides et très instables. Ces systèmes changeant vite, les modèles génèrent souvent des « faux positifs » : ils prévoient un coup de foudre localisé et violent qui finit par se dissiper ou se déplacer.
- Si votre modèle d'IA déclenche trois sirènes d'affilée dans un village sans qu'il y ait de foudre, la communauté souffrira d'une forte « lassitude des alertes » et ignorera délibérément la quatrième alerte, potentiellement mortelle.

En tant que data scientists, comment réglez-vous le seuil de sensibilité du modèle ? Vaut-il mieux tolérer les fausses alertes pour maximiser la sécurité, ou risquer de manquer un coup de foudre pour préserver la confiance de la communauté ?

Cas d’usage réel : prévision des épidémies de maladies vectorielles au Madhya Pradesh

Objectif : **un modèle qui prévoit les cas hebdomadaires 1 à 8 semaines à l'avance pour 51 districts du Madhya Pradesh, avec des données de cas de 2017 à 2025.**

2 questions pour chaque district

ÉTAPE 1 — Y aura-t-il des cas dans les semaines à venir ?

Alerte oui / non

▼

ÉTAPE 2 — Si oui, combien ?

Classer la semaine par niveau de gravité

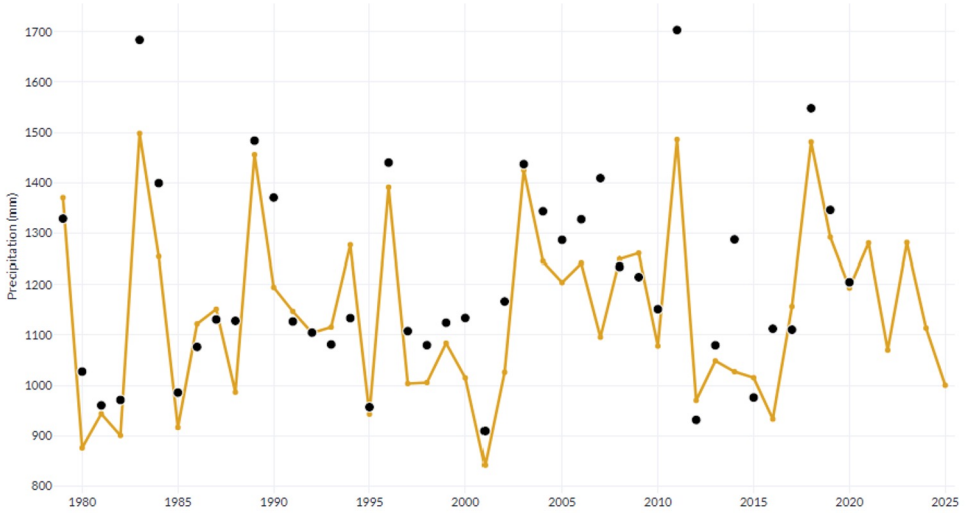
0	1–5	5–20	20+
Aucun	Faible	Moyen	Élevé

Données climatiques : une source qui couvre chaque district et chaque semaine

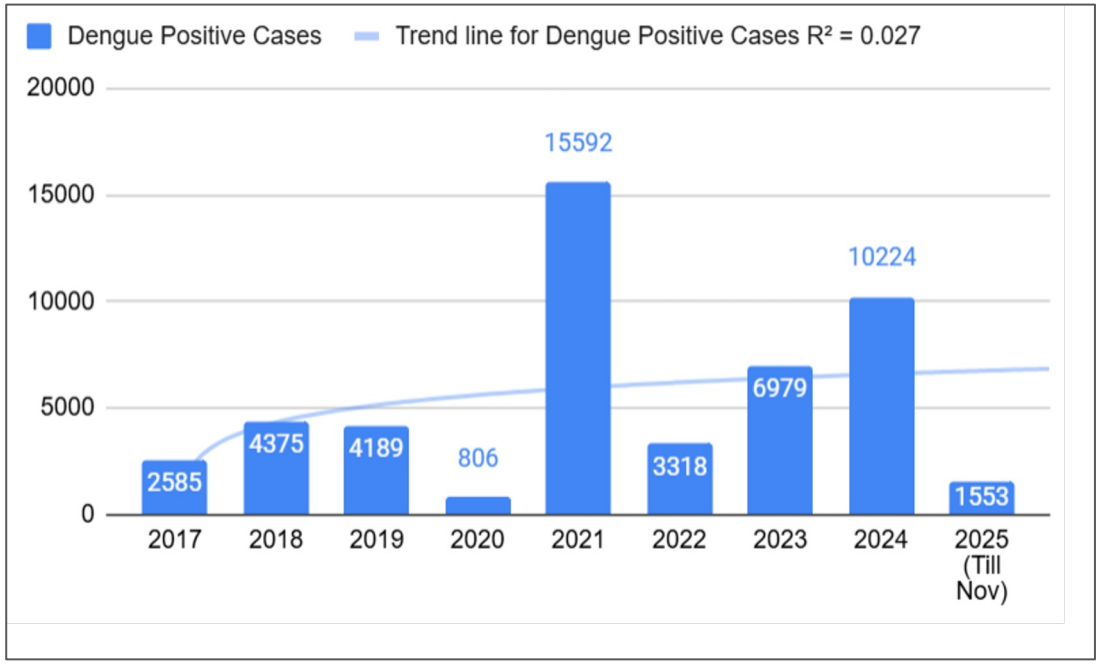
Les données des stations sont considérées comme la vérité de terrain

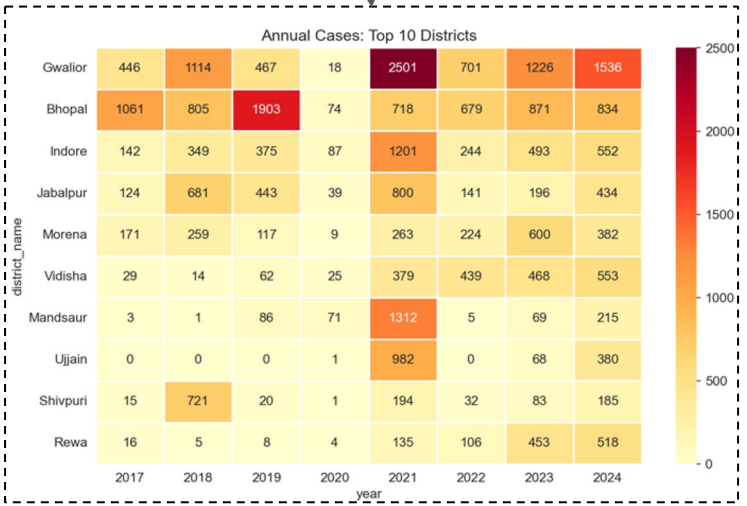


- Pour ERA5 et les données maillées de l'IMD avec les données des stations
- En comparant température et humidité des deux aux données quotidiennes des stations, elles sont presque identiques
- Les précipitations sont mieux corrélées pour l'IMD

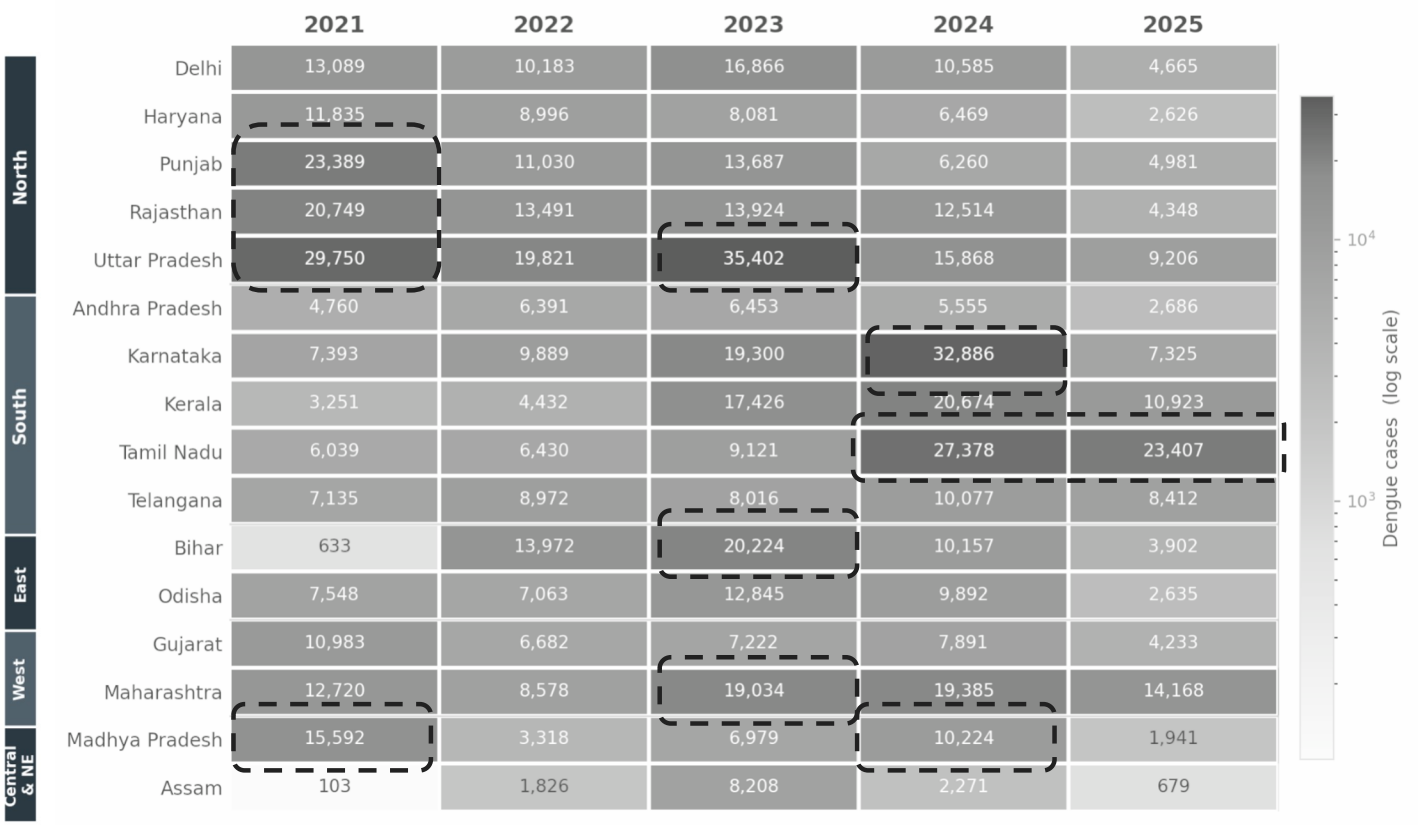


Analyse exploratoire des données du MP : des pics selon les régions et les années, à approfondir





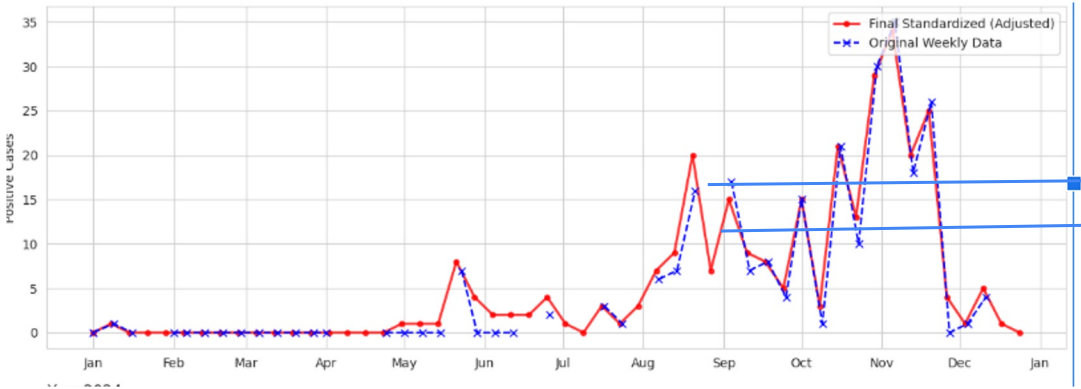
En Inde, les pics surviennent selon les années dans différentes régions



- Cela signifie que les pics dépendent de facteurs très liés à l'espace, comme l'entomologie ou les sérotypes
- Cela contredit l'idée que les pics seraient uniquement dus à l'après-COVID ou aux migrations

En pratique (sur le terrain) : les données de cas sont incomplètes et sous-déclarées et doivent être corrigées avant la modélisation

Données de cas manquantes



Cas ajustés à l'aide des totaux mensuels

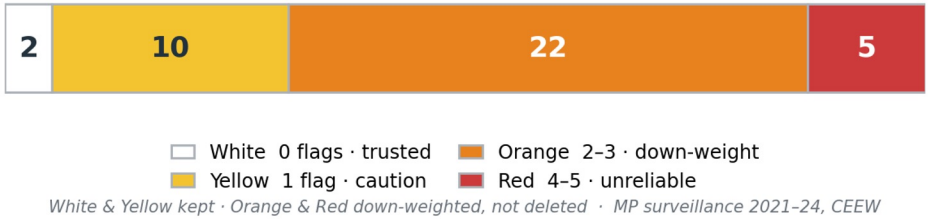
Cas hebdomadaires déclarés

Données de cas sous-déclarées

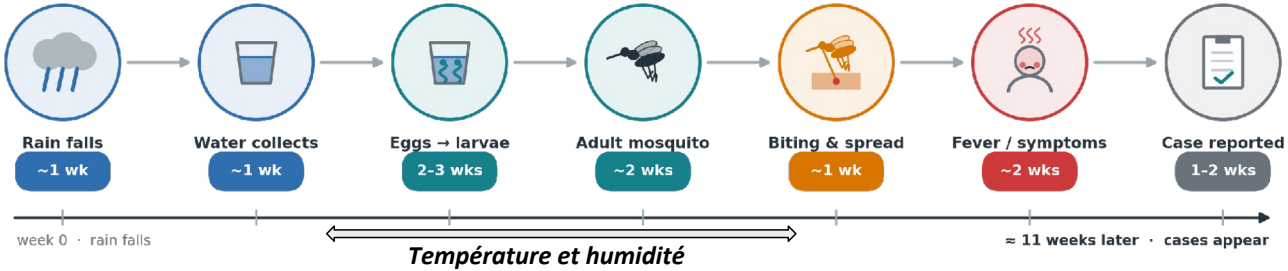
Chaque année-district passe 4 contrôles qualité :

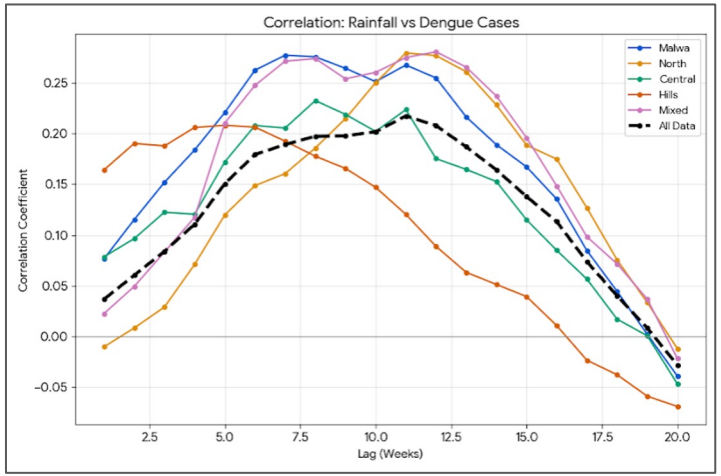
1. Nombre d'échantillons nul / anormalement bas
2. Semaines manquantes (aucune déclaration)
3. **Chutes et pics soudains inexpliqués**
4. Incohérences internes (p. ex. positifs > échantillons)

39 districts actifs : et semaines-districts



Variables décalées en apprentissage automatique : les paramètres climatiques précèdent les cas d'environ 8 à 12 semaines, selon la signature de chaque région





Régions	Pic de précipitations Décalages
Plateau de Malwa : (p. ex. Indore, Ujjain)	**8 semaines**
Nord/Gird : (p. ex. Gwalior, Morena)	**11 semaines**
Centre/Narmada : (p. ex. Jabalpur, Hoshangabad)	**8 semaines**
Collines/Satpura : (p. ex. Balaghat, Chhindwara)	**9 semaines**
Mixte/Bundelkhand : (p. ex. Sagar, Rewa)	**12 semaines**

Modèle d'apprentissage automatique en deux étapes : l'étape 1 signale les semaines avec cas (réglée pour le rappel) ; l'étape 2 estime leur nombre

CE QUI ENTRE — 56 variables (M6)

Pluie et précipitations · 15
pluie au décalage optimal, jours humides et très pluvieux ; cumuls sur 4/8 sem., extrêmes

Température et humidité · 11
température et humidité en 3 blocs ; max/min sur 12 sem. ; semaines dans la plage 25–32 °C

Historique des cas et références · 12
incidence décalée de 9 à 12 ; 7 références par district ; ancrage SARIMA

Analyses de laboratoire et surveillance · 8
log des échantillons et positivité, décalages 5 à 8 ; moyennes mobiles sur 4 sem.

Végétation et interactions · 10
habitat NDVI ; pluie×température ; aptitude pour les moustiques ; indicateur COVID

Repères du calendrier saisonnier supprimés : les pics s'expliquent par le climat, pas par la date.

À quoi ressemblent les nombres de cas · 5 616 semaines-districts, 2021–24

Nombre	Niveau	Part des semaines
0 cas	Semaine calme	3,243 · 57.7%
1–5	Sporadique	1,139 · 20.3%
6–20	Élevé	795 · 14.2%
>20	Épidémie	439 · 7.8%

ÉTAPE 1 — Y aura-t-il des cas ?

- Le classificateur analyse la tendance des cas et le climat et émet une alerte oui / non pour chaque semaine-district

→ **Seuil d'alerte fixé à 0,35, et non 0,5 : il réagit aux signaux faibles pour que peu de vraies épidémies passent entre les mailles**

ÉTAPE 2 — Combien de cas ?

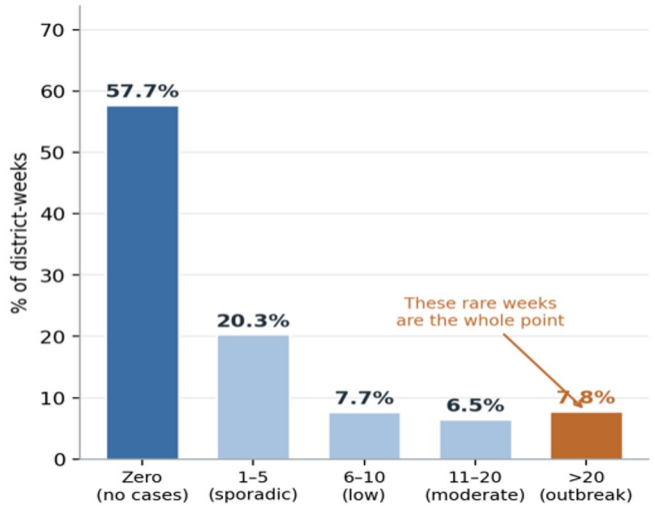
- Ne s'exécute que si l'étape 1 répond oui : un ensemble de 3 modèles estime le nombre de cas
- Perte de Tweedie : conçue pour des comptages asymétriques riches en zéros ; les prédictions ne sont jamais négatives
  - Erreur absolue moyenne asymétrique

15 CEEW THE COUNCIL

Deux ajouts qui améliorent l'exactitude

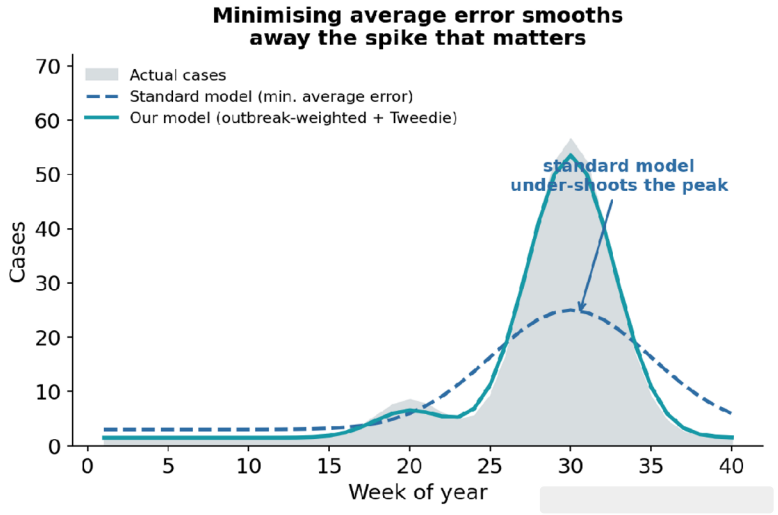
La distribution de perte de Tweedie :

- Un modèle qui traite toutes les semaines de la même façon apprend simplement le signal dominant : « prédire le calme ».
- Nous utilisons une perte de Tweedie, conçue pour des comptages riches en zéros et asymétriques à droite, afin que les prédictions restent positives et que la perte se concentre sur la queue dangereuse



Erreur absolue moyenne asymétrique (AsymMAE) :

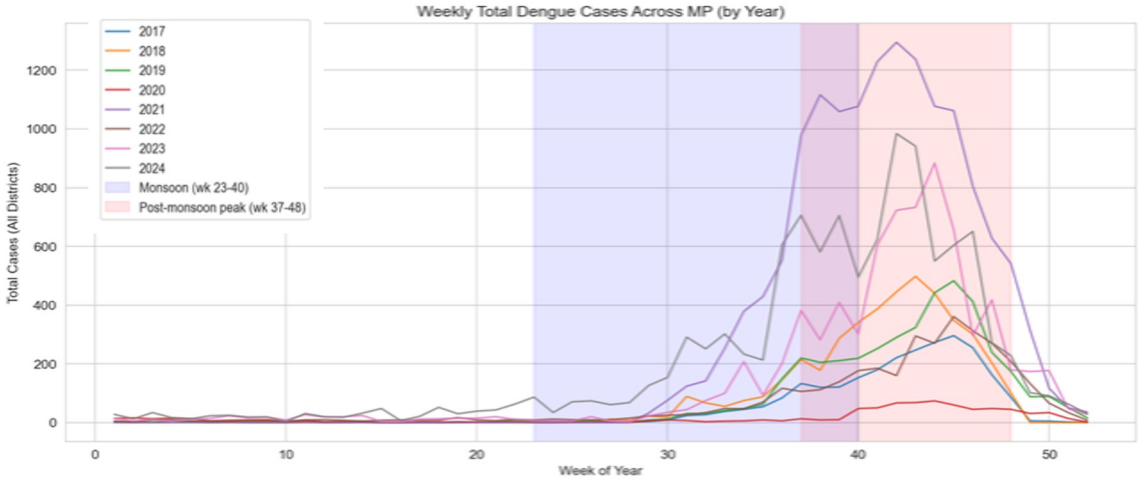
- Prédire « la moyenne » semble juste la plupart du temps, mais on sait que ce n'est pas le cas.
- Une fonction de perte asymétrique qui pénalise beaucoup plus le fait de manquer une épidémie que de surestimer une semaine calme : le modèle est forcé de poursuivre le pic, pas la moyenne.
- Les semaines d'épidémie sont en outre surpondérées 2 à 6 fois à l'entraînement, pour que le modèle s'exerce davantage sur les événements rares qui déclenchent réellement les alertes sanitaires.

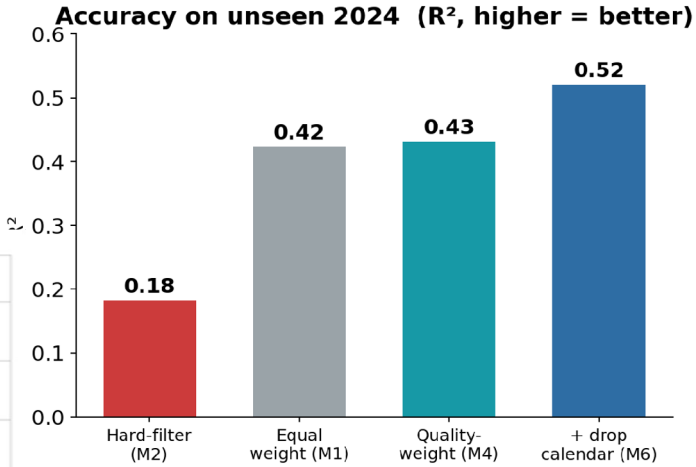


La dengue est saisonnière, mais qu'en est-il d'une mousson précoce ou tardive ?

La forme de la saison est fixe ; seule sa taille change, nous avons donc vérifié si le modèle ne mémorise pas simplement la date

- La saison **a une forme fixe** : **~78 % des cas de sept. à nov.**, pic en octobre, chaque année. Seules **l'ampleur** (≈8×) et **la durée** (≈8 vs ≈4 mois) changent.
- Le calendrier devient alors un raccourci tentant : « prédire un pic en septembre parce qu'on est en septembre ».
- Nous avons donc **supprimé toutes les variables calendaires** (semaine de l'année, indicateurs de mousson) et relancé :
  - **modèle pondéré par la qualité → amélioré** (R^2 0,43 → **0,52**) : il apprend le « pourquoi » climatique.
  - **modèle non pondéré → dégradé** (0,32 → 0,26) : il avait besoin de la béquille.
- Cela aide le modèle à identifier les vrais prédicteurs des cas de dengue, c'est-à-dire les variations climatiques.





M1 — Référence : toutes les données, sans filtrage qualité, rappel le plus élevé (0,85).
M2 — « White-only » : entraîné sur des données propres, supprime les biais, le plus faible
M4 — Pondéré par la qualité : surpondère les données propres, solide et peu complexe
M6 — Meilleur : pondéré par la qualité, calendrier supprimé, apprend le climat

Expériences : comparaison de six modèles (2024 réservée, districts propres)

Ce qui compte comme épidémie

- Semaine d'épidémie = plus de 5 cas dans un district sur une semaine
- M6 est évalué par rapport à ce seuil sur les données 2024 réservées.

Modèle	Variables	Saison	MAE	RMSE	R^2	F1	Précision	Rappel
M1 : toutes les données conservées (pas de filtrage)	60	Oui	4.28	9.85	0.42	0.85	0.85	0.85
M2 : semaines sous-déclarées retirées	25	Oui	4.85	11.73	0.18	0.80	0.80	0.81
M3 : décalages par district inclus	69	Oui	4.38	10.69	0.32	0.81	0.89	0.74
M4 : semaines sous-déclarées pondérées	60	Oui	4.07	9.77	0.43	0.84	0.88	0.81
M5 : décalages par district inclus + n° de semaine retiré	65	Non	4.64	11.16	0.26	0.84	0.87	0.81
M6 : M4+M5	**56**	**Non**	**4.03**	**8.97**	**0.52**	**0.85**	**0.87**	**0.84**

Nos prochaines étapes sur le projet

➔ **Accroître la granularité :** passer du niveau district au niveau infra-district (quartier/centre de santé primaire) avec données et géospatial

➔ **Changements de sérotype :** quelle souche circule (DEN-1/2/3/4). Un changement, p. ex. une hausse de DEN-2, peut transformer une année calme en épidémie.

➔ **Surveillance des moustiques :** entomologie sur le terrain, enquêtes larvaires et densité des vecteurs adultes (où et combien).

➔ **Déploiement pilote au MP et au Tamil Nadu :** faire fonctionner le système dans deux États pour le tester sous différents climats et systèmes de déclaration.

Ce qu’il faut retenir pour les concepteurs…

1. **Les politiques ne conditionnent pas ce que vous construisez : elles décident de ce qui vaut la peine d’être construit**
2. **Votre propre calcul est désormais un objet de politique publique**
3. **Des données représentatives et souveraines sont la condition de la confiance, pas un plus**
4. **L’exactitude en laboratoire n’est pas l’exactitude sur le terrain**
5. **Une prévision n’est pas un résultat ; l’appropriation institutionnelle est la stratégie de déploiement**
6. **Optimisez le capital de confiance, pas seulement la fonction de perte**

Merci