L’IA au service de la comptabilité carbone

Dan Cusworth

École d’été virtuelle CCAI

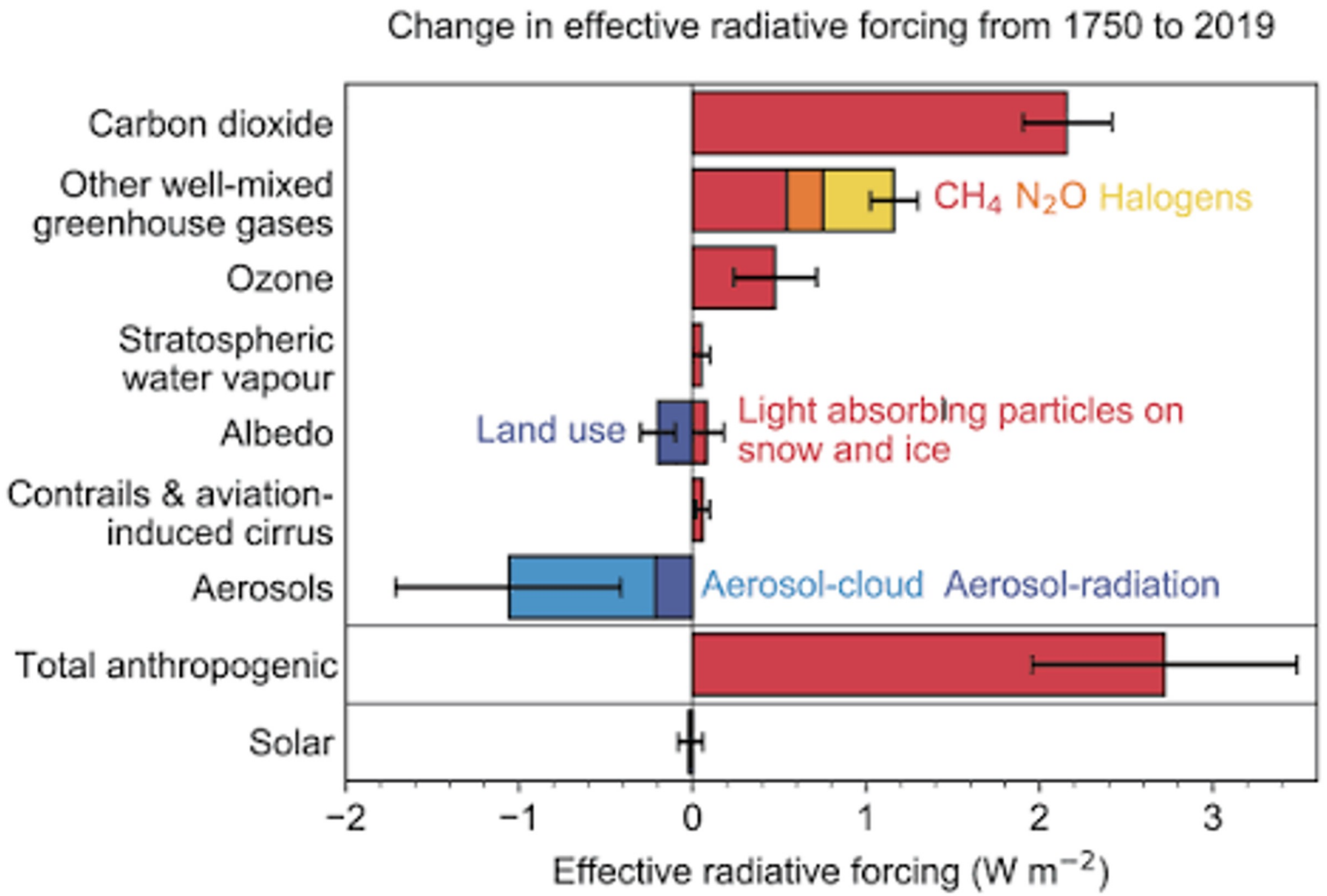
Août 2026

Feuille de route du cours

0:00–0:30	**Partie 1** Fondements de la comptabilité carbone
0:30–0:35	Moment d’interaction
0:35–1:05	**Partie 2** Télédétection et comptabilité carbone
1:05–1:15	Pause + moment d’interaction
1:15–1:45	**Partie 3** Utiliser l’IA pour améliorer la comptabilité carbone
1:45–2:00	Discussion et conclusion

Partie 1 Fondements de la comptabilité carbone

Pourquoi veut-on comptabiliser le carbone ?



Émissions de deux molécules carbonées

Dioxyde de carbone (CO2)

Méthane (CH4)

Responsables de l'essentiel du réchauffement depuis l'ère préindustrielle

Source : GIEC

Pourquoi veut-on comptabiliser le carbone :

- Estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES)
- Suivre les stocks de carbone et les autres GES
- Quantifier les incertitudes

Objet du cours d'aujourd'hui

- Améliorer la comptabilité des entreprises
- Renforcer l'analyse du cycle de vie
- Appuyer les processus de vérification et d'audit

Taxonomie : où l'IA intervient-elle dans la comptabilité carbone ?

Utilisez cette carte comme guide : chaque nœud est traité plus loin dans le cours

Données d'activité	Estimation des émissions	Déclaration et agrégation	Vérification et audit
Quelles activités ont lieu, et à quelle échelle ?	Combien de GES par unité d'activité ?	Combiner les sources en inventaires	Contrôles croisés indépendants des données autodéclarées
Imagerie : détection d'objets (exploitations, puits de pétrole, aciéries, arbres)	Détection et segmentation des panaches	Homogénéisation/organisation automatisée des données d'activité	Validation croisée par satellite
Imagerie : détection de la déforestation/du changement d'usage des sols	Inversion atmosphérique (flux descendant)	Extension de l'analyse du cycle de vie à tous les types de produits	Signalement des anomalies/super-émetteurs
Indicateurs indirects : collecte de jeux de données publics (p. ex. concessions des exploitants)	Amélioration des facteurs d'émission	Estimation du scope 3 de la chaîne d'approvisionnement	Quantification de l'incertitude

Ce cours approfondit l'estimation des émissions (détection des panaches) et les données d'activité, avec des liens constants vers la vérification.

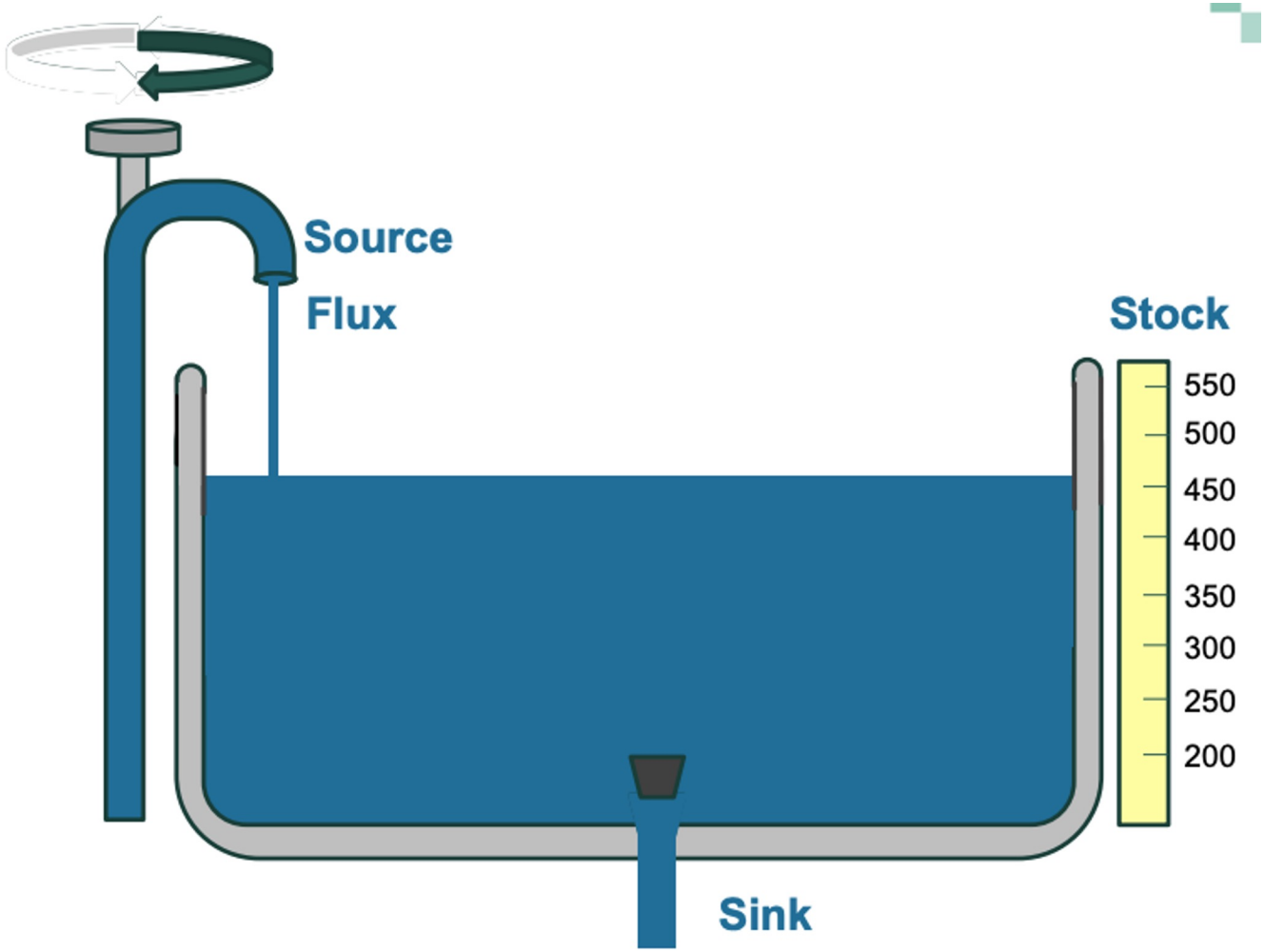
Relation entre sources, puits et stocks

Imaginez un lavabo avec un robinet et une bonde au fond.

- **Stock** : l'eau dans le lavabo
- **Source** : l'eau ajoutée au lavabo
- **Puits** : l'eau retirée du lavabo

- Le taux d'augmentation du stock dans le lavabo s'appelle le flux.

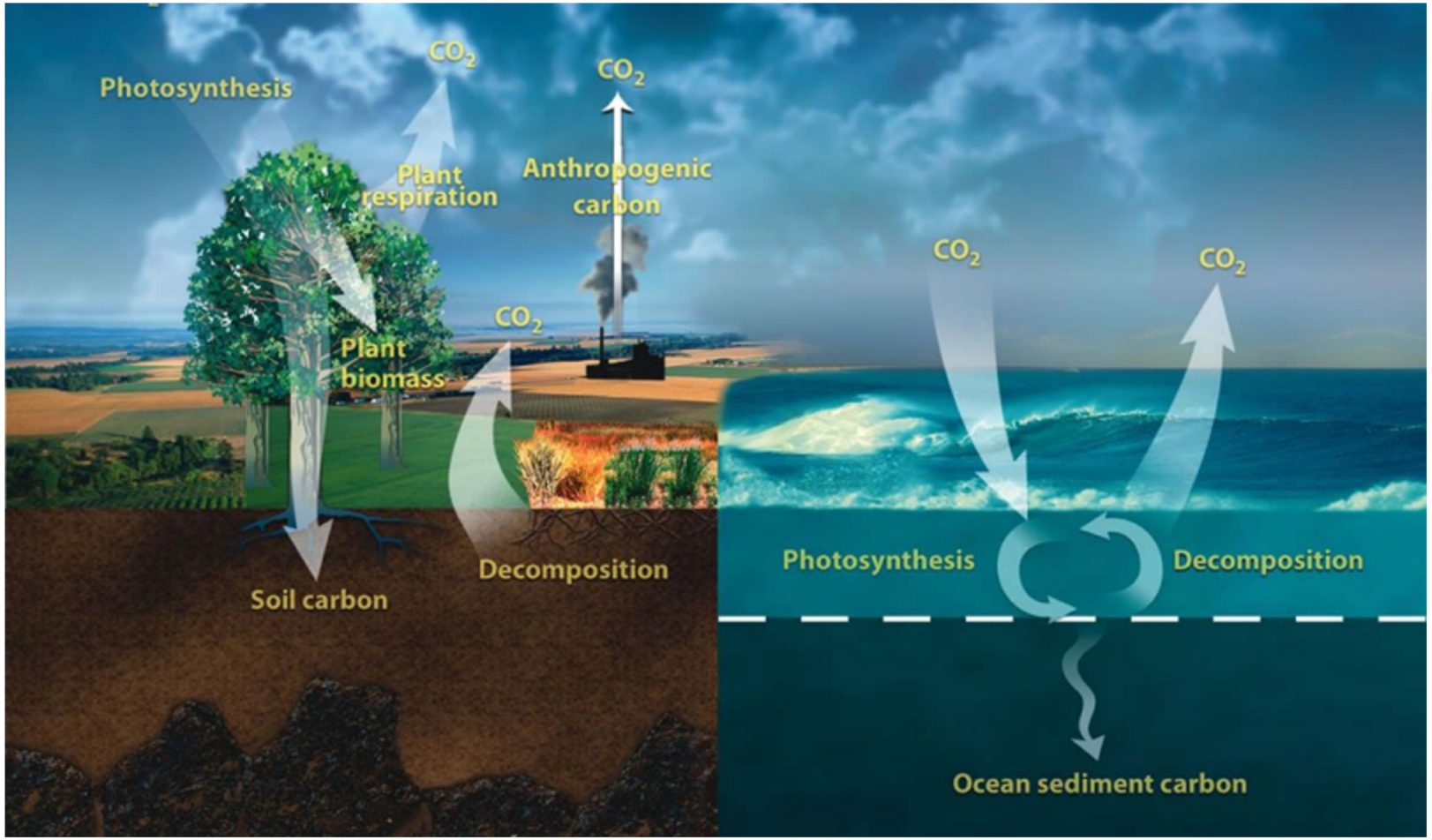
– Les sources produisent des flux positifs.
– Les puits produisent des flux négatifs.



Source : NASA ARSET

Quels sont les principaux sources et puits de carbone ?

Sources et puits de carbone



Comptabiliser le carbone/le CO2 exige de comprendre

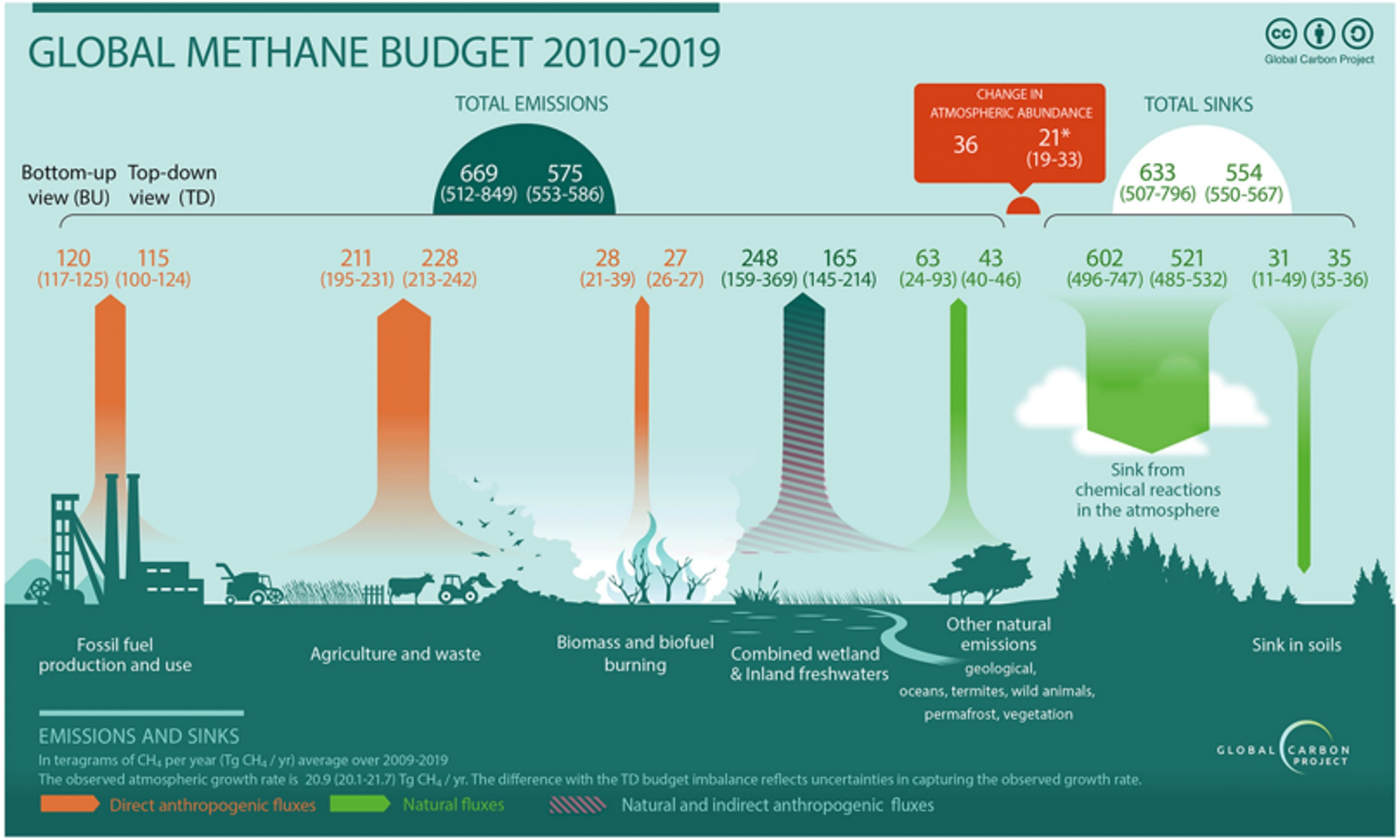
- La taille des stocks de carbone dans les différents « réservoirs »

- Les processus qui modifient ces stocks (p. ex. cycles et émissions)

Source : ORNL

Quels sont les principaux sources et puits de carbone ?

Sources et puits de méthane (CH4)



Le méthane se distingue du CO2 :

- Son principal puits est l'atmosphère, par oxydation
- Durée de vie courte (~10 ans contre plusieurs siècles)
- GES 80 fois plus puissant que le CO2 (par unité émise) sur 20 ans

Source : Sanuois et al. (2020)

Accord de Paris : traité international juridiquement contraignant visant à maintenir le réchauffement nettement en dessous de 2 °C



- **Contributions déterminées au niveau national (CDN) :** chaque pays doit soumettre et rehausser progressivement son propre plan de réduction des émissions tous les cinq ans.

- **Transparence et redevabilité :** les Parties suivent et déclarent leurs progrès vers leurs CDN selon des modalités normalisées et un examen international.

- Un **bilan mondial** périodique, au cours duquel les pays évaluent les progrès collectifs vers des objectifs comme limiter la hausse de la température mondiale nettement en dessous de 2 °C.

Quelles méthodes traditionnelles utilise-t-on pour la comptabilité carbone ?

1

Données d'activité

Qu'a-t-on fait ? Combustible brûlé, effectifs de bétail, terres défrichées

2

Facteurs d'émission

Combien de GES par unité d'activité ? Facteurs par défaut du GIEC ou propres au secteur

3

Autodéclaration

Les entités soumettent leurs inventaires aux régulateurs ou à des normes volontaires (GHG Protocol)

4

Vérification et audit

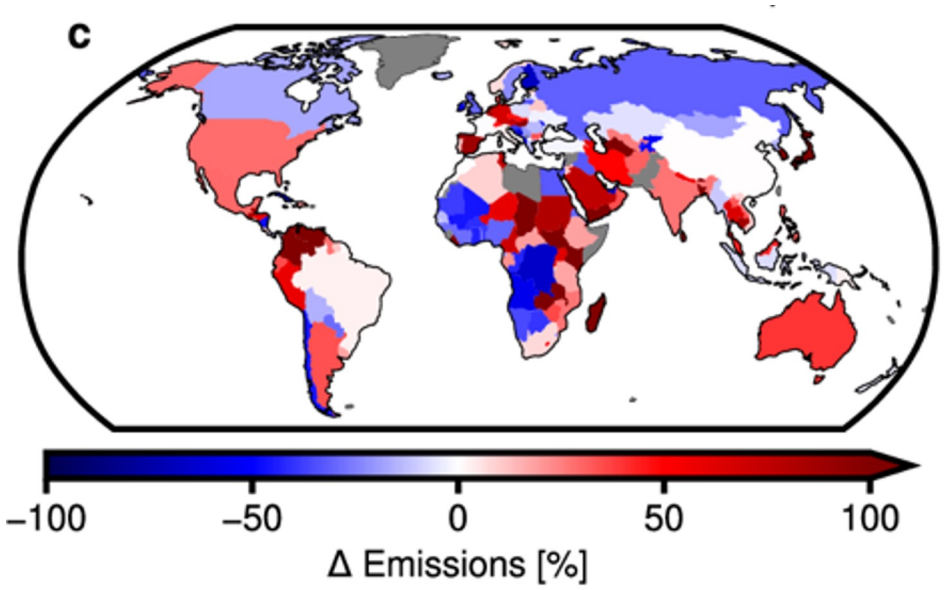
Contrôles par des tiers ; vérifications ponctuelles ; validation croisée par satellite

Où cela peut-il se compliquer ?

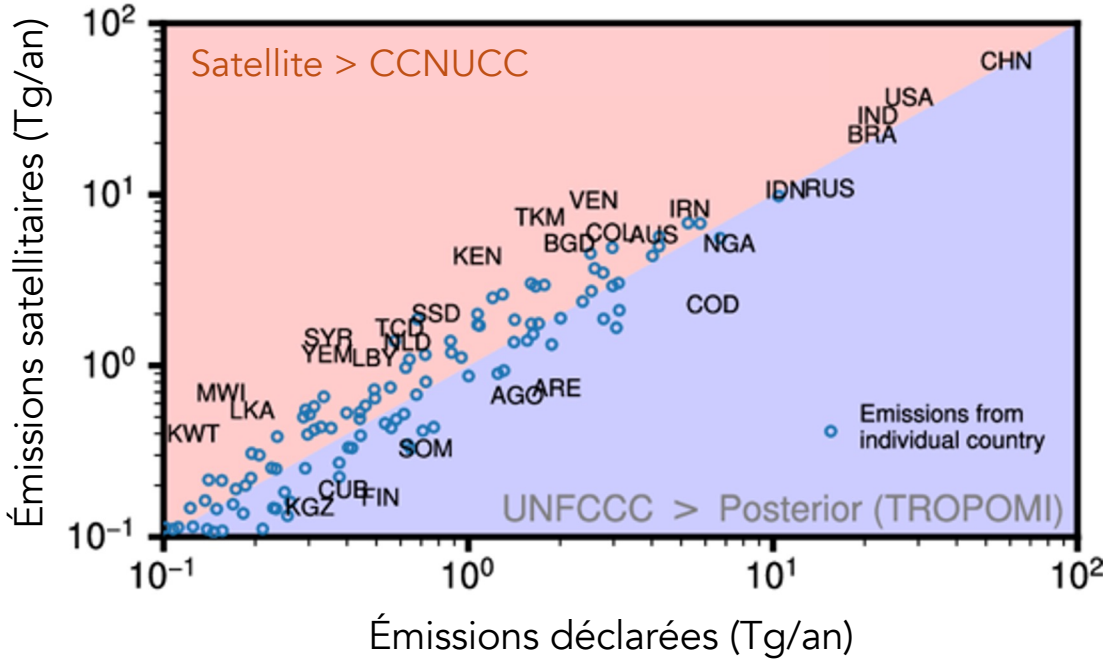
- Les données autodéclarées peuvent être biaisées par des incitations
- Les facteurs d'émission peuvent ne pas refléter les conditions locales
- La vérification est coûteuse en ressources et souvent incomplète.

Exemple : étude satellitaire « descendante » comparée aux déclarations de CH4 au GIEC/à la CCNUCC

Écart relatif entre satellite et déclarations à la CCNUCC



Satellite et déclarations à la CCNUCC



Source : East et al. (2025)

Questions à la classe

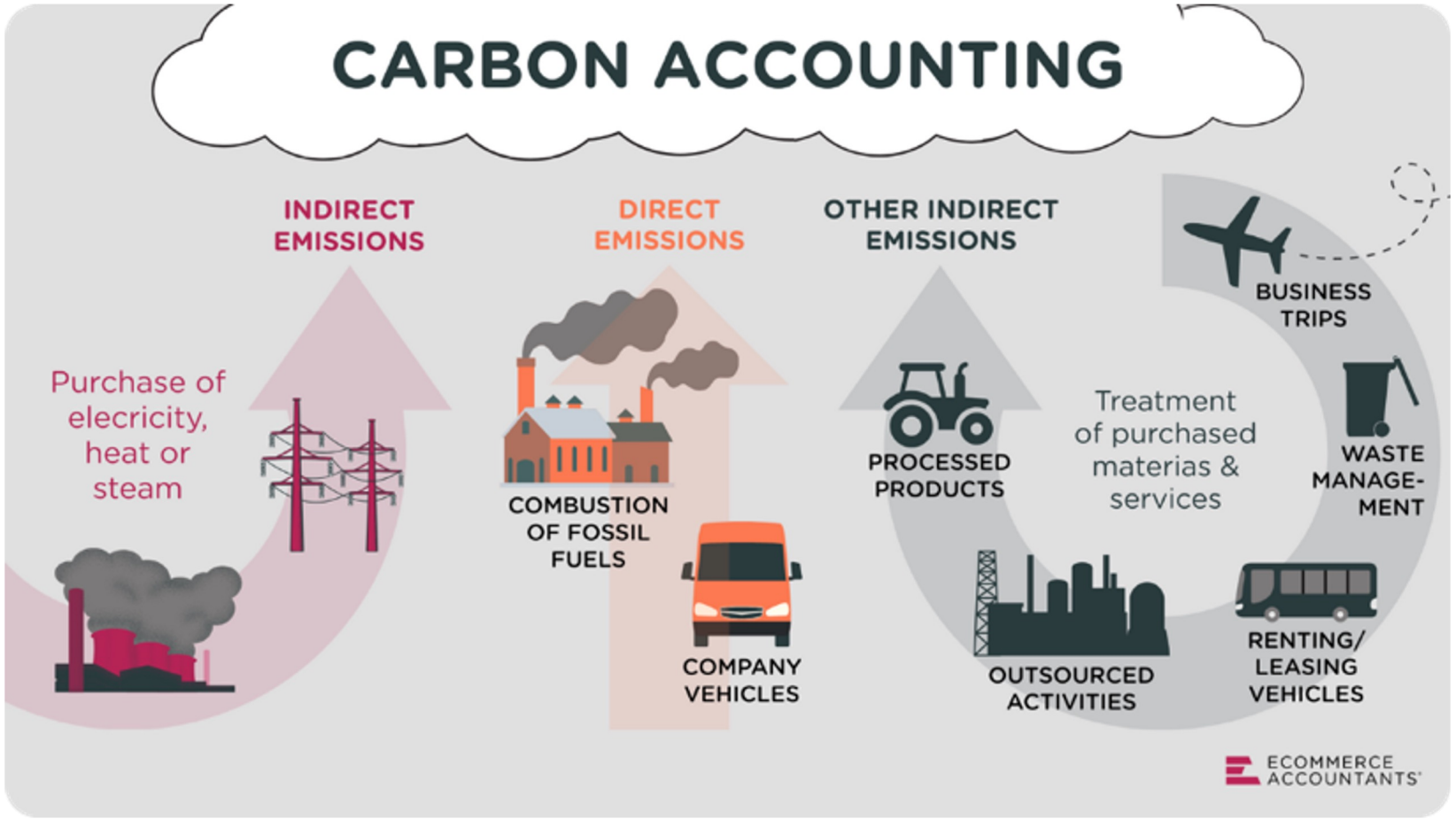
- Nous allons approfondir dans un instant les méthodes « descendantes » (fondées sur des mesures atmosphériques) de comptabilité carbone. Mais d'après ce que vous savez et avez vu des mesures descendantes et ascendantes

    - Sondage en direct : à laquelle êtes-vous plus enclin à faire confiance ? Pourquoi ?
        - Votez : à quoi faites-vous le plus confiance, à l'approche descendante ou ascendante ?

    - Comment instaurer la confiance dans une méthode, ou dans les deux ?

    - À partir de quand est-ce « suffisamment bon » ?

Aperçu rapide d'autres usages de la comptabilité carbone : la comptabilité carbone des entreprises



Comptabilité :

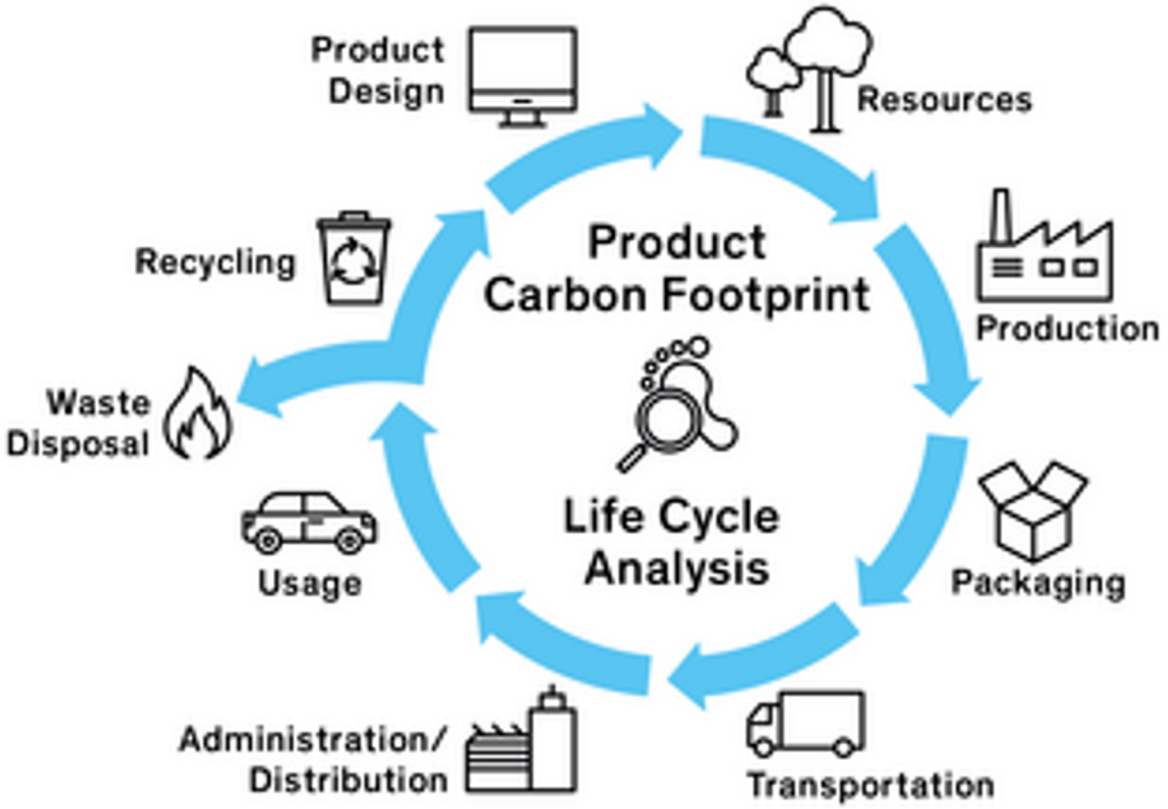
- Quantification de toutes les sources d'émissions, directes et indirectes

Marchés :

- Achat de crédits ou de quotas d'émission si/quand les émissions sont excédentaires :
  - Plafonnement et échange (conformité) : achat d'émissions « excédentaires » à une entité faiblement émettrice
  - Crédits carbone (volontaires) : achat de crédits issus de projets vérifiés qui éliminent ou atténuent des émissions

Source : ecommerceaccountants.co.uk

Analyse du cycle de vie : décomposer le carbone de chaque produit ou procédé



Suit généralement des procédures normalisées (p. ex. ISO 14040 et 14044) pour comptabiliser tous les matériaux, l'énergie et l'eau utilisés pour un produit/procédé

Applications potentielles de l'IA :

- Extraction automatisée des données
- Modélisation prédictive (p. ex. si les données fournisseurs manquent)
- Modélisation prédictive des gains carbone possibles si certaines parties du procédé sont modifiées
- Extension à tous les produits/procédés d'un portefeuille (et pas seulement aux produits phares)

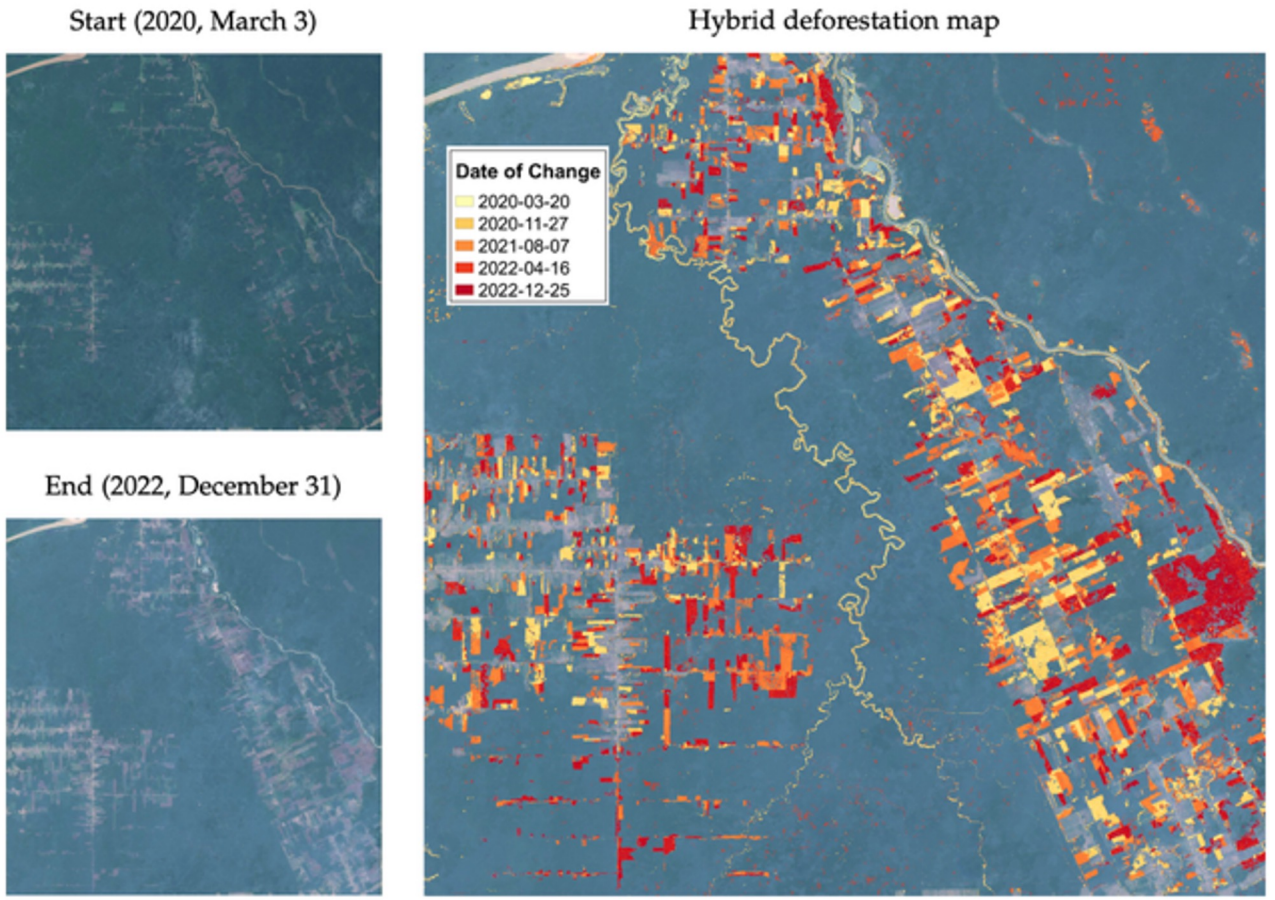
Source : myclimate.org

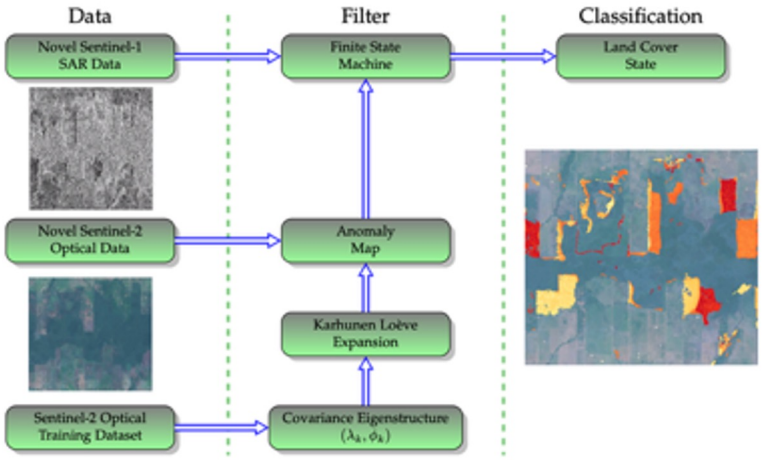
Partie 2 Télédétection et comptabilité carbone

Retour à la quantification des émissions : le rôle de la télédétection satellitaire

Données d'activité : utiliser l'imagerie à haute résolution (visible, infrarouge, radar) pour identifier les équipements, les procédés et les changements

Exemple : combiner le visible (RVB) et le radar à synthèse d'ouverture (SAR) pour suivre la déforestation



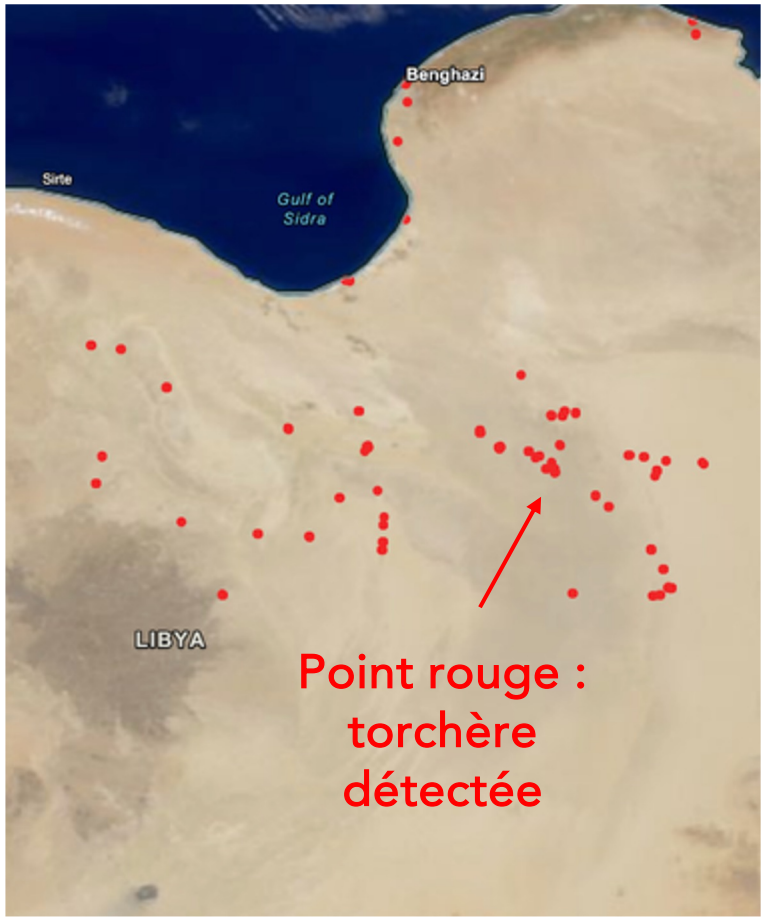


Source : Castrillon-Candas et al. 2026: https://arxiv.org/pdf/2510.14092´

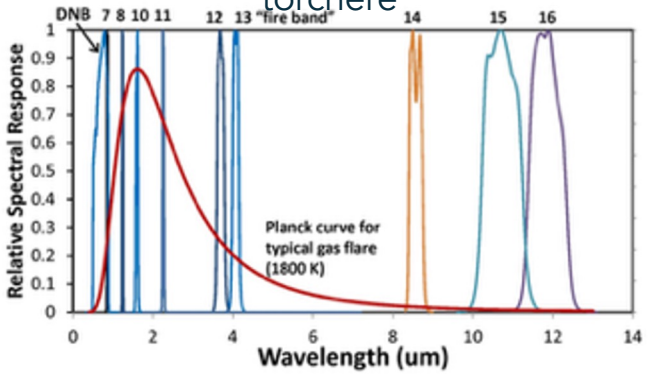
Retour à la quantification des émissions : le rôle de la télédétection satellitaire

Données d'activité : détection de la combustion thermique dans les secteurs naturels et anthropiques

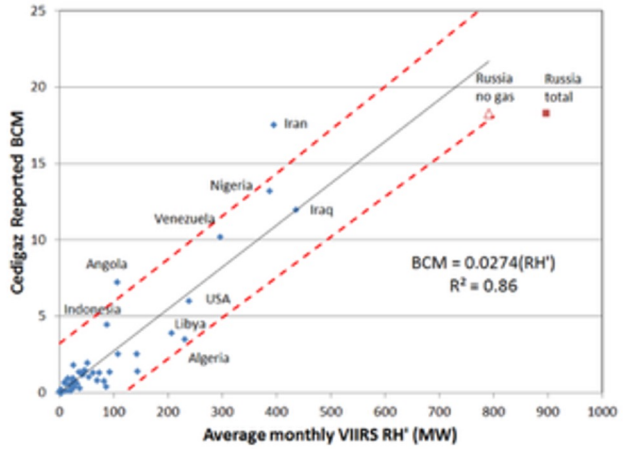
Torchage du gaz (satellite VIIRS)



Ajuster une courbe de Planck au spectre observé pour estimer la chaleur de la torchère



Relier la signature thermique au volume de gaz brûlé

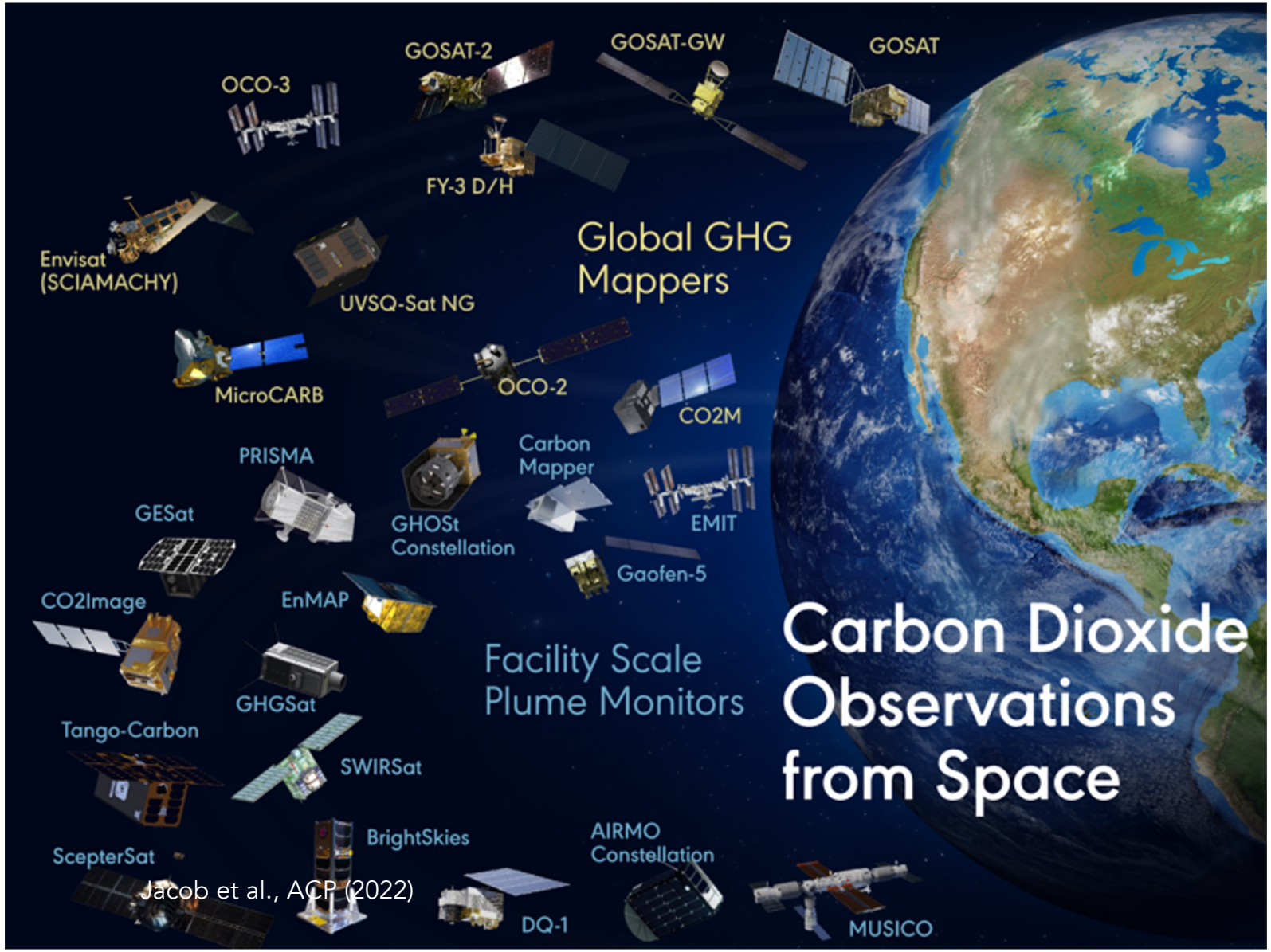


Source : Elvidge et al. (2016), NASA Worldview

Incendies (satellite VIIRS)



Retour à la quantification des émissions : le rôle de la télédétection satellitaire



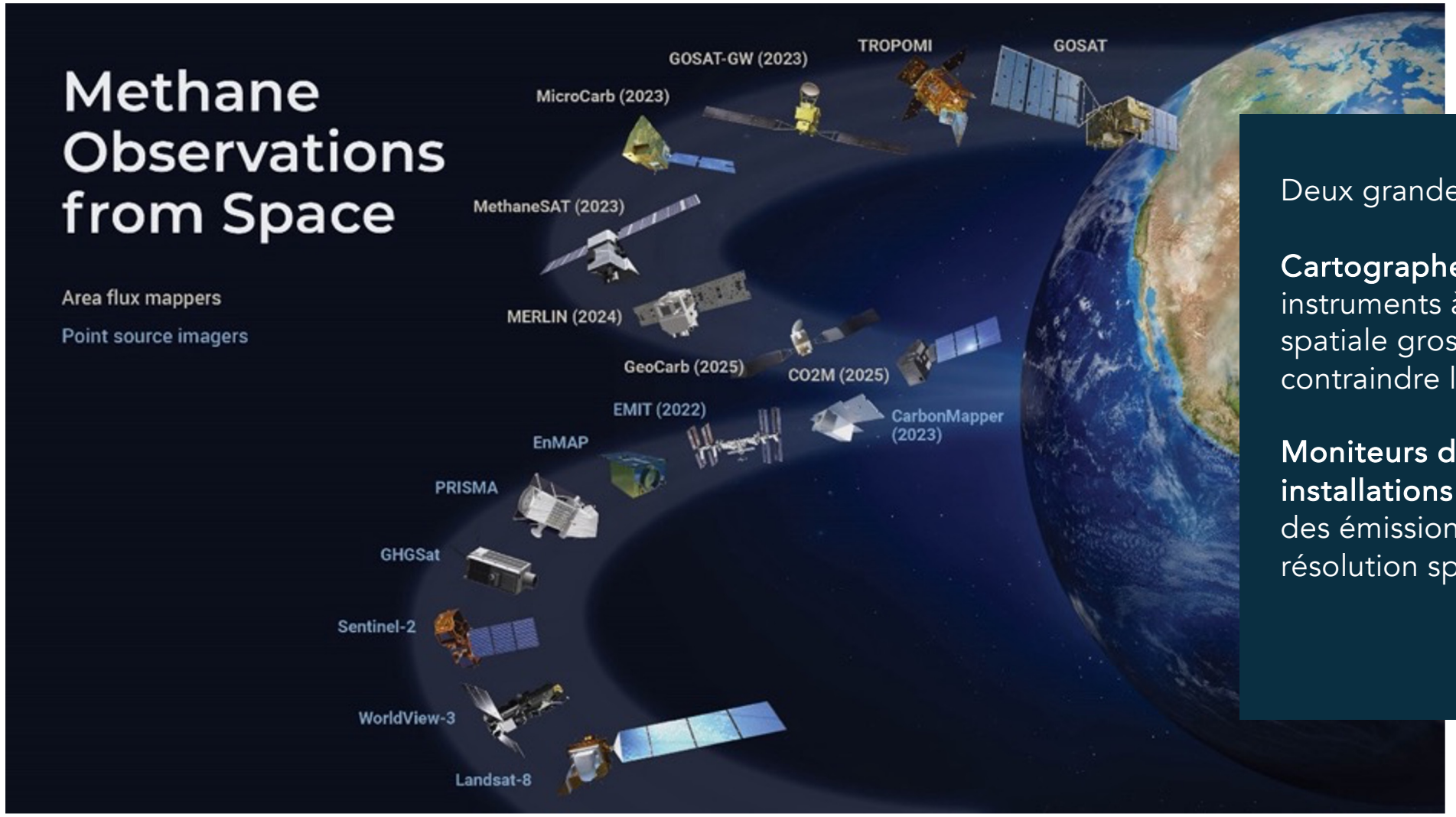
Jacob et al., ACP (2022)

Deux grandes catégories :

Cartographes mondiaux des GES : instruments à large fauchée et à résolution spatiale grossière, conçus pour contraindre le flux net régional à mondial.

Moniteurs de panaches à l'échelle des installations : détection et quantification des émissions des super-émetteurs à fine résolution spatiale

Retour à la quantification des émissions : le rôle de la télédétection satellitaire



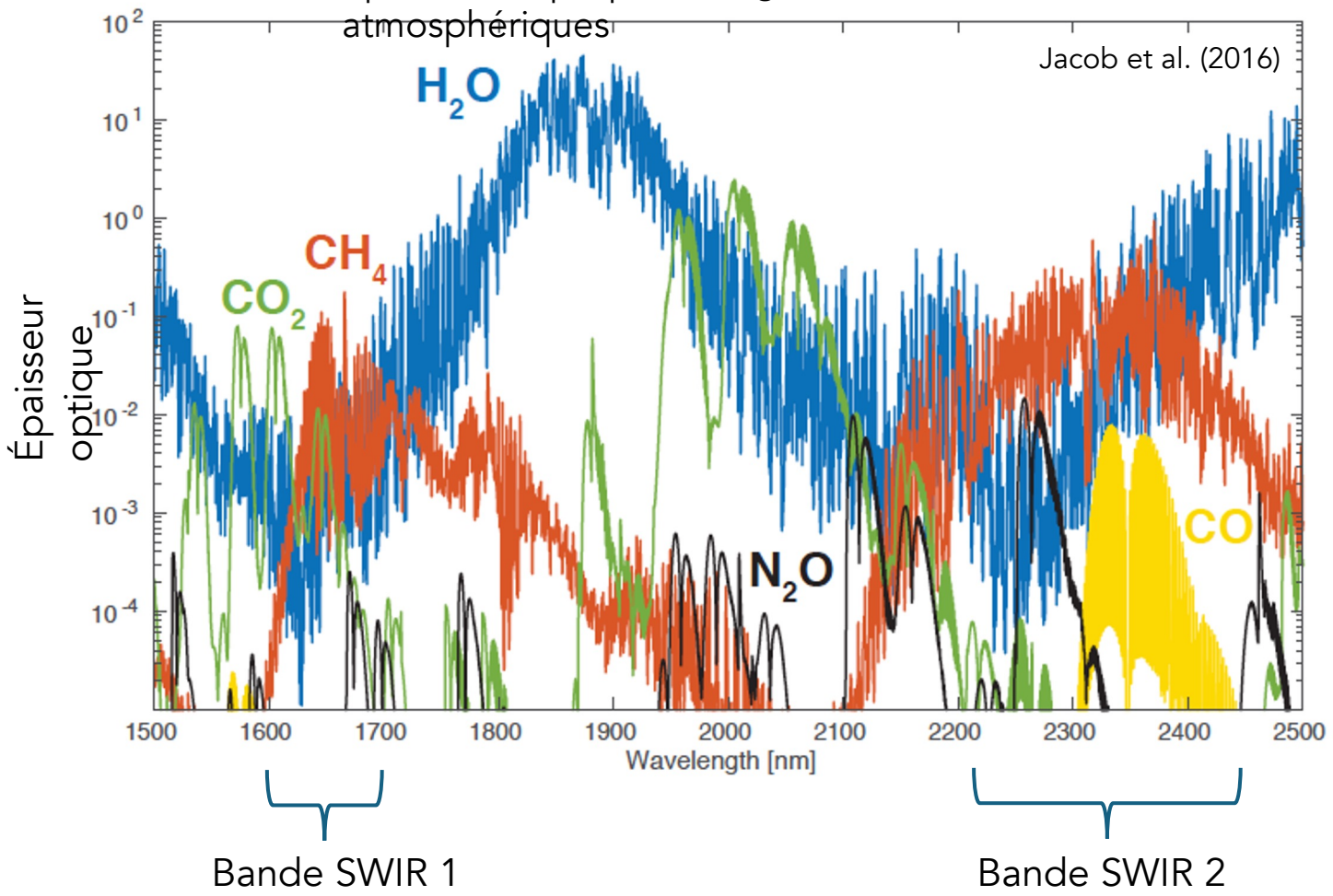
Deux grandes catégories :

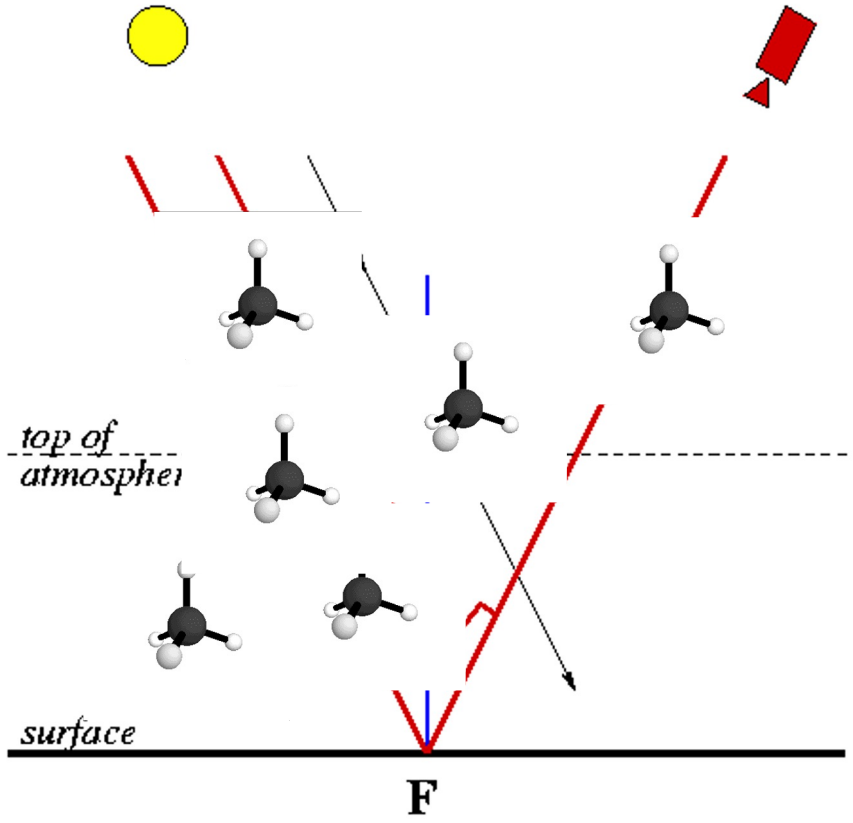
Cartographes mondiaux des GES : instruments à large fauchée et à résolution spatiale grossière, conçus pour contraindre le flux net régional à mondial.

Moniteurs de panaches à l'échelle des installations : détection et quantification des émissions des super-émetteurs à fine résolution spatiale

La télédétection du CH4 repose sur l'observation de la luminance à proximité des bandes d'absorption rovibrationnelles du CH4.

Épaisseurs optiques des gaz traces atmosphériques





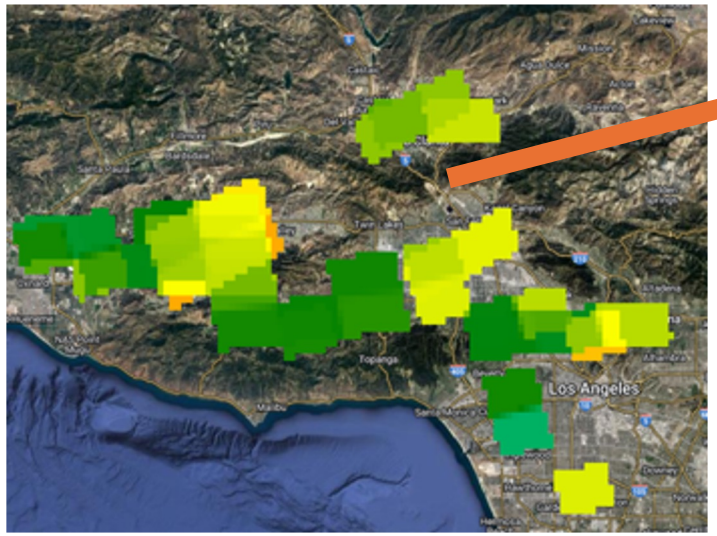
Transmittance atmosphérique :

$$T = \frac{\Phi_e^t}{\Phi_e^i} = e^{-\tau} = 10^{-A}$$

Épaisseur optique (dépend de l'absorption des gaz)

La distinction entre cartographe mondial des GES et moniteur à l'échelle des installations découle du compromis entre résolution spatiale et résolution spectrale.

TROPOMI sur Los Angeles/Aliso Canyon (15/09/2020)

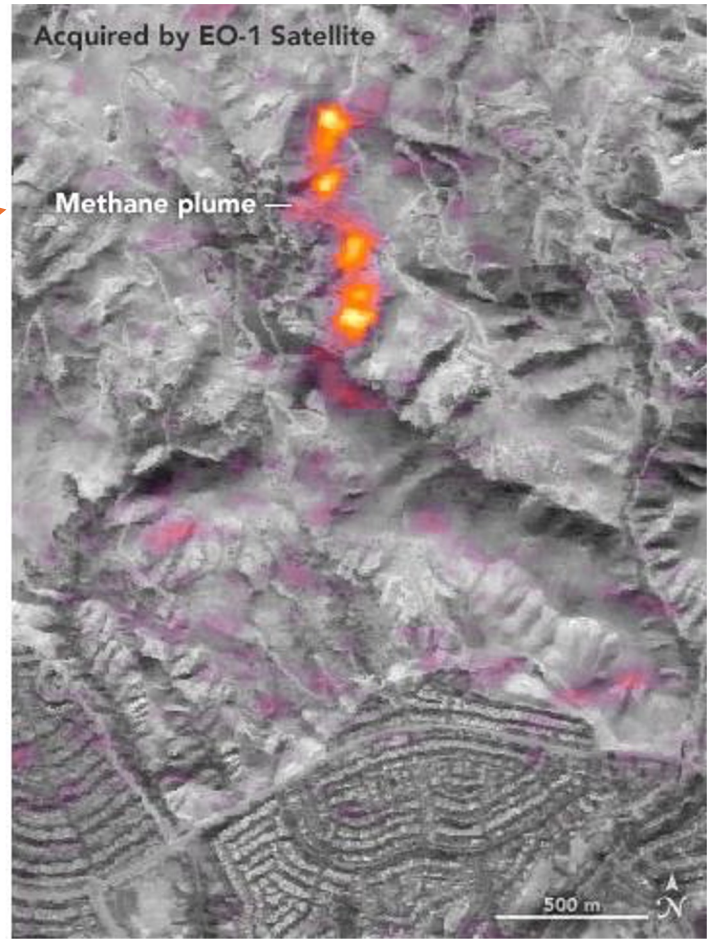


Google Earth Engine





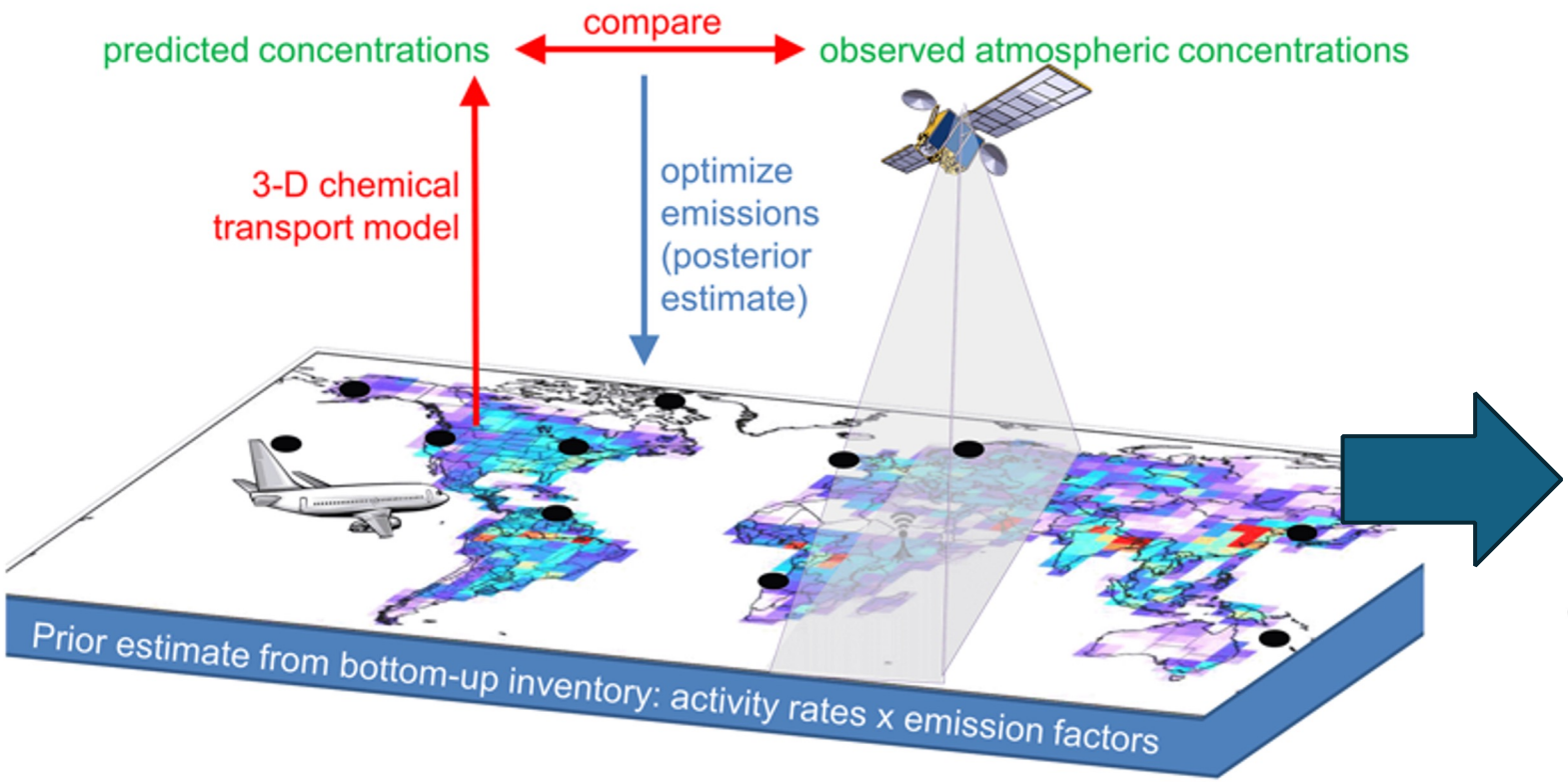
Instrument Hyperion d'EO-1 : éruption d'Aliso Canyon (2016)

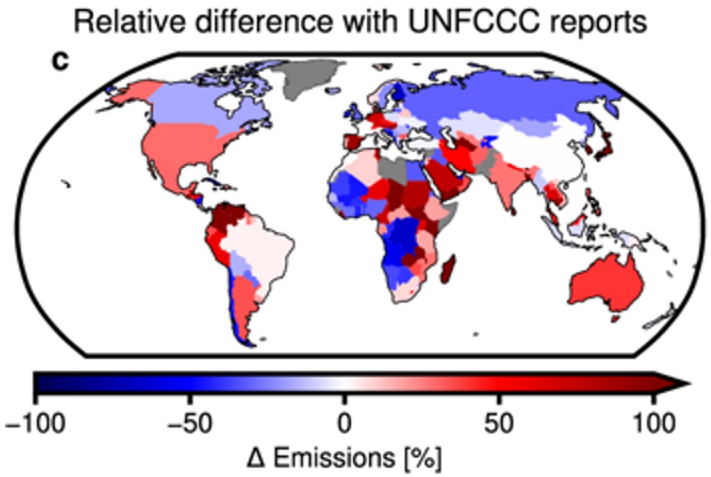


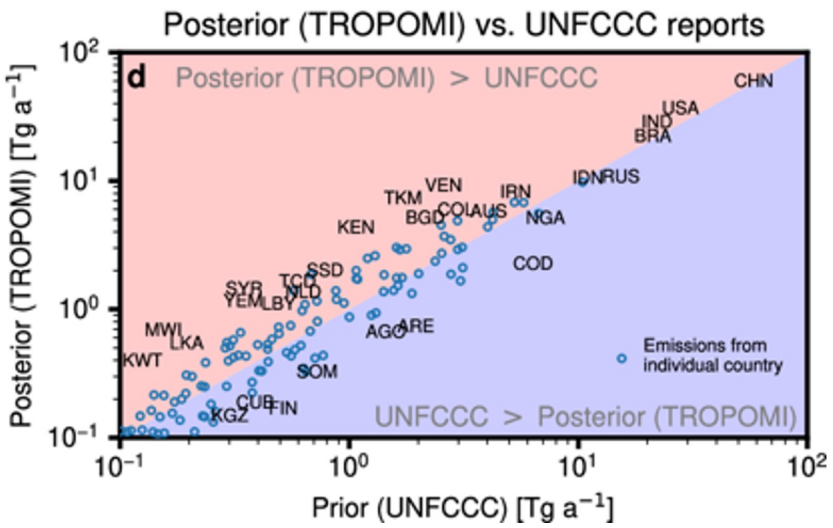
Thompson et al., GRL (2016)

Résolution spectrale plus grossière -> résolution spatiale plus fine. Capacité à distinguer les gros panaches à l'échelle des installations.

Les satellites de cartographie mondiale des GES estiment les émissions régionales en « inversant » les concentrations atmosphériques observées pour obtenir les flux d'émission





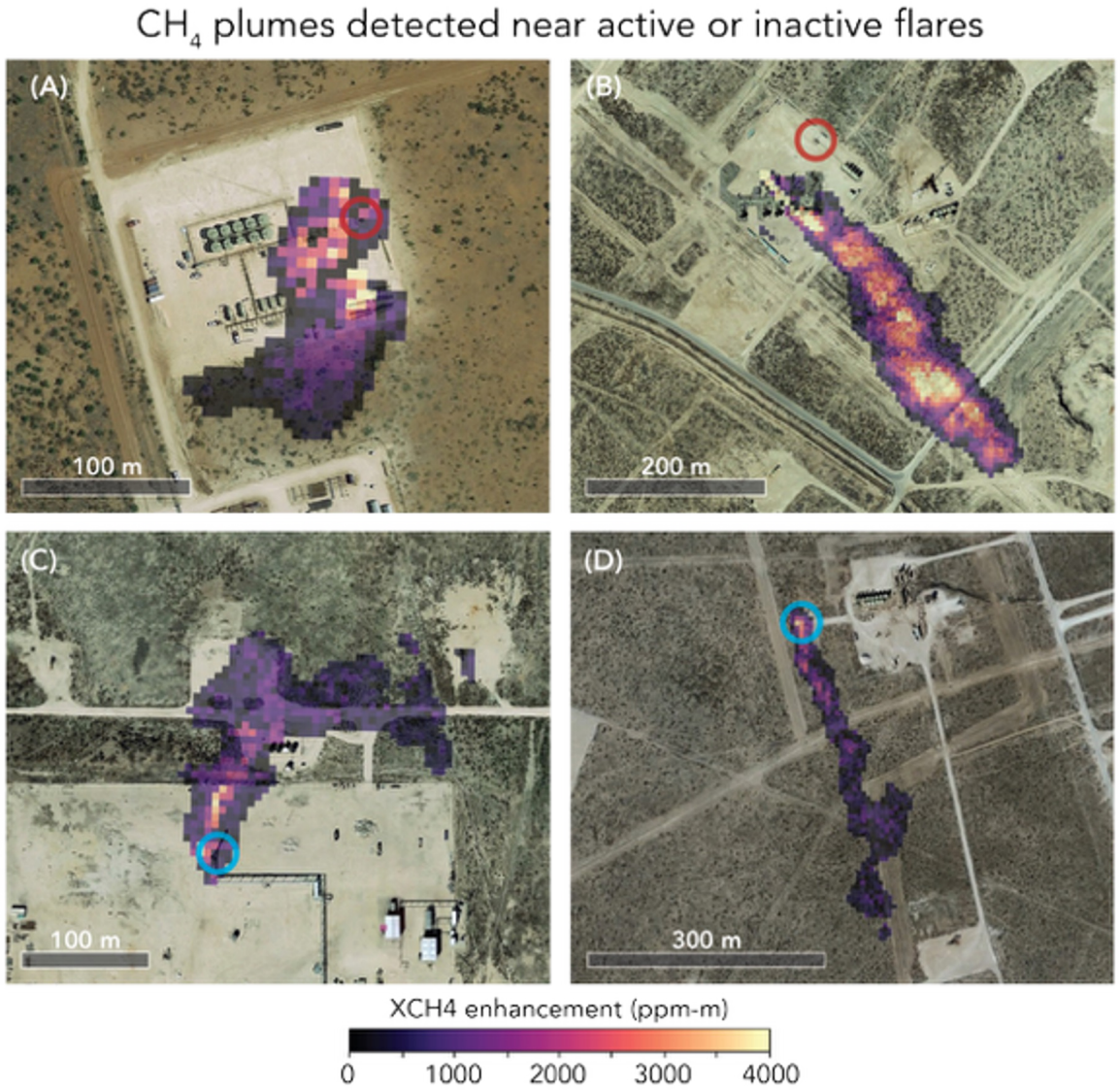


$$\hat{\mathbf{x}} = \arg\min \left\{ \|\boldsymbol{y} - \mathbf{H}\boldsymbol{x}\|_{S_o} + \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_A\|_{S_A} \right\}$$

Ici, **x** représente les émissions, **y** les concentrations et **H** un modèle de transport.

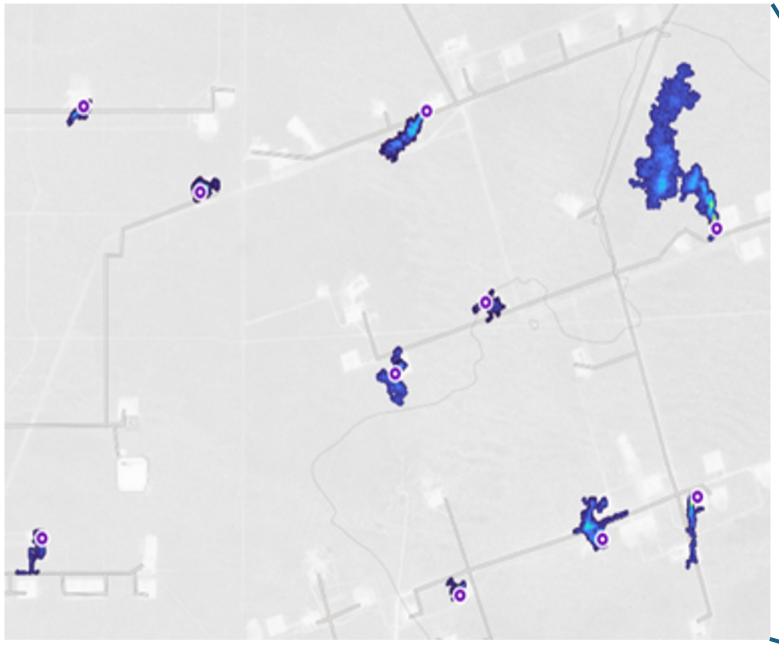
Worden et al., ACP (2022); East et al. (2025)

Les satellites à l'échelle des installations ne voient qu'une fraction des sources d'émission, mais permettent l'attribution à l'installation

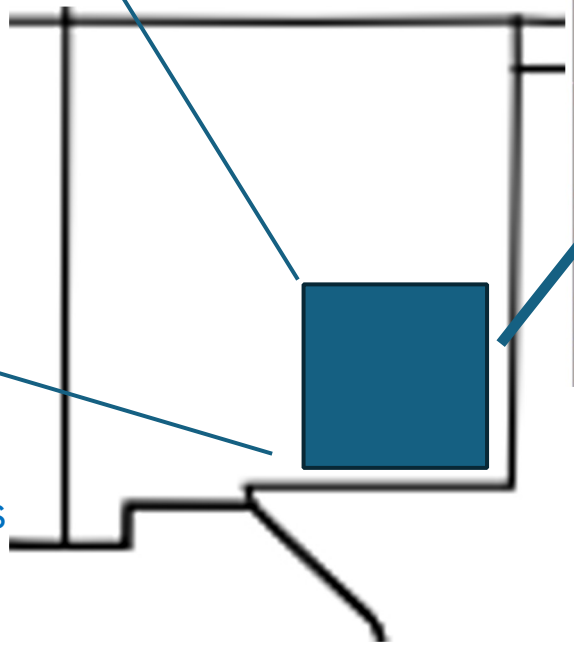


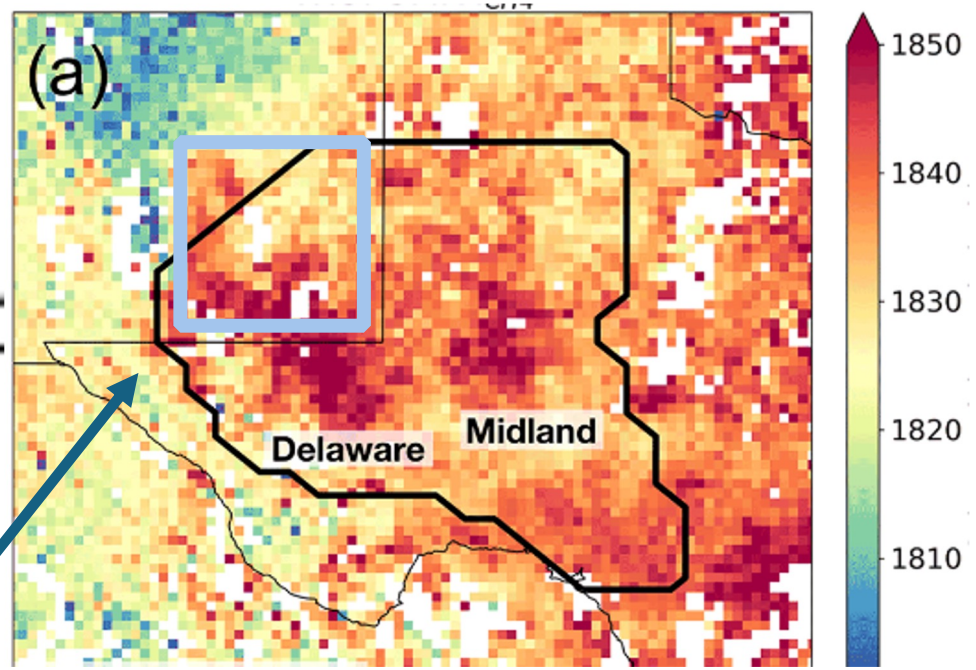
Comprendre les émissions à l'échelle des bassins :
flux total, super-émetteurs, jeux de données attribués

Étude aéroportée + satellitaire de 2024 dans le Permien du Nouveau-Mexique



Cartographie aérienne intégrale de toutes les infrastructures du Permien du Nouveau-Mexique : plus de 200 000 sites visités en 3 semaines

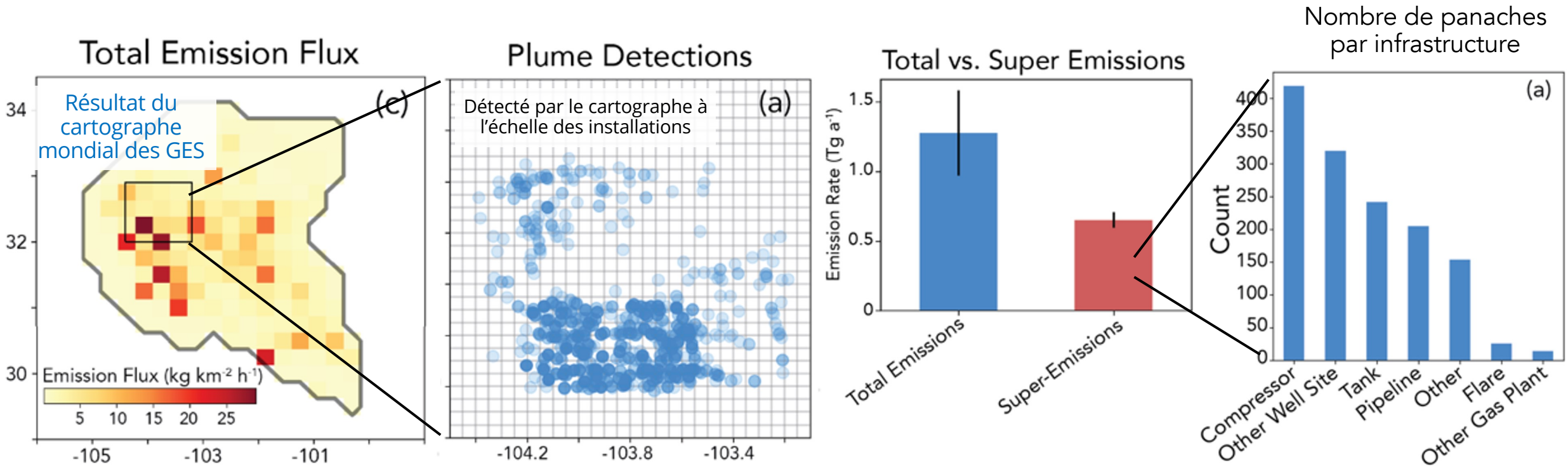




Estimation du flux du bassin à partir des observations du satellite TROPOMI

Comprendre les émissions à l'échelle des bassins :
flux total, super-émetteurs, jeux de données attribués

Étude aéroportée + satellitaire de 2024 dans le Permien du Nouveau-Mexique

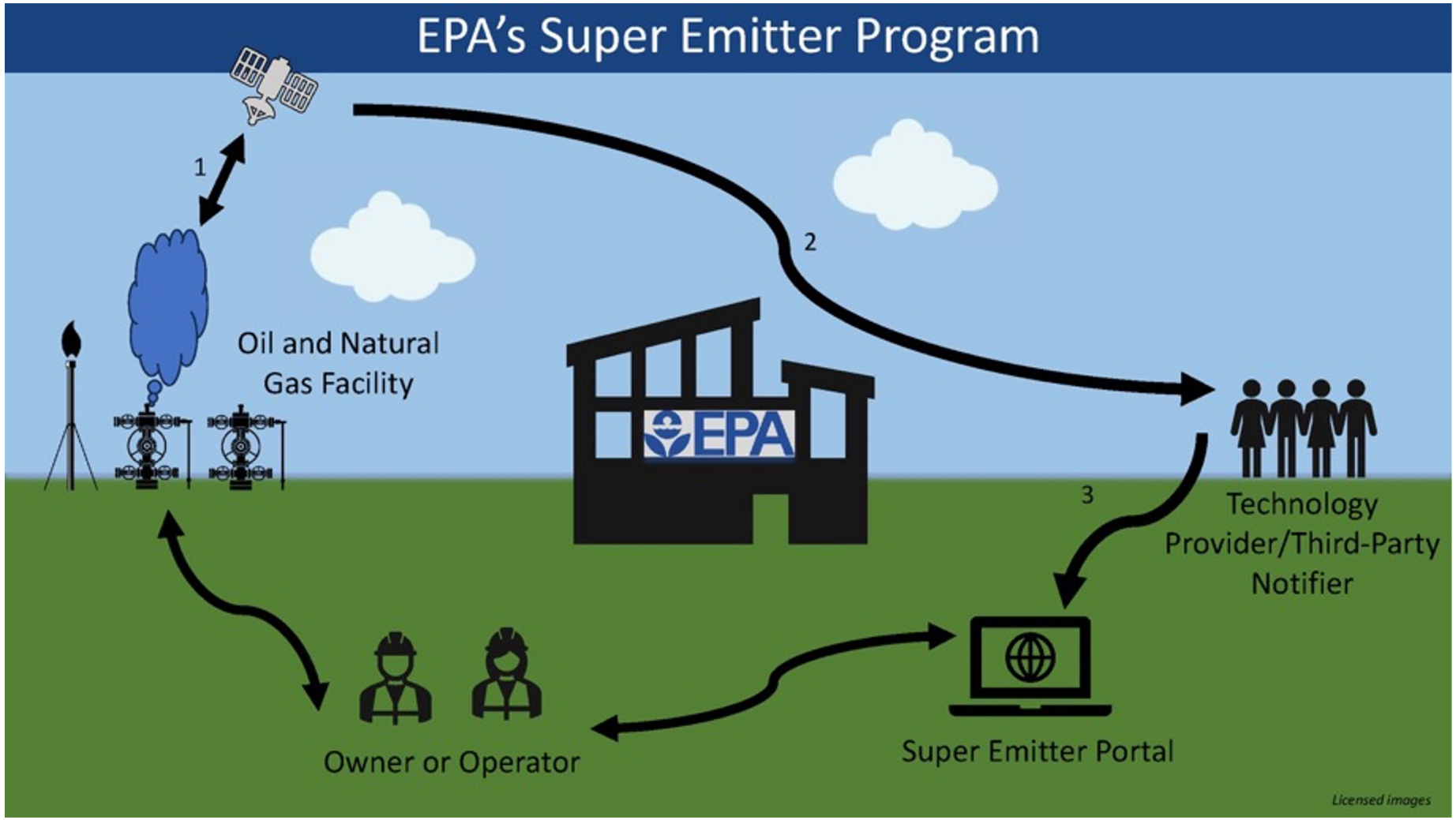


Cusworth et al. (en cours d'évaluation)

Intensité + infrastructures + attribution aux exploitants : une voie vers l'atténuation

Cusworth et al. (2026)

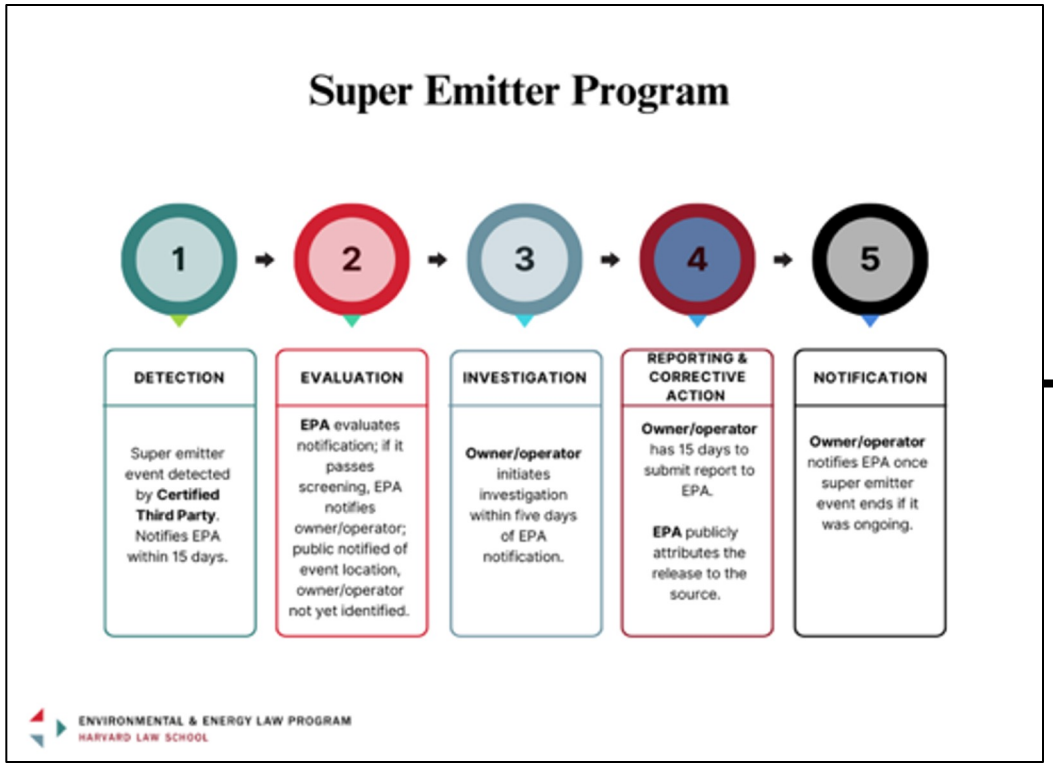
Retour aux programmes de déclaration :



Nouvelle règle aux États-Unis : les détections satellitaires de super-émetteurs par des tiers peuvent être signalées à l'EPA (par des déclarants agréés), ce qui impose une réponse des exploitants

Source : epa.gov

Toute détection de super-émetteur devait ensuite être déclarée par les exploitants dans le programme obligatoire de déclaration (Greenhouse Gas Reporting Program)



Chaque année : l'exploitant doit déclarer toute émission > 100 kg/h quelle que soit sa durée

Chaque année : les exploitants paient la redevance sur les émissions de déchets au-delà de 1 000 tCH4/an

EPA GHGRP (sous-partie W)*
émissions totales de méthane
pour toute exploitation dépassant 1 000 tCH4/an

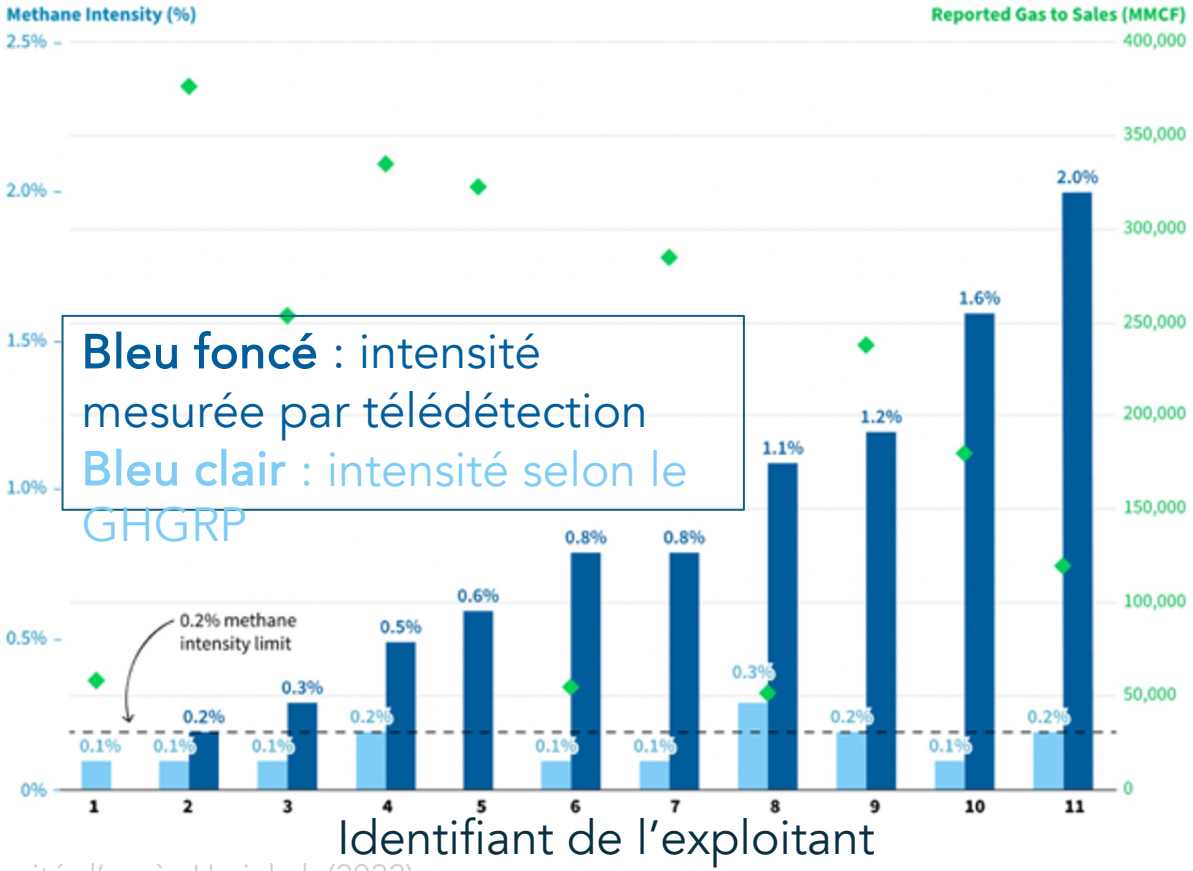
Programme de réduction des émissions de méthane de l'IRA (MERP)*

Autres mesures empiriques du méthane (hors super-émetteurs) et/ou estimations ascendantes

Autres déclarations de détection unique de super-émetteurs (p. ex. contrôles LDAR des exploitants)

L'Inflation Reduction Act (IRA) prévoit que toute émission de gaspillage donne lieu à une redevance (Waste Emissions Charge, WEC), calculée à partir des déclarations au GHGRP.

Intensité observée par exploitant lors de campagnes aéroportées, comparée aux protocoles actuels du GHGRP



Bleu foncé : intensité mesurée par télédétection
Bleu clair : intensité selon le GHGRP

Intensité d'après Hmiel al. (2022)

Analyse prudente de la sous-déclaration par le RMI

Waste emissions charge difference: Super-emitter observations vs. reported emissions for the Permian Basin in 2020

Operator	**Reported to EPA:** Tax payments at $900/ton	**Aerial measurements:** Tax payments at $900/ton	**Cumulative difference** between tax payments
1	$0	$0	$0
2	$0	$0	$0
3	$0	$5,000,000	$5,000,000
4	$300,000	$16,000,000	$21,000,000
5	$0	$25,000,000	$45,000,000
6	$0	$6,000,000	$51,000,000
7	$0	$30,000,000	$81,000,000
8	$800,000	$8,000,000	$89,000,000
9	$0	$41,000,000	$130,000,000
10	$0	$42,000,000	$172,000,000
11	$900,000	$37,000,000	$208,000,000

Enjeu pour l'IRA : la sous-déclaration non détectée aux États-Unis pourrait représenter plus de 800 M$/an de redevance non payée

Pause

Discussion

Comment pourrions-nous/devrions-nous ancrer les résultats descendants dans une vérité de terrain, des normes et une validation ?

Votre avis sur la fiabilité de la comptabilité descendante ou ascendante a-t-il changé ?

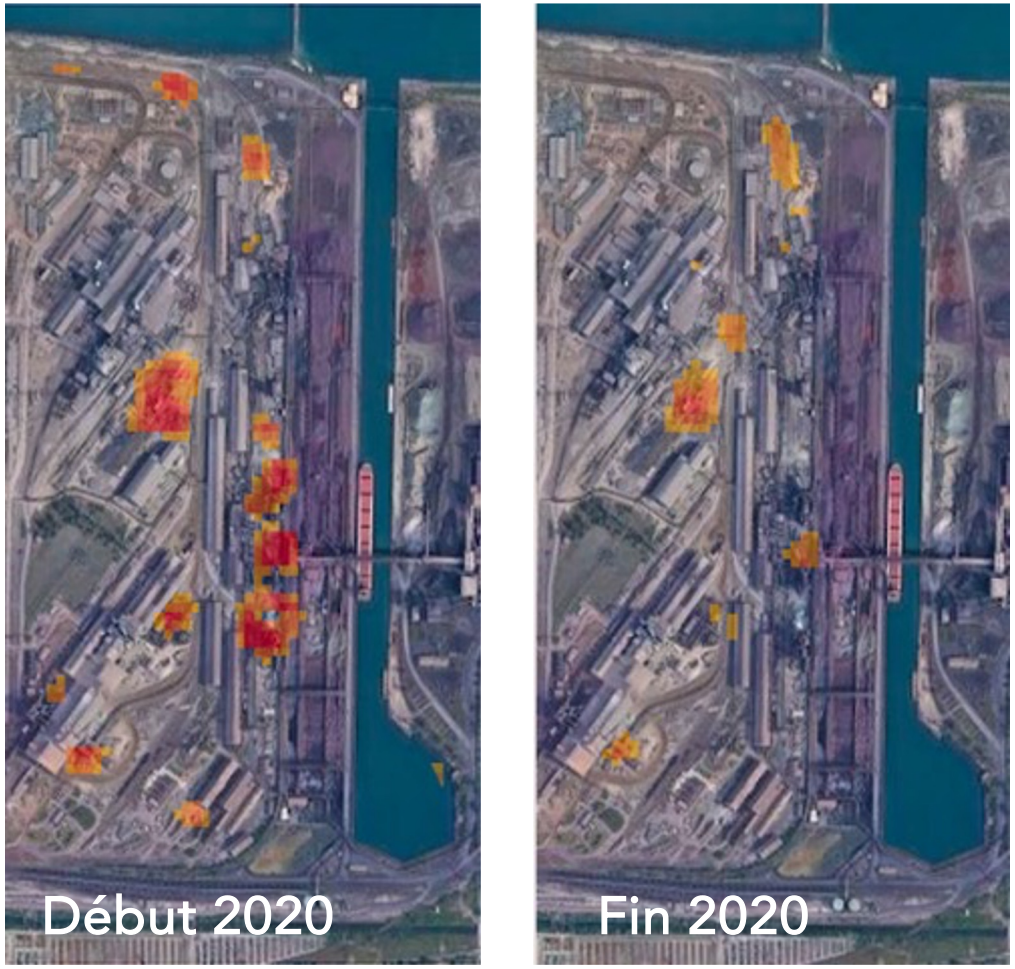
- Votez : à quoi faites-vous le plus confiance, à l'approche descendante ou ascendante ?

Quels types d'expériences suggéreriez-vous/mèneriez-vous pour renforcer la confiance dans les estimations descendantes/par télédétection ?

Partie 3 Utiliser l'IA pour améliorer la comptabilité carbone

Données d’activité : combler les lacunes de production

Exemple : aciérie Gary Works



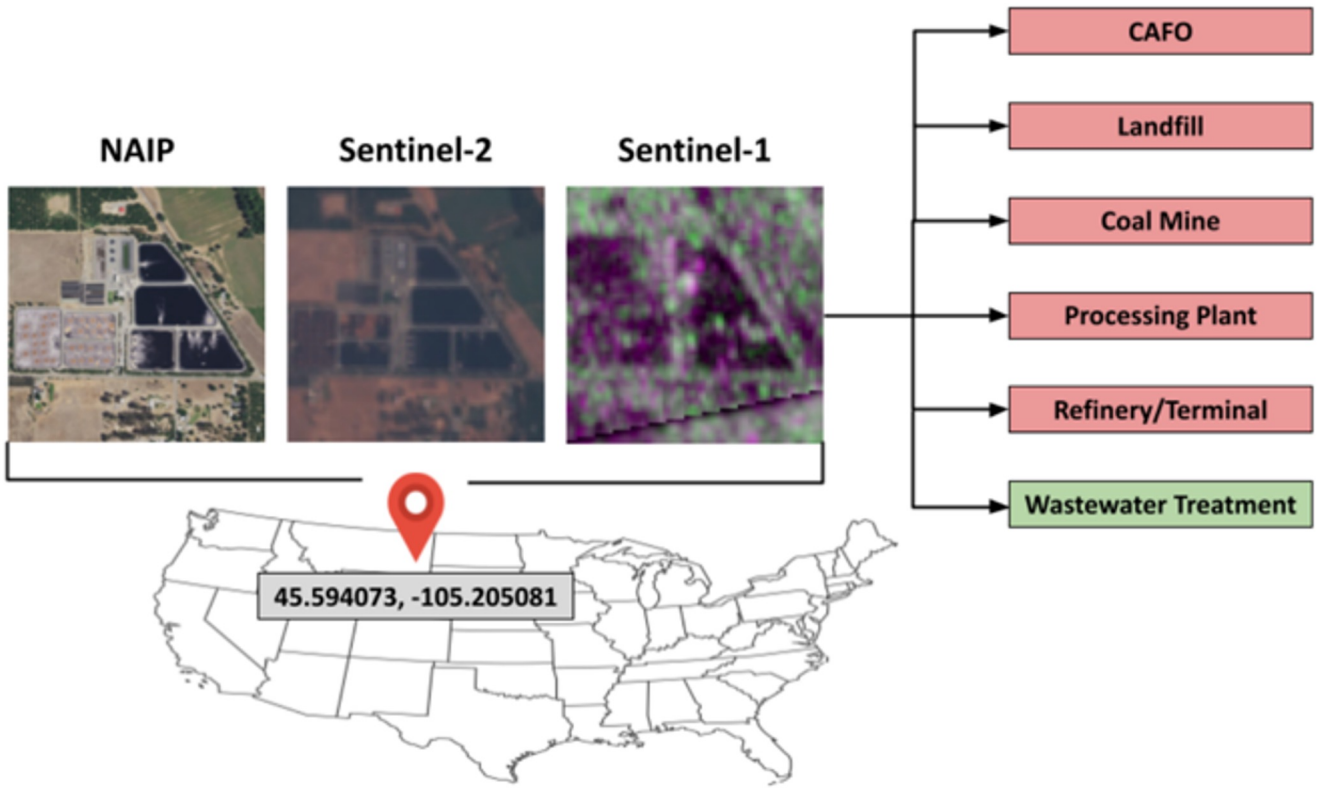
TransitionZERO

Des centaines d’aciéries dans le monde ne déclarent pas leurs émissions.

Pour créer une base d’émissions estimées : entraîner un modèle d’apprentissage automatique sur les signatures thermiques détectées dans les bandes infrarouges de Landsat-8 et Sentinel-2.

Source : TransitionZERO ; Climate TRACE

Données d'activité : détection d'objets

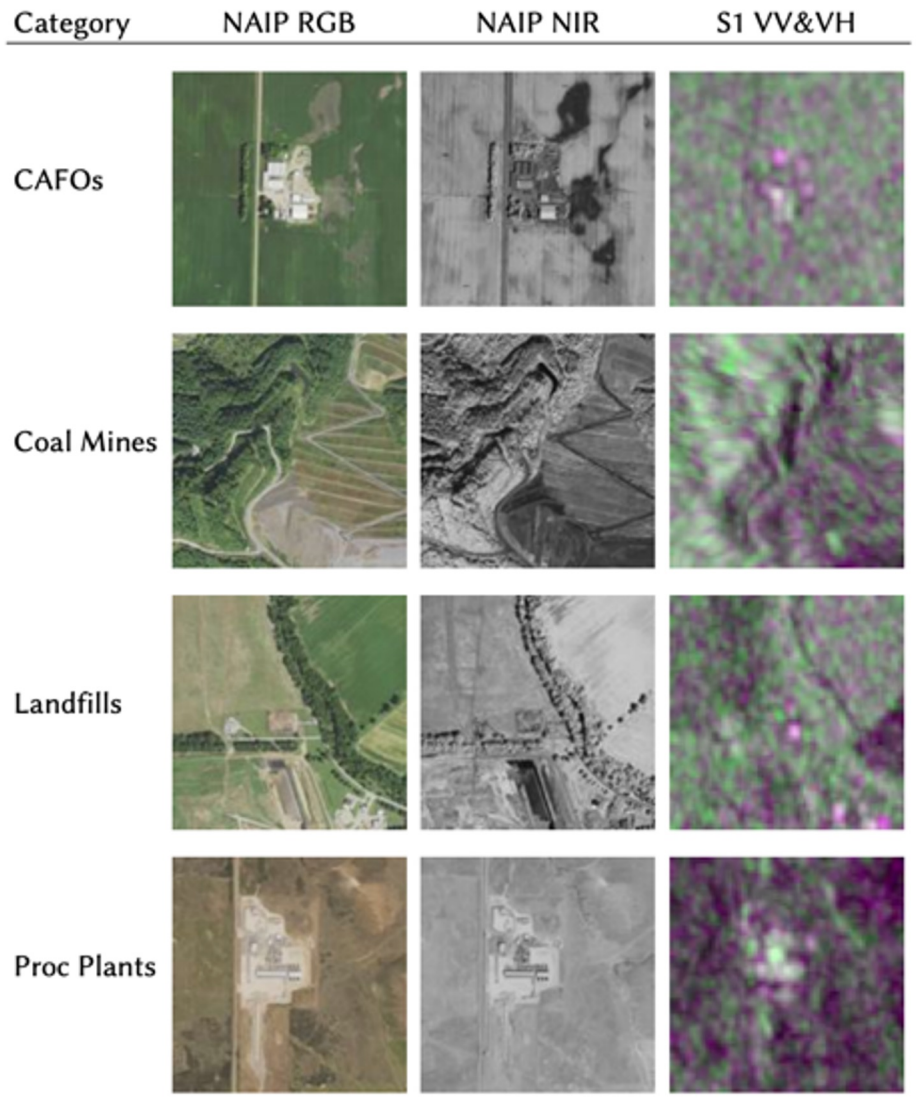


MEthane Tracking Emissions Reference (METER)

Objectif : constituer une base complète des infrastructures anthropiques émettrices de méthane à partir de diverses images satellitaires.

Source : METER-ML

Données d'activité : détection d'objets



Pour créer les étiquettes, les chercheurs ont collecté toutes les bases de données SIG d'infrastructures disponibles et découpé les images satellitaires en conséquence

~50 000 étiquettes/images d'entraînement

Source : METER-ML

Données d'activité : détection d'objets

Résultats de classification (AUPRC) après application de CNN aux jeux de données étiquetés

Image Product	Bands	CAFOs	Landfills	Mines	Proc Plants	R&Ts	WWTPs	Overall
S1	VH&VV	0.519	0.107	0.152	0.218	0.487	0.119	0.267
S2	RGB	0.889	0.268	0.305	0.374	0.694	0.204	0.456
S2	All	0.889	0.189	0.382	0.368	0.690	0.183	0.450
S2 & S1	All	0.923	0.152	0.379	0.391	0.612	0.231	0.448
NAIP	RGB	0.903	0.270	0.348	0.327	0.849	0.182	0.480
NAIP	All	**0.945**	**0.276**	0.401	**0.508**	**0.857**	**0.303**	**0.548**
NAIP & S2 & S1	All	0.889	0.214	**0.473**	0.457	0.796	0.272	0.517

Les données satellitaires abondent, mais les bonnes étiquettes restent rares et varient fortement selon la géographie

Validation des étiquettes : 2 experts ont examiné manuellement 1 500 étiquettes :

If the expert identified no clearly visible methane source categories in the image, the example was labeled "negative", and if the expert was uncertain about any label, the example was labeled "uncertain". The two labels per example were then resolved as follows:

1. If the experts agreed and neither was uncertain, the agreed upon label was taken as the final label.
2. If the experts disagreed, and one was uncertain but the other was not, the expert's certain label was taken as the final label.
3. If the experts disagreed, but one agreed with the original label, the original label was taken as the final label.
4. In all other scenarios, the example was reviewed jointly by the experts and a final label was assigned.

Source : METER-ML

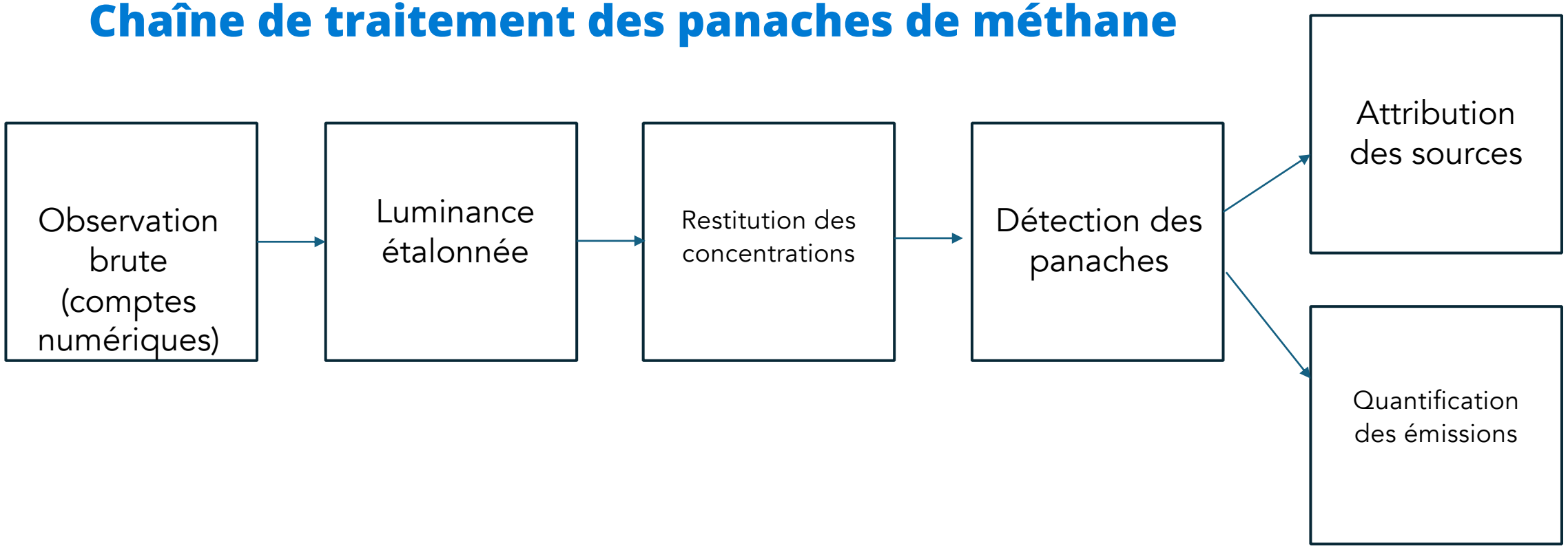
Exemple détaillé :

Chaîne de traitement des panaches de méthane

Tâche : au fil de cet exemple, réfléchissez aux façons dont l'IA peut faciliter le processus

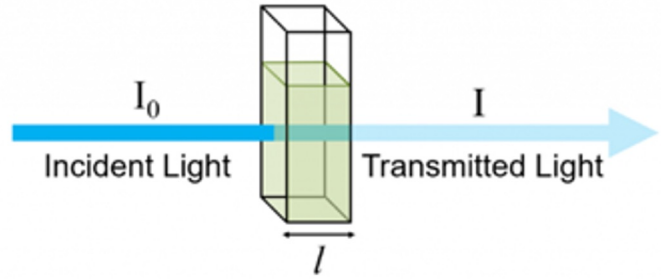
La création de produits de données sur les panaches exige plusieurs étapes de traitement.

Chaîne de traitement des panaches de méthane



Le satellite observe la luminance au sommet de l'atmosphère, à partir de laquelle les concentrations en colonne sont estimées par une restitution.

Algorithme de « filtre adapté » par colonne, fondé sur la loi de Beer-Lambert



$$x_m = x_r e^{-k\Delta c}$$

- x_m : Spectre modélisé
- x_r : Spectre de référence
- k : Absorption
- Δc : Augmentation de concentration

Développement de Taylor (cas linéarisé)

$$x_m = x_r(1 - k\Delta c)$$

Avec un estimateur du maximum de vraisemblance, l'augmentation de concentration « optimale » qui minimise les résidus entre modèle et observation (pondérés par une covariance) est :

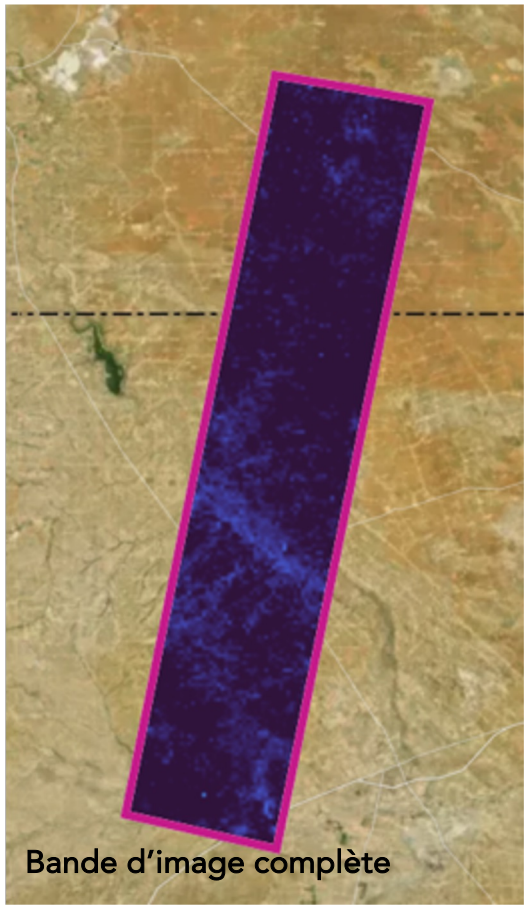
$$\Delta c = \frac{t^T \Sigma^{-1}(x_r - x_o)}{t^T \Sigma^{-1} t}$$

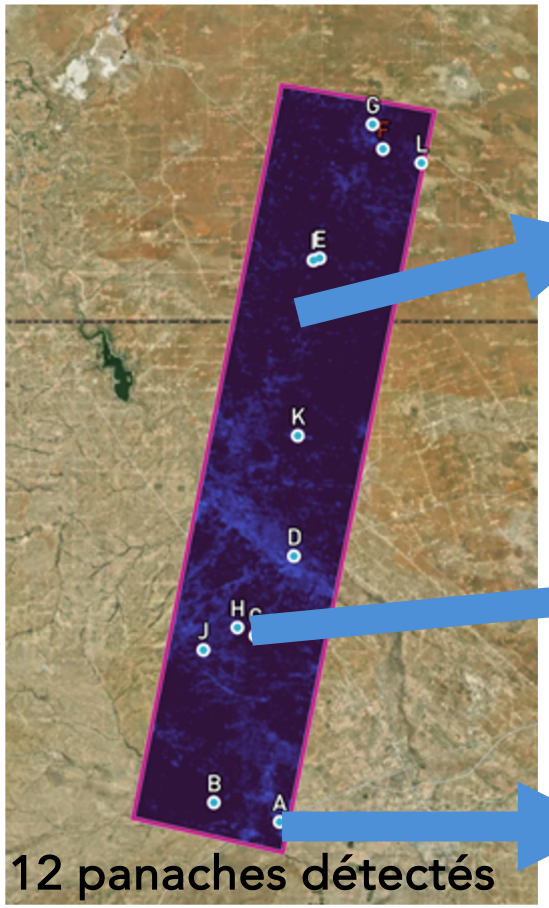
Augmentation de CH4 en colonne

We choose x_r and Σ to be the mean and covariance of a collection of pixels in the image, and t is a mapping between radiance and concentration

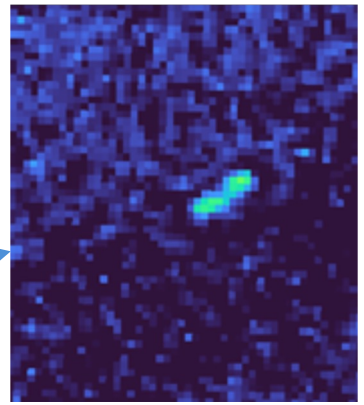
Détection des panaches : chercher une aiguille dans une botte de foin

Exemple : image de 20 x 100 km2 (satellite Tanager) prise au-dessus d'infrastructures pétrolières et gazières denses au Texas


Bande d'image complète

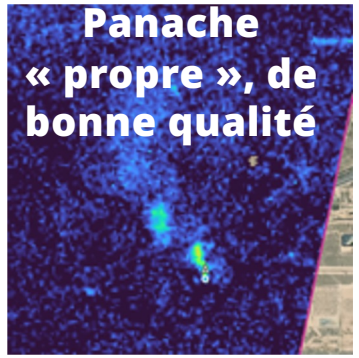


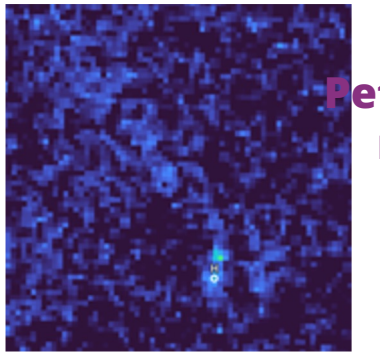
12 panaches détectés





Fausse augmentation : toits blancs

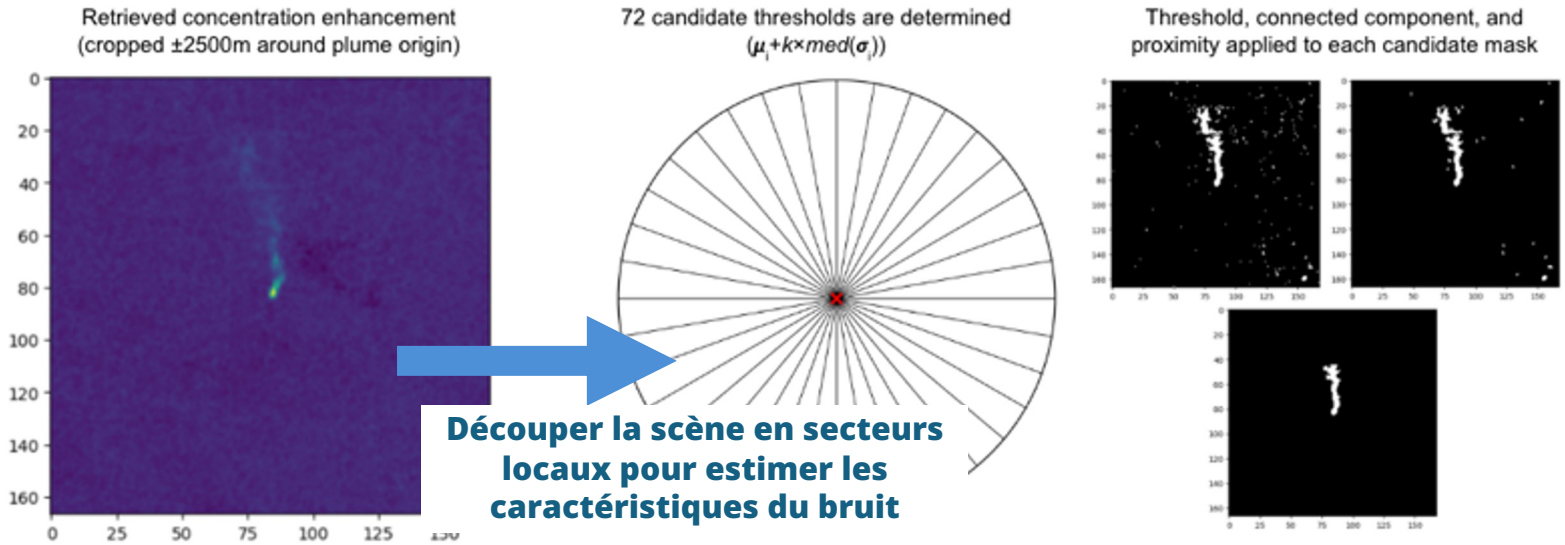

Panache « propre », de bonne qualité

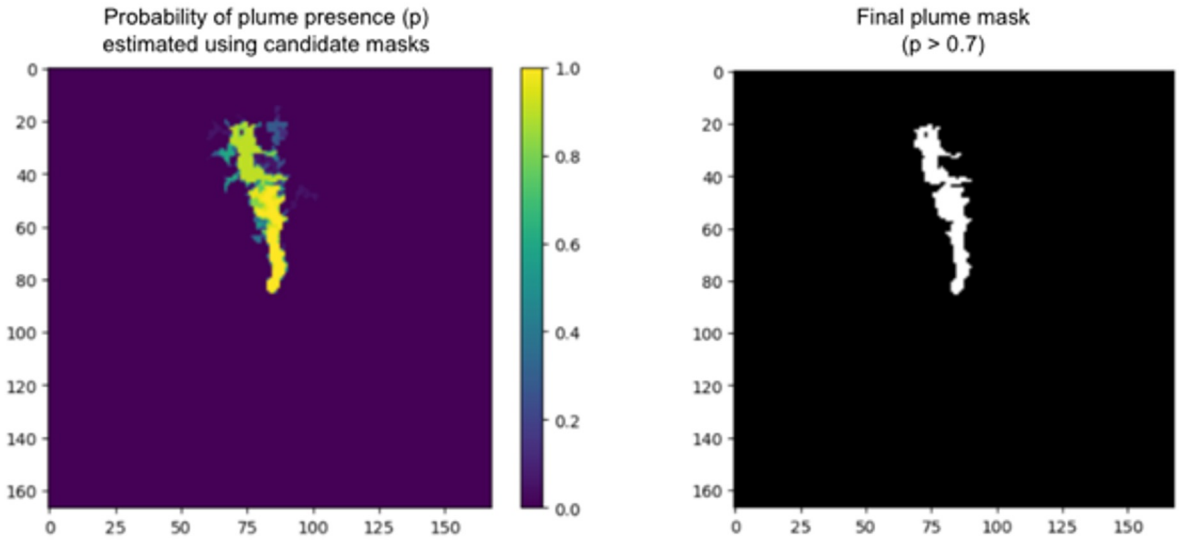


Petit panach marginal

Question : quel est le risque d'un seul faux positif (repensez au début du cours) ?

Segmenter (« masquer ») les détections de panaches

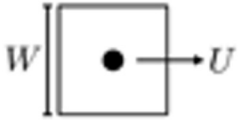
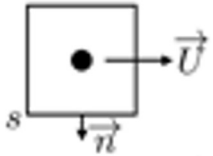
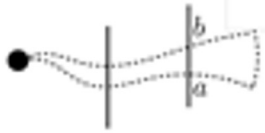
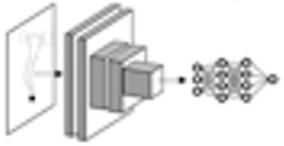




Étapes critiques vers la quantification

La segmentation définit les limites du panache, ce qui permet de quantifier sa masse et sa longueur

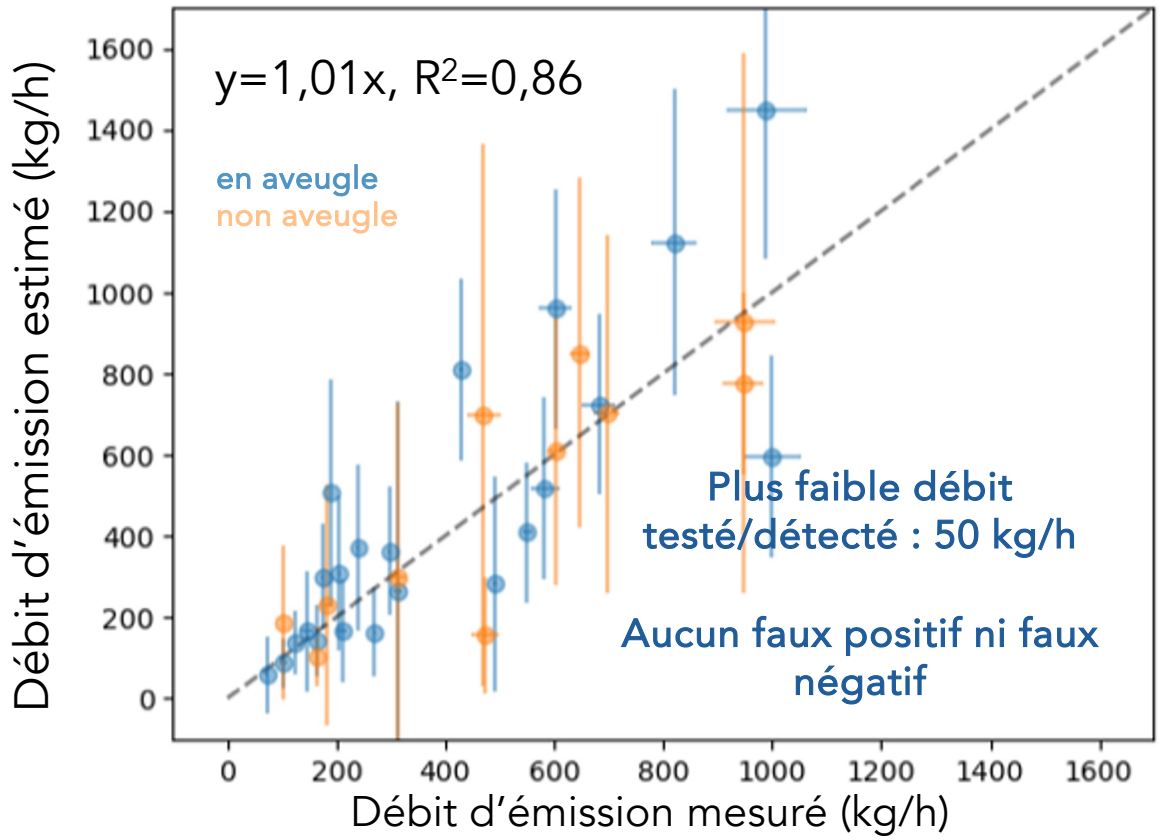
Quantifier le débit d'émission d'un panache

Gaussian Plume		$Q = U\Delta\Omega(x,y)\left(\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)e^{\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}}\right)$
Local mass balance		$Q = UW\Delta\Omega$
Gauss theorem		$Q = \oint_s \Omega(s)\vec{U}\cdot\vec{n}\,ds$
Cross-sectional flux (CSF)		$Q = U\int_a^b \Delta\Omega(x,y)dy$
Integrated mass enhancement (IME)		$Q = \frac{U_{\text{eff}}\ \text{IME}}{L}$
Angular width		$Q = f(\text{IME},\theta)$
Machine learning		$Q = \text{CNN}(\text{Plume image})$

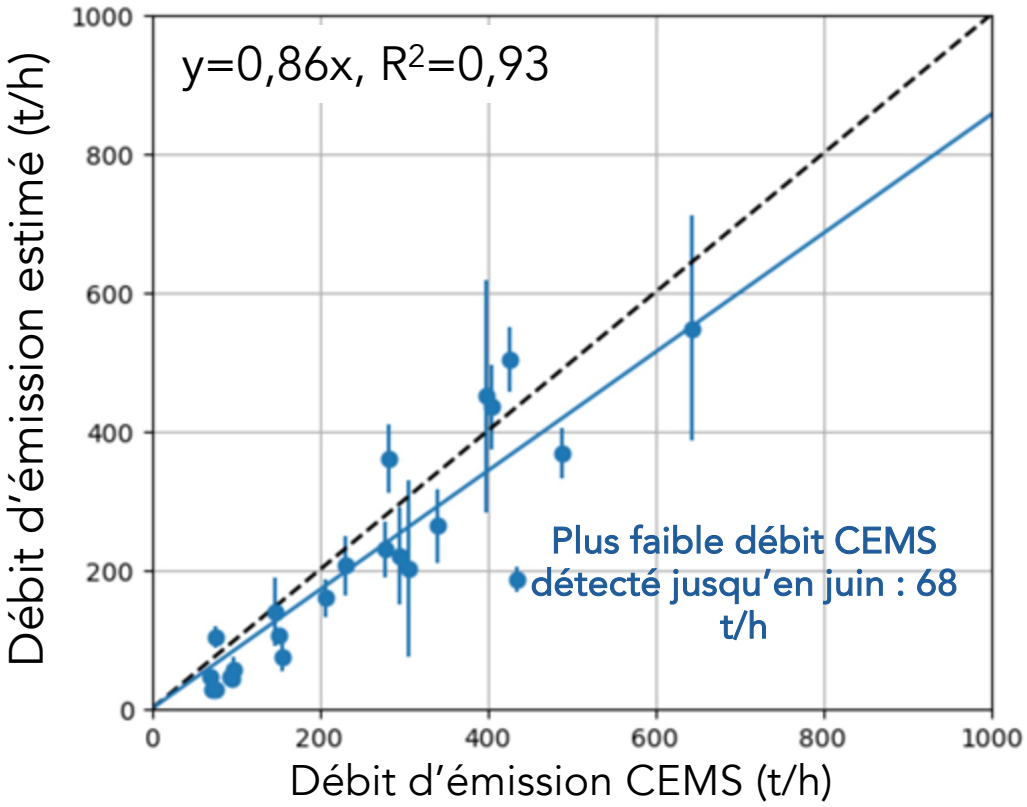
Approches les plus courantes

Des expériences de rejet contrôlé permettent d'évaluer le biais et l'incertitude des méthodes de quantification

Rejets contrôlés de CH4 pour Tanager (Stanford ; Casa Grande, Arizona)



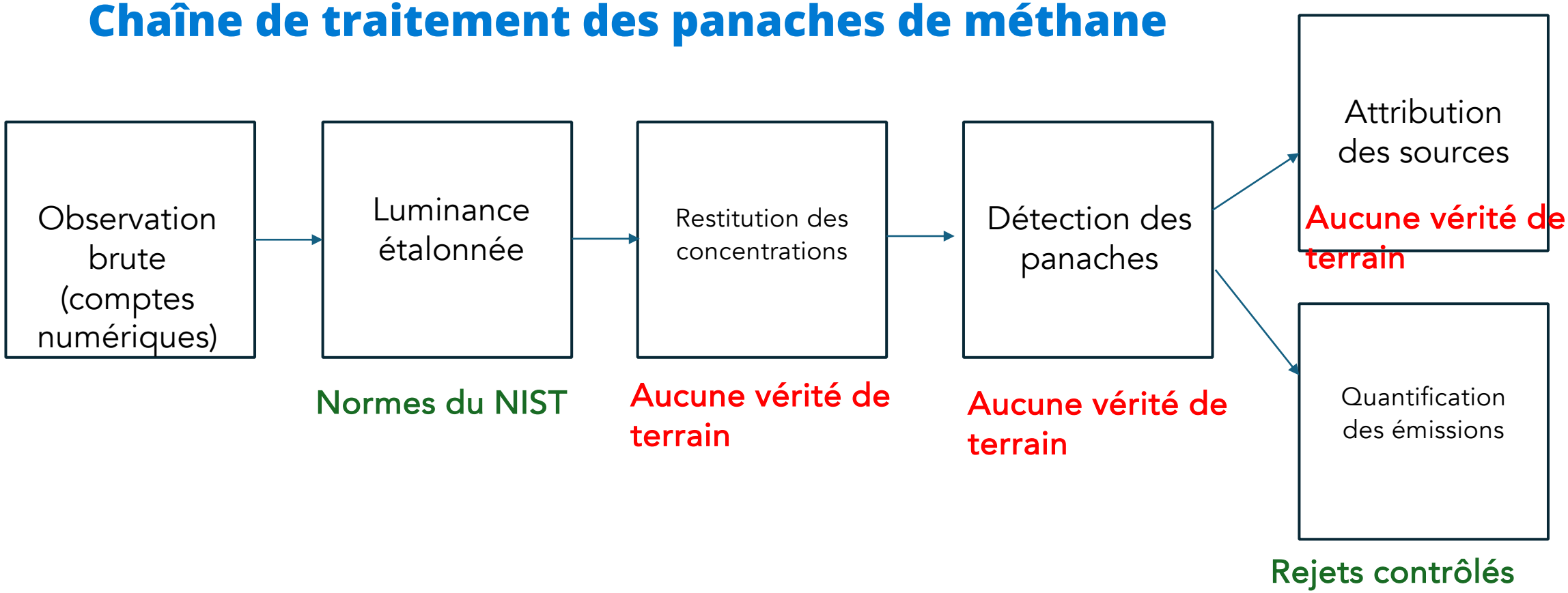
Satellite Tanager et systèmes de surveillance continue des émissions de CO2 (CEMS, US EPA, répartis sur le territoire)



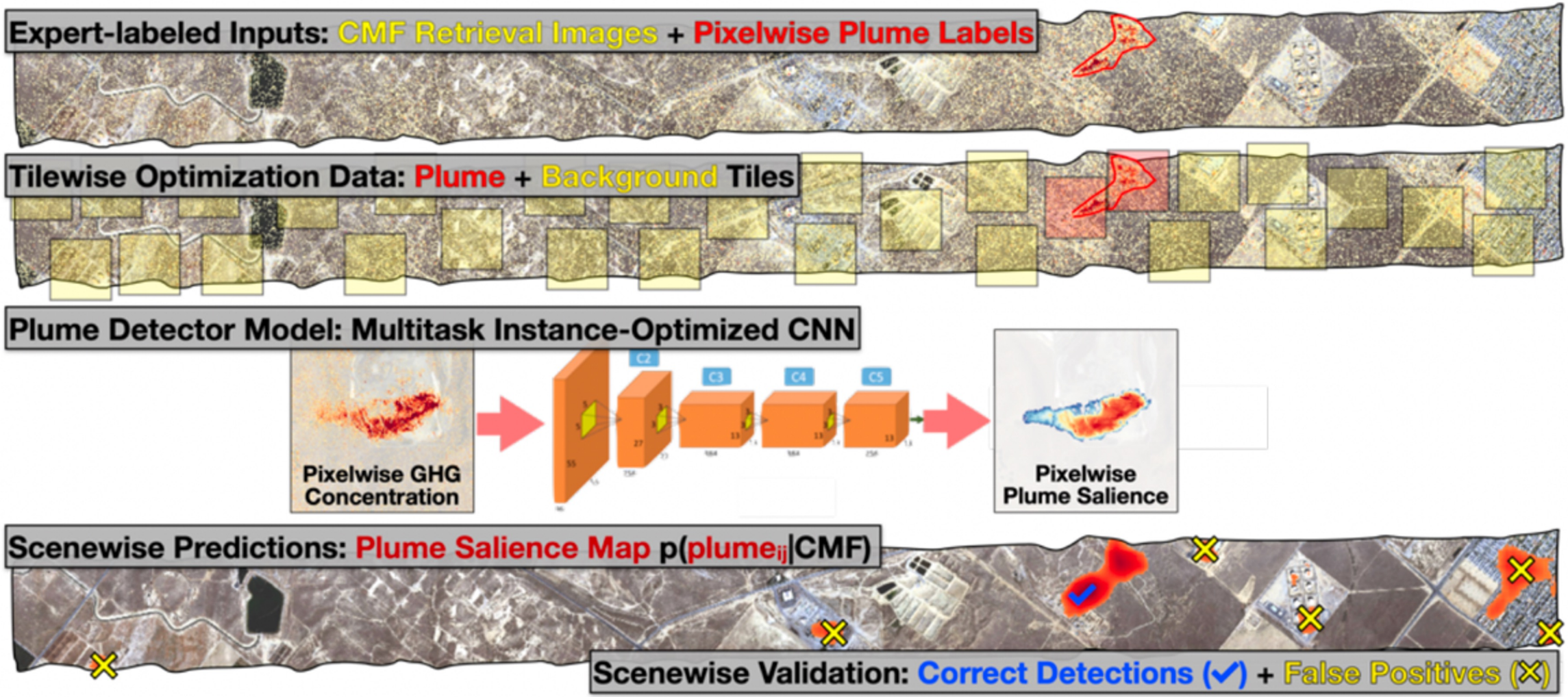
Reuland et al. (soumis)

Vérité de terrain limitée

Chaîne de traitement des panaches de méthane

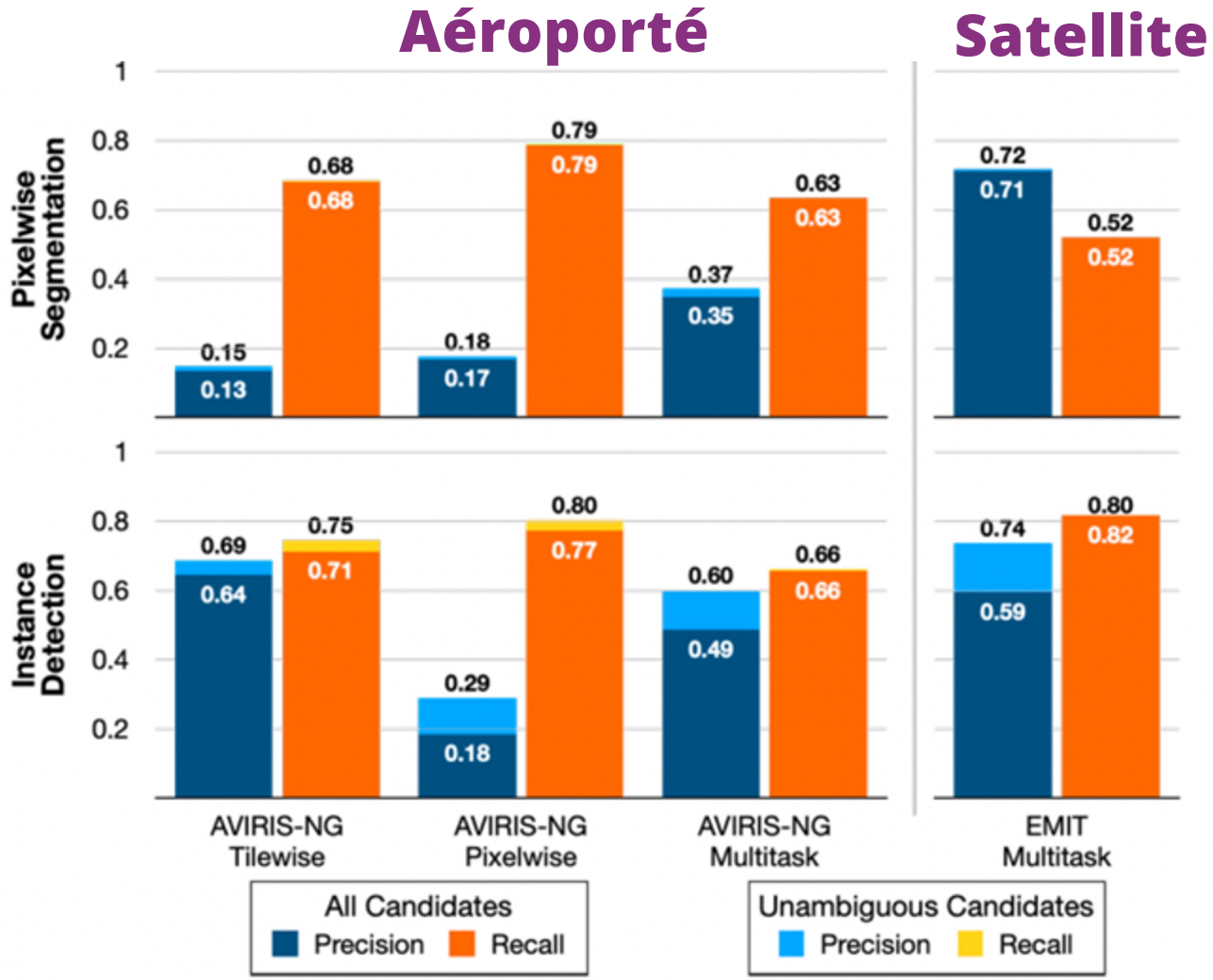


La détection des panaches est le goulot d'étranglement de la chaîne de traitement.
Explorer des méthodes pour réduire la latence/le besoin d'annotation manuelle



Bue et al. (en cours d'évaluation)

Quel est l'objectif d'apprentissage ? Trouver les pixels de méthane enrichis (segmentation dense) ou trouver les panaches (détection d'instances) ?

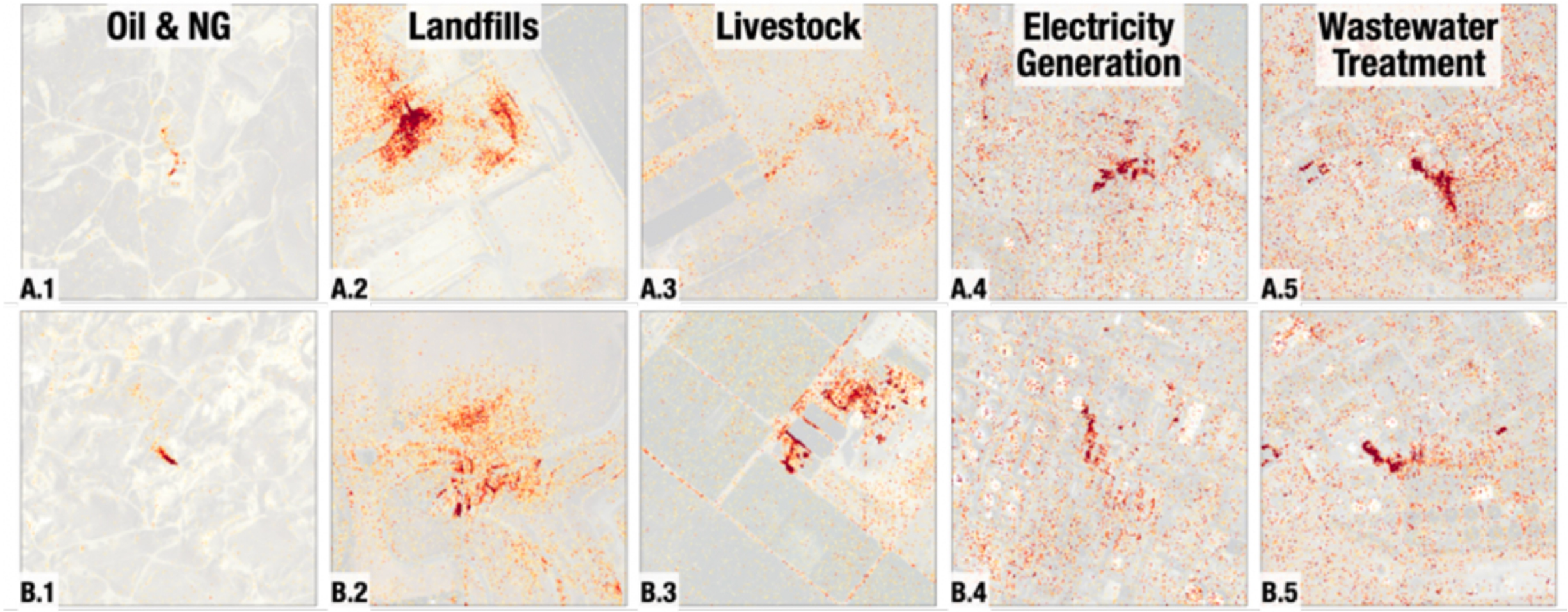


Problème : les super-émetteurs de méthane sont rares, quelques milliers d'échantillons d'entraînement

L'architecture du modèle et la fonction de perte font une énorme différence selon la tâche

Bue et al. (en cours d'évaluation)

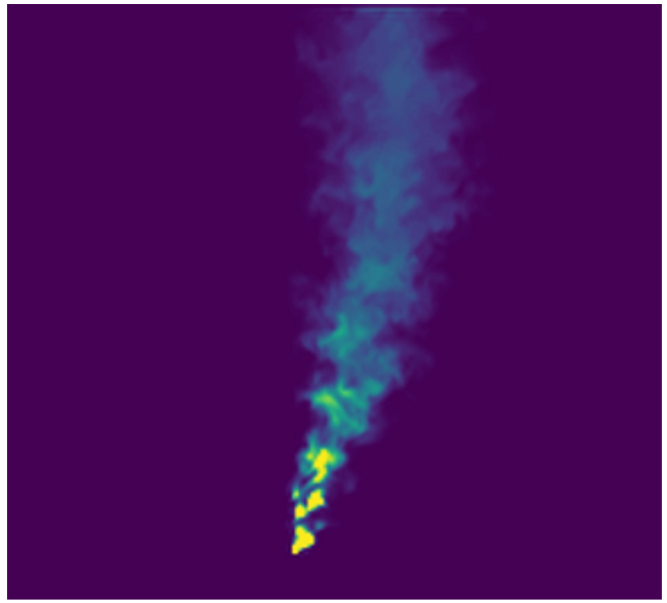
Les panaches de méthane présentent une grande diversité de formes selon le secteur émetteur. Le bruit instrumental dépend aussi de la région et de l'environnement.

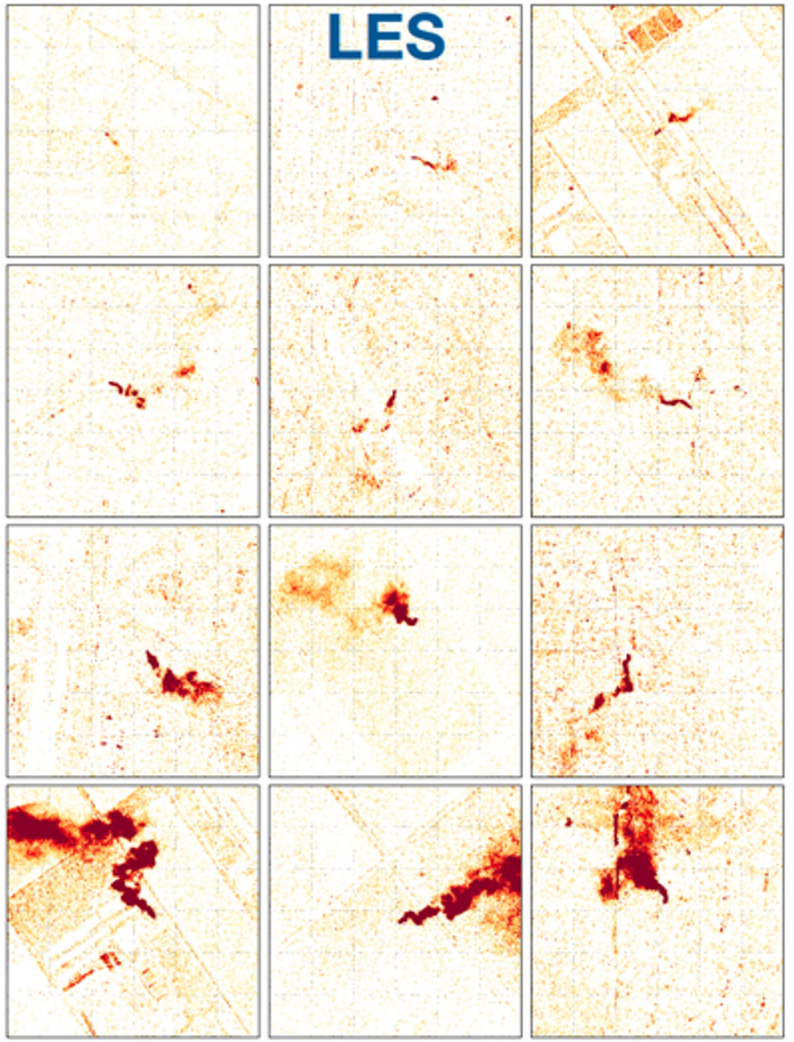


Bue et al. (en cours d'évaluation)

Augmentation des données : injecter des panaches synthétiques dans des images réalistes pour créer davantage d'échantillons

Générer de faux panaches par simulation des grandes échelles (LES)



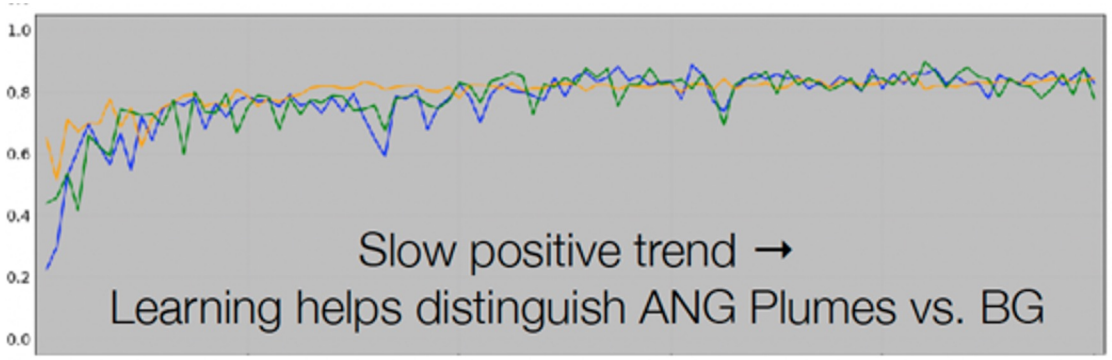


Insérer les panaches dans des tuiles au bruit réaliste pour l'entraînement

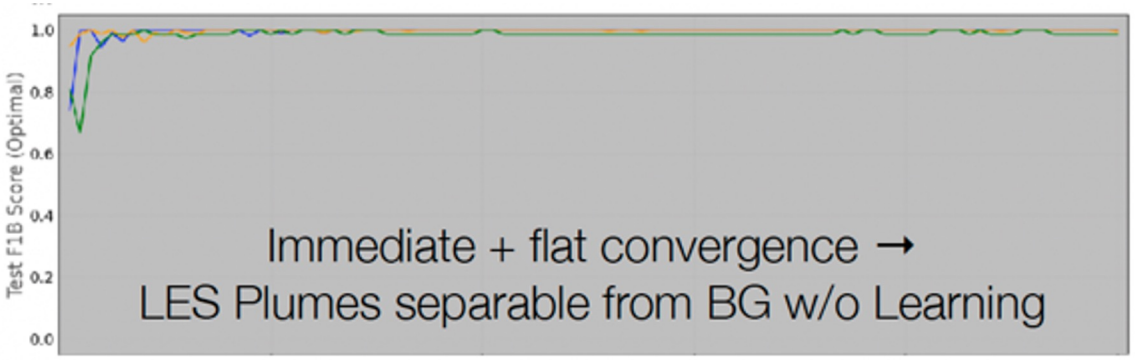
L’augmentation pose un problème de généralisation avec les architectures CNN

Score F1

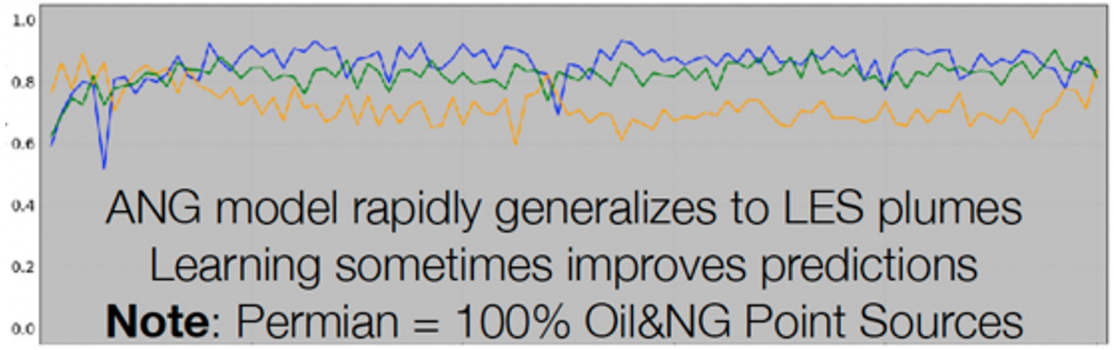
Entraînement aéroporté -> test aéroporté



Entraînement LES -> test LES



Entraînement aéroporté -> test LES



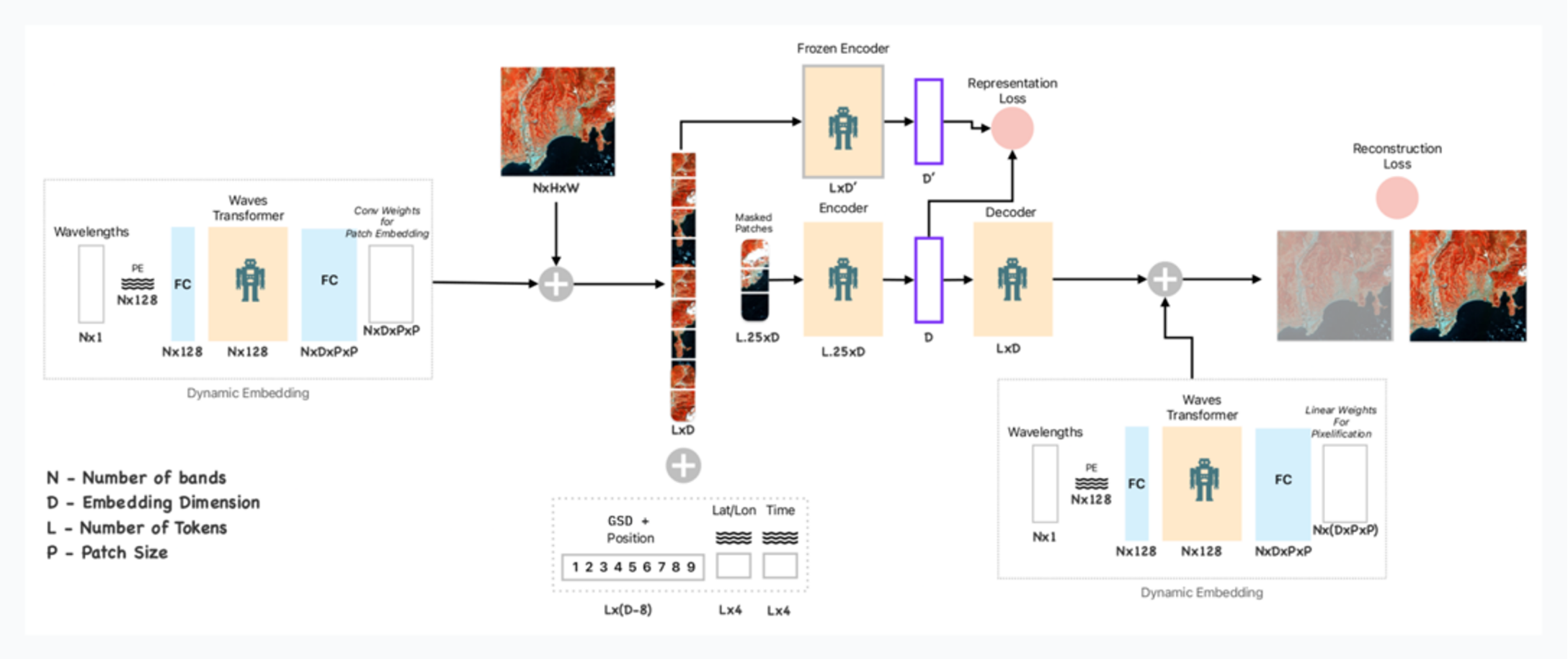
Entraînement LES -> test aéroporté



Époque

Test des modèles de fondation de la Terre sur cette application

Plongements Clay



Test de divers plongements existants et nouveaux avec Tanager, Sentinel-2 et différentes tailles de tuiles.

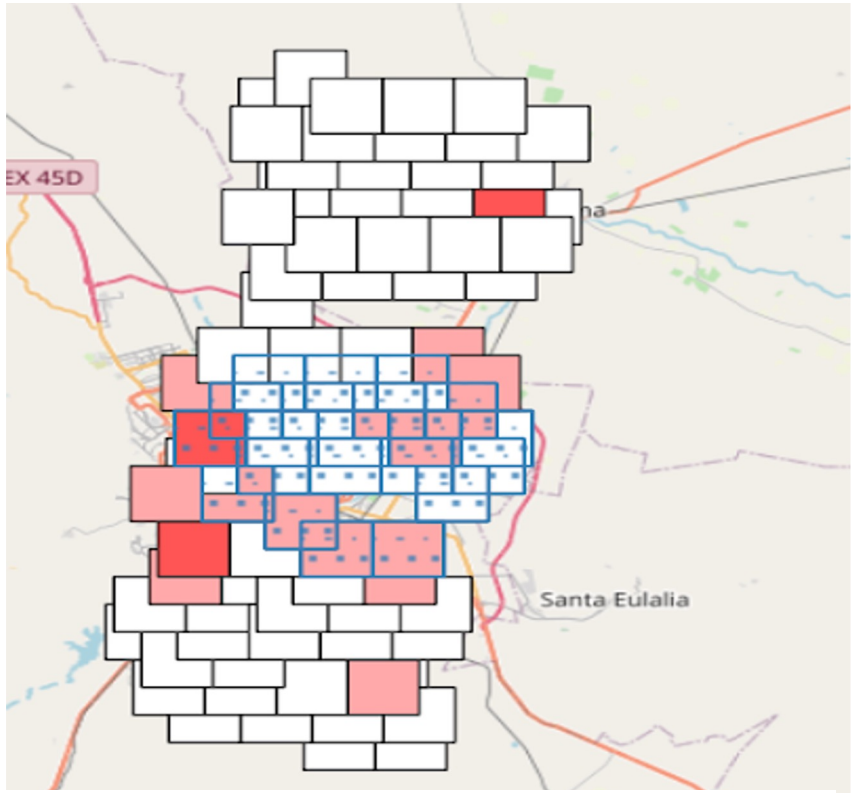
Les plongements suggèrent qu'environ 10 bandes Tanager + Sentinel-2 suffisent pour une classification optimale

Source(s)	Taille de tuile [mètres][1]	Nb de bandes Tanager	F1 positif[2]	F1 pondéré par classe	F1 négatif
Tanager	3840	10	0.64	0.61	0.19
Tanager	**3840**	**Toutes**	**0.74**	**0.69**	0.19
Tanager	2560	10	0.43	0.40	0.17
Tanager	2560	Toutes	0.69	0.64	**0.21**
Tanager, S2	3840	10	**0.74**	**0.69**	0.15
Tanager, S2	3840	Toutes	0.69	0.64	0.12

Mauvaises performances pour la classe « sans panache ». Moins bien que les tests fondés sur des CNN

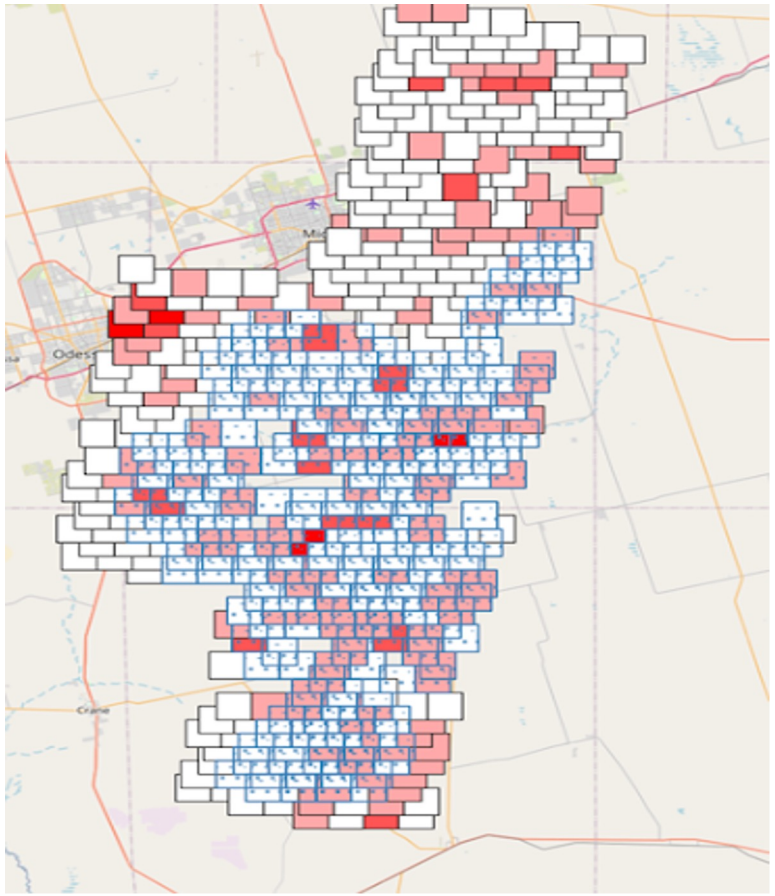
L’examen visuel des résultats ne montre aucun schéma clair dans les erreurs de prédiction

Exemple de résultat du modèle Clay en Oklahoma



Points bleus : emplacements de panaches connus
Carrés blancs : classe négative
Carrés rouges : classe positive

Exemple de résultat du modèle Clay au Texas

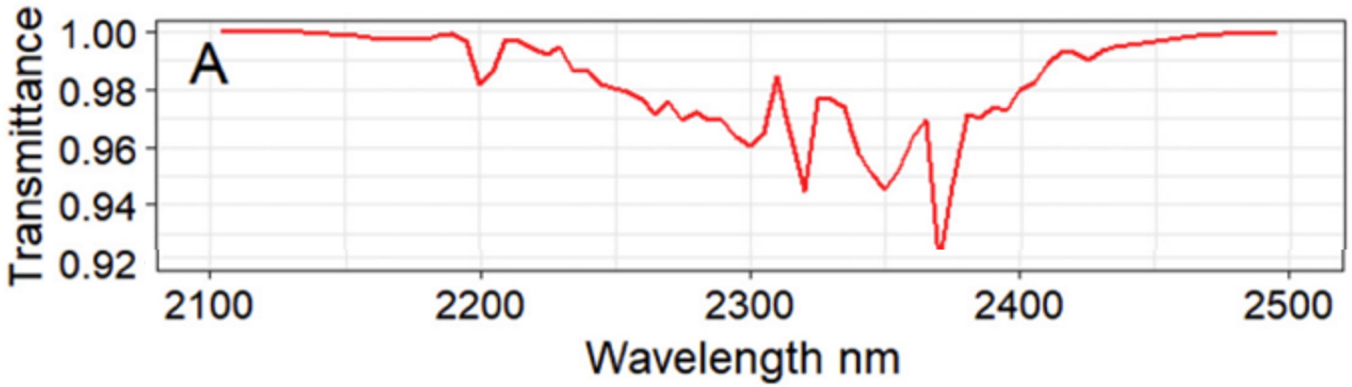


Hypothèse :

L’absorption du méthane est une caractéristique mineure de la rétrodiffusion solaire observée

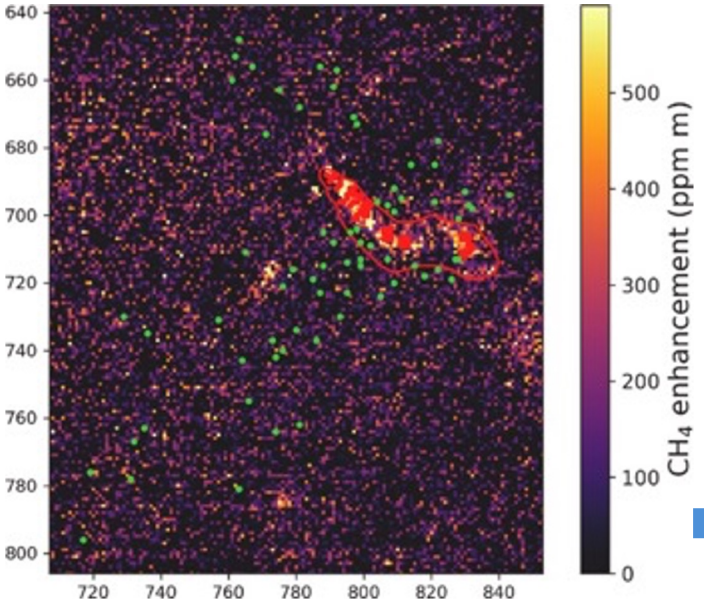
Les modèles de fondation génériques de la Terre peuvent perdre cette signature subtile lors de la création des plongements

Revenir aux spectres, à la physique et aux CNN : évaluation a posteriori

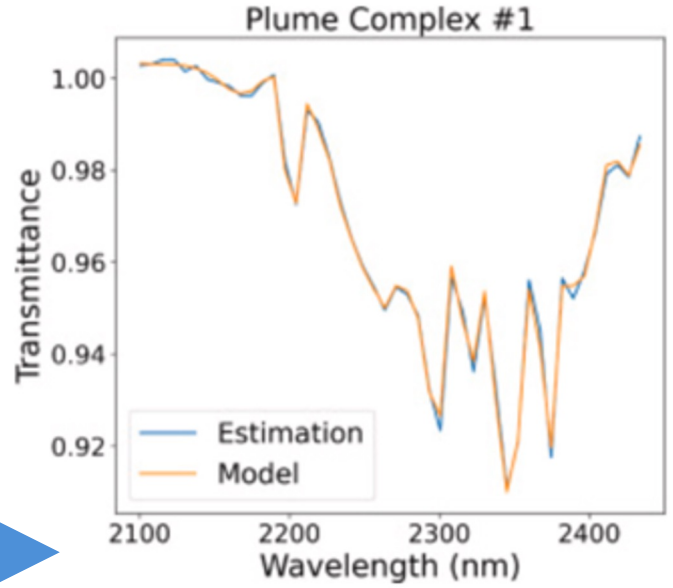


Voici à quoi ressemble spectralement l'absorption du méthane avec un espacement de bandes de 5 nm (c.-à-d. un satellite comme Tanager)

Donc, si j'ai un vrai panache et que je prends des spectres dans le panache et hors du panache…



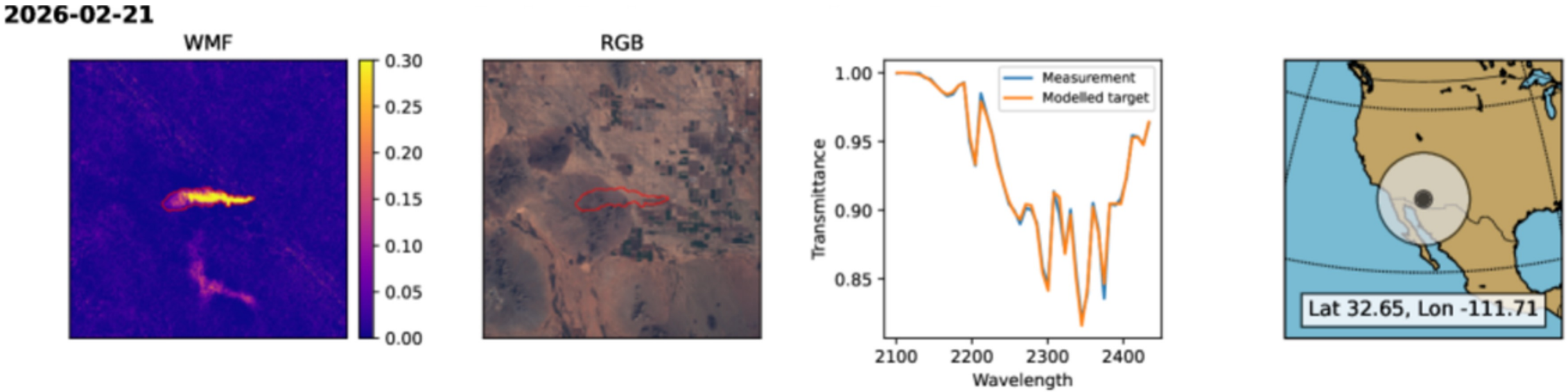
Je devrais obtenir quelque chose qui ressemble à une absorption



Xiang et al. (2025)

Combiner AA et intuition physique pour une alerte rapide aux panaches

Exemple d'alerte entièrement automatisée en conditions opérationnelles



Détection du panache par CNN → Passage par un contrôle physique automatisé (sans AA) → Carbon Mapper a alerté l'autorité locale

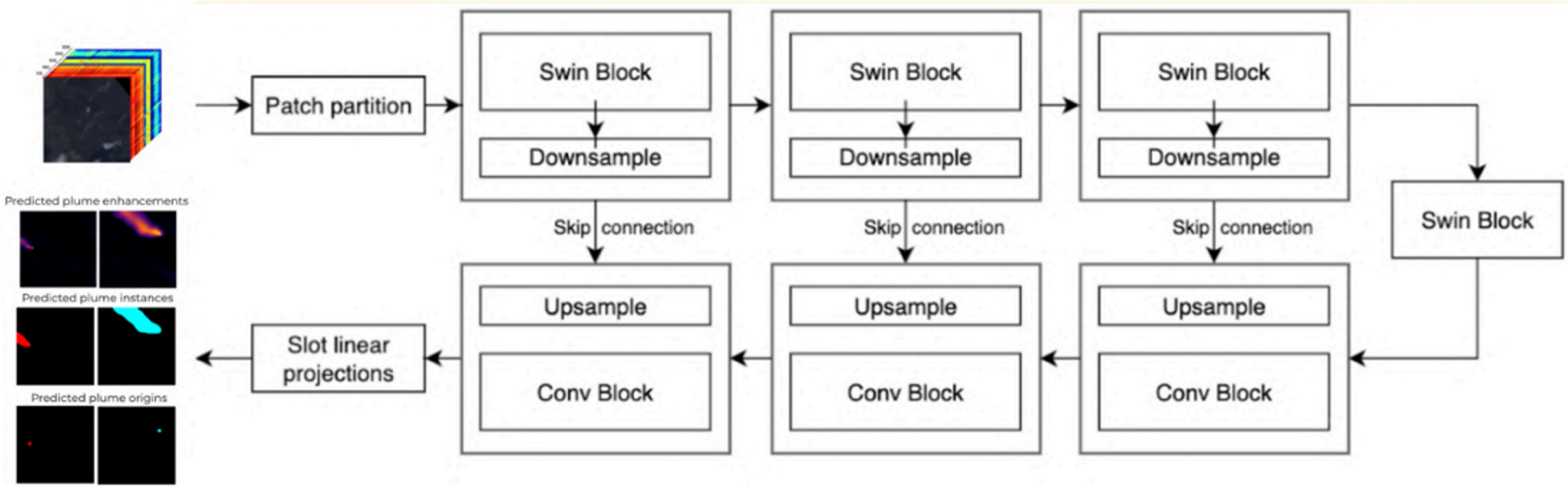
Ici, un modèle d'AA à fort taux de faux positifs est acceptable s'il est combiné à une solide intuition physique pour produire une détection

Question : les systèmes d'IA ou d'AA doivent-ils vraiment être de bout en bout ?

Růžička et al. (2026)

Vers les transformers et les jeux de données massivement augmentés

MAPL-EMIT : architecture U-Net avec encodeur Swin Transformer



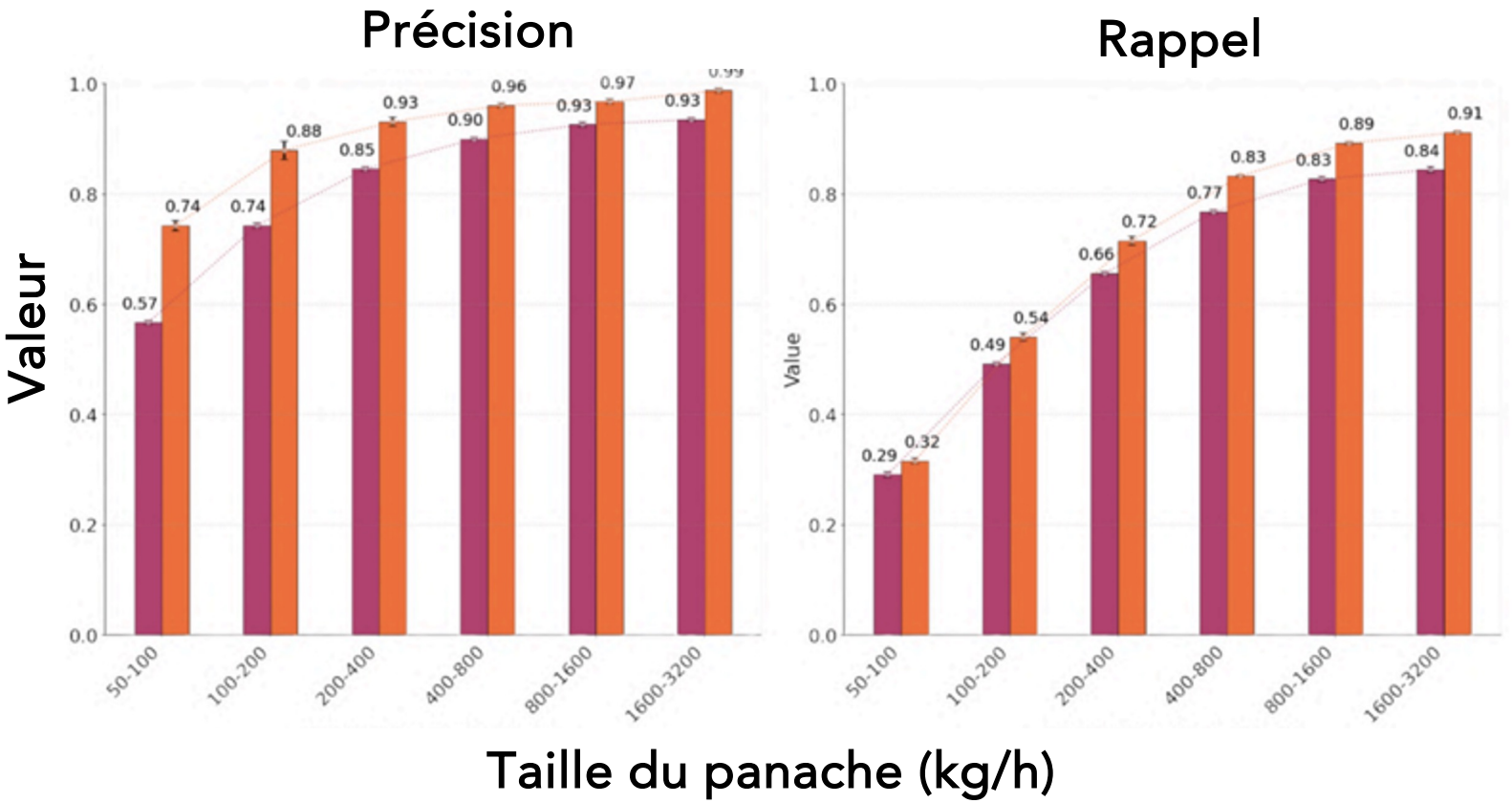
Augmentation par panaches synthétiques : 3,6 millions de panaches synthétiques

Entraînement sur tous les canaux de luminance et tous les pixels d'une tuile d'image

Batchu et al. (2026)

Vers les transformers et les jeux de données massivement augmentés

MAPL-EMIT : architecture U-Net avec encodeur Swin Transformer



Encourageant, mais le problème de la « vérité de terrain » demeure :

« …seuls 54 % des panaches MAPL-EMIT figuraient dans la collection de panaches EMIT L2B, ce qui indique que MAPL-EMIT a identifié deux fois plus de panaches que les analystes humains. »

Comment évaluer la précision avec confiance si les étiquettes humaines comportent potentiellement ce niveau d'erreur ?

Batchu et al. (2026)

Discussion

Retour aux questions précédentes, cette fois sous l'angle de l'IA :

Comment pourrions-nous/devrions-nous ancrer les résultats descendants [ou d'IA] dans une vérité de terrain, des normes et une validation ?

Sondage en direct : votre avis sur la fiabilité de la comptabilité descendante, fondée sur l'IA ou ascendante a-t-il changé ?

- Votez : à quoi faites-vous le plus confiance ? Descendante (manuelle) ; descendante (IA) ; ascendante ?

Quels types d'expériences suggéreriez-vous/mèneriez-vous pour renforcer la confiance dans les estimations descendantes/par télédétection ?

Points clés pour une comptabilité carbone fondée sur l'IA

Thèmes communs à tous les exemples de ce cours

Vérité de terrain et qualité des étiquettes

Souvent, nous manquons de vérité de terrain fiable (restitution, détection, quantification). La qualité des étiquettes varie selon les régions. Concevez votre évaluation en conséquence.

Généralisation géographique et de domaine

Les modèles entraînés sur une région ou un capteur échouent souvent sur d'autres. Évaluez explicitement les performances hors distribution avant tout déploiement.

Les coûts des faux positifs et des faux négatifs sont asymétriques

Un faux positif peut déclencher une mesure réglementaire ou une redevance pour l'exploitant ; un faux négatif laisse des émissions non comptabilisées. Le bon point de fonctionnement sur la courbe précision-rappel dépend de la décision en aval, pas seulement du score F1.

La physique/l'explicabilité comme garde-fou

Pouvez-vous expliquer les résultats d'un modèle d'IA ? La physique nous garde les pieds sur terre, surtout lorsque la confiance est essentielle.

Voie de déploiement et adhésion des parties prenantes

Qui accepte les résultats : régulateurs, exploitants, auditeurs ? Les performances techniques seules ne suffisent pas sans confiance institutionnelle.

La disponibilité des données détermine le périmètre

Données les plus riches : Amérique du Nord (p. ex. GHGRP), UE (p. ex. SEQE). Données rares : la majeure partie des pays du Sud. La couverture revendiquée par votre modèle peut ne pas tenir là où elle compte le plus pour la comptabilité mondiale.

IA éthique et responsable dans la comptabilité carbone

Implications en matière de surveillance

- La détection satellitaire des émissions des installations par des tiers crée une couche de surveillance indépendante. Mais elle soulève aussi des questions :
  - Qui devrait être autorisé à déclarer ? La procédure d'agrément de l'EPA pour les déclarants de super-émetteurs est un modèle possible pour encadrer l'accès.
  - Qui contrôle les données ?

Performances inégales selon les régions

- Les modèles entraînés sur des régions riches en données (États-Unis, UE) se dégradent souvent dans les régions pauvres en étiquettes (Asie du Sud, Afrique, Amérique latine), là où une comptabilité précise compte peut-être le plus pour les progrès mondiaux.
- Les performances de référence sur des données nationales mises de côté ne suffisent pas à prouver la capacité de déploiement à l'échelle mondiale.

Qui supporte les conséquences des erreurs ?

- Faux positifs : un exploitant fait l'objet d'une mesure réglementaire qu'il n'a pas provoquée. Si le modèle se trompe, qui est responsable ?
- Faux négatifs : des émissions passent inaperçues, ce qui compromet l'intégrité des marchés du carbone ou permet des déversements illégaux.
- Dans les deux cas, les parties concernées sont rarement les développeurs du modèle.

Transparence et contestabilité

- Une estimation d'émissions issue de satellites qui déclenche une redevance réglementaire doit être explicable. Les modèles boîte noire posent des difficultés au regard du droit à une procédure régulière.
- Quel recours un exploitant a-t-il pour contester une détection ? Les organismes de normalisation (ISO, OMM, Verra) commencent à s'y pencher pour les marchés du carbone.
- Les modèles open source et les jeux de données de référence publics (METER-ML, EMIT L2B) facilitent l'examen critique. Les systèmes propriétaires non divulgués nuisent à la confiance.

Pour commencer : jeux de données, outils et problèmes ouverts

Jeux de données ouverts et bancs d'essai

METER-ML

Banc d'essai multicapteurs pour la détection des infrastructures émettrices de méthane (CAFO, décharges, puits, usines de traitement).
https://stanfordmlgroup.github.io/projects/meter-ml/

Climate TRACE

Inventaire ouvert des émissions par installation pour plus de 352 M d'actifs dans tous les grands secteurs. API gratuite + téléchargement CSV.
Climatetrace.org

TROPOMI / Sentinel-5P

Produits quotidiens et mondiaux de l'ESA sur les colonnes de méthane et de CO. Gratuits via le Copernicus Open Access Hub.
https://scihub.copernicus.eu/

Portail de données Carbon Mapper

Restitutions de méthane et de dioxyde de carbone issues de Tanager, d'EMIT et de divers instruments aéroportés :
data.carbonmapper.org

Problèmes de recherche ouverts

- Meilleure quantification de l'incertitude pour les chaînes complètes de quantification des panaches
- Bancs d'essai de généralisation entre capteurs/entre régions
- Collecte extensible de vérité de terrain pour les secteurs difficiles à étiqueter (agriculture, ciment)
- Intégrer les détections de l'IA dans les cadres de déclaration réglementaire
- Appliquer aux données de télédétection spectrale des modèles de fondation préentraînés avec des connaissances physiques
- Combler à grande échelle l'écart entre inversion atmosphérique et attribution aux installations

Conclusion : ce que nous avons vu et ce qui reste ouvert

✅ Ce que nous avons vu

- Pourquoi et comment fonctionne la comptabilité carbone
- Estimation ascendante ou descendante
- Suivi satellitaire du CH_4/CO_2
- Méthodes d'inversion atmosphérique
- L'IA pour les données d'activité
- L'IA pour la détection des panaches
- Utiliser l'IA pour fluidifier la prise de décision
- Quantification de l'incertitude

🔭 Questions ouvertes et au-delà de ce cours

- Comptabilité des entreprises et de la chaîne d'approvisionnement (abordée brièvement)
- Analyse du cycle de vie avec l'IA
- L'IA pour renforcer les processus d'audit
- Fusion de capteurs (satellite + sol + avion)
- Gouvernance des modèles, normes et certification

Place aux questions et à la discussion

Quiz

Q1 *Choix multiple*

Laquelle de ces propositions décrit le mieux la principale limite de la comptabilité carbone ascendante ?

A. Elle nécessite des observations satellitaires, qui sont coûteuses

B. Elle repose sur des données d'activité autodéclarées et des facteurs d'émission qui peuvent ne pas refléter les émissions locales réelles

C. Elle ne s'applique qu'au CO_2, pas au méthane

D. Elle ne s'applique qu'aux pays développés dotés de cadres réglementaires solides

Q2 *Choix multiple*

Dans la chaîne de traitement des panaches de méthane à haute résolution, quelle étape dispose actuellement du MOINS de vérité de terrain pour entraîner ou évaluer des modèles d'IA ?

A. Étalonnage des observations satellitaires brutes

B. Restitution des concentrations par filtre adapté

C. Détection des panaches

D. Quantification des émissions

Q3 *Vrai/Faux*

Vrai ou faux : les modèles de fondation de la Terre (p. ex. Clay) ont surpassé les approches fondées sur des CNN pour la détection des panaches de méthane dans les expériences Tanager présentées dans ce cours.

Q4 *Choix multiple*

Une entreprise veut déployer un détecteur de panaches de méthane fondé sur l'IA pour appuyer une initiative de déclaration dans le cadre d'un programme Super-émetteurs. Quel critère doit le plus influencer le choix du seuil de décision (compromis précision/rappel) ?

A. Maximiser le score F1 global sur le jeu de test mis de côté

B. Le coût relatif des faux positifs et des faux négatifs, compte tenu des conséquences réglementaires et financières en aval

C. Utiliser le même seuil que le meilleur article publié sur la détection des panaches

D. Minimiser le temps d'inférence pour permettre des alertes en temps réel

Lectures préalables

Joyce et al. (2023) — METER-ML: A Multi-Sensor Earth Observation Benchmark for Automated Methane Source Mapping

Jacob et al. (2022) — Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations