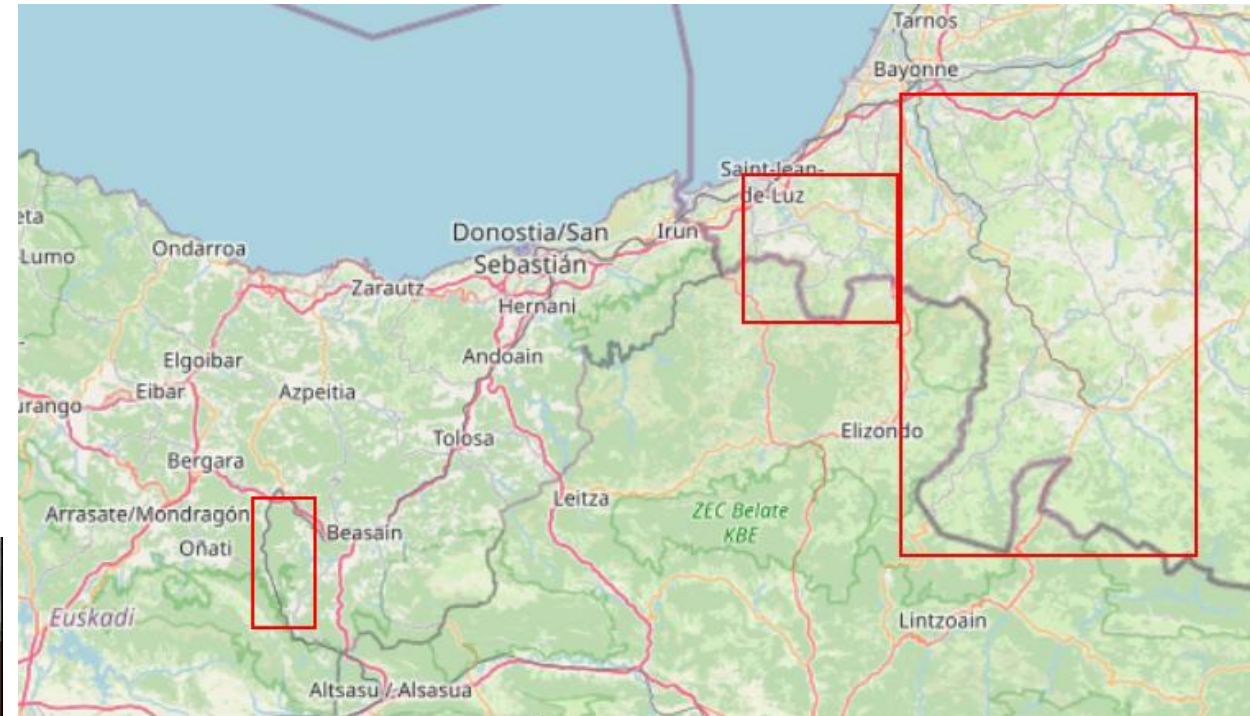




Métamodèles hydrauliques 2D basés sur des réseaux de neurones pour la prévision des impacts de crues rapides

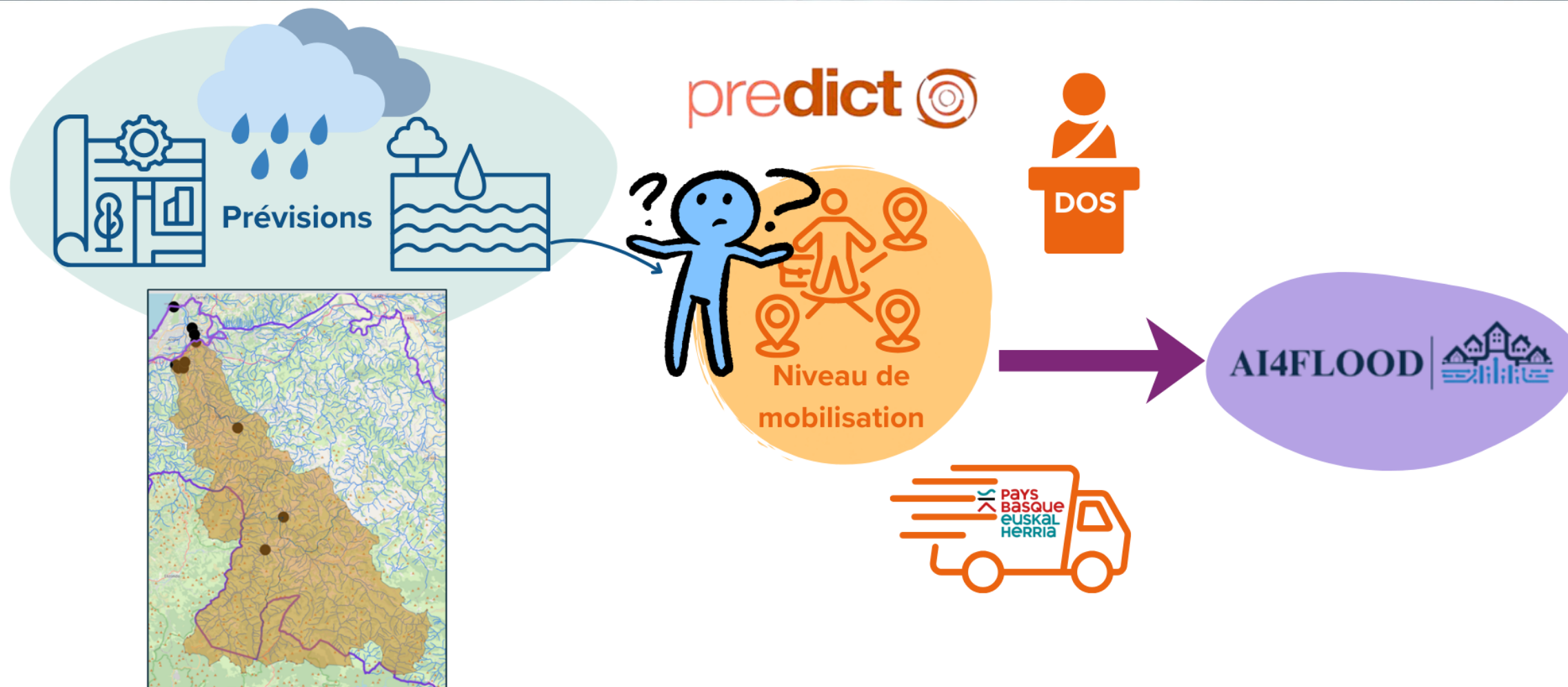
Territoires d'étude

- 2 bassins français (avec sources en Espagne) : Nivelle, Nive (environ 400 et 1000km²)
- 2 bassins espagnols : Urola, Cidacos
- Expérimentations principales sur la Nive et l'Urola



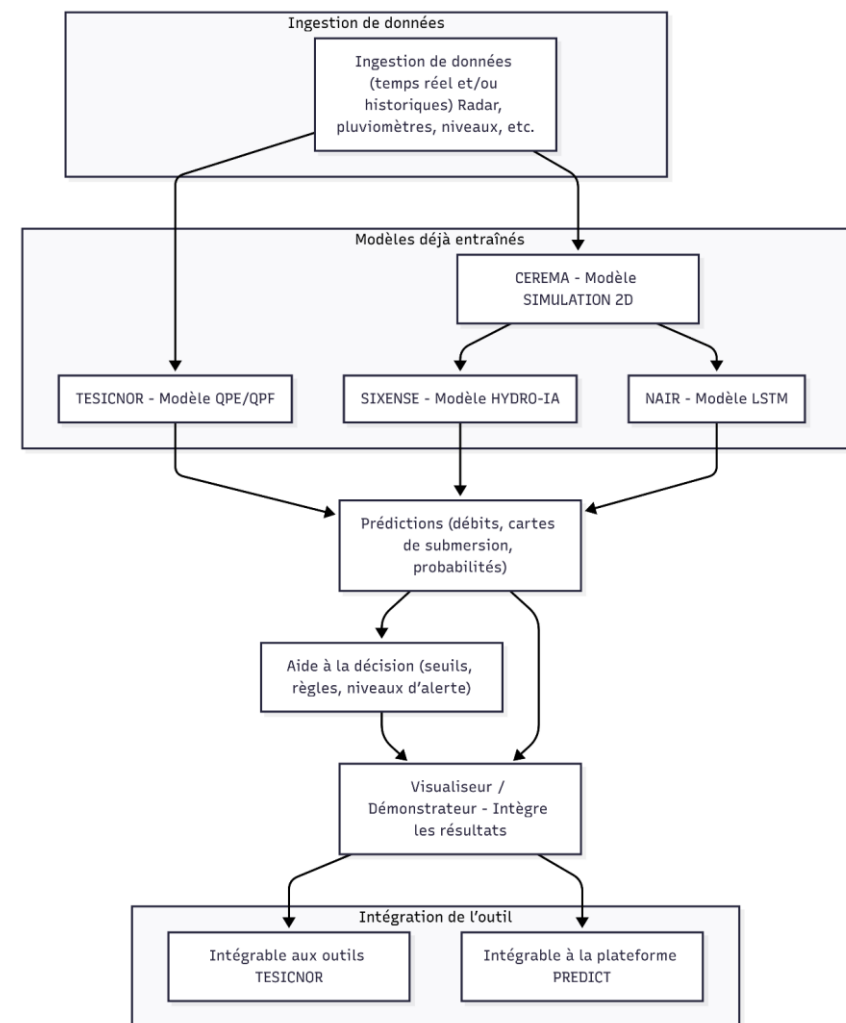
Bourg de St-Pée-sur-Nivelle sous les eaux © C-PRIM 2011

Problématiques et objectifs



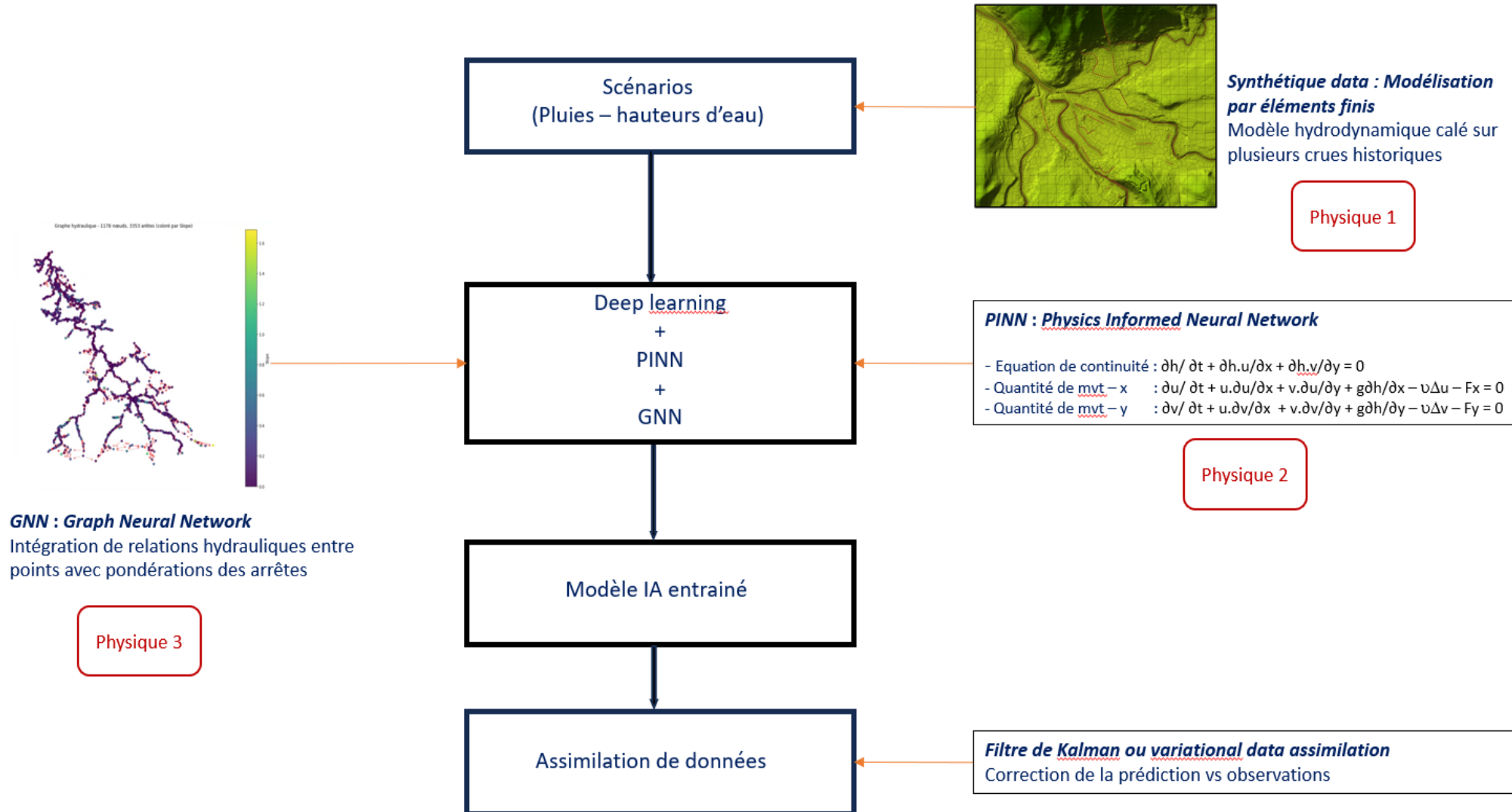
Objectifs d'intégration

- Intégration d'un flux de données temps réel pour l'exécution
- Appel de modèles IA prédictifs pré-entraînés pour calculer l'aléa et l'impact sur les enjeux probable
- Synthèse de résultats sous un format exploitable par les prévisionnistes et/ou les agents d'exploitation
- Regroupement des résultats au sein d'une interface de consultation
- Export vers les plateformes locales de gestion de crise



Principe retenu pour les modèles IA

Modèle IA via un couplage de la physique et réseaux de neurones



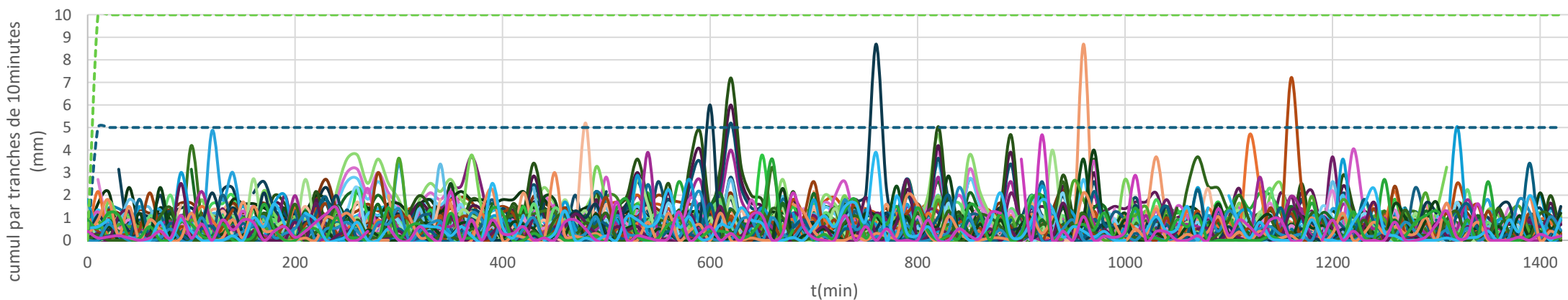
Constitution du jeu de données

1. Modèles 2D
entièrement distribués

2. Chroniques de pluies
injectées dans les modèles

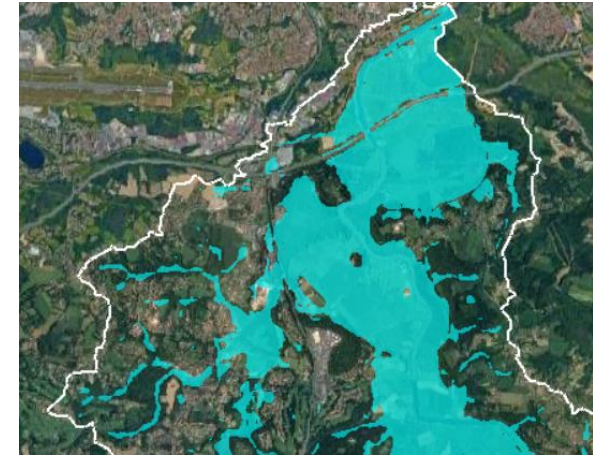
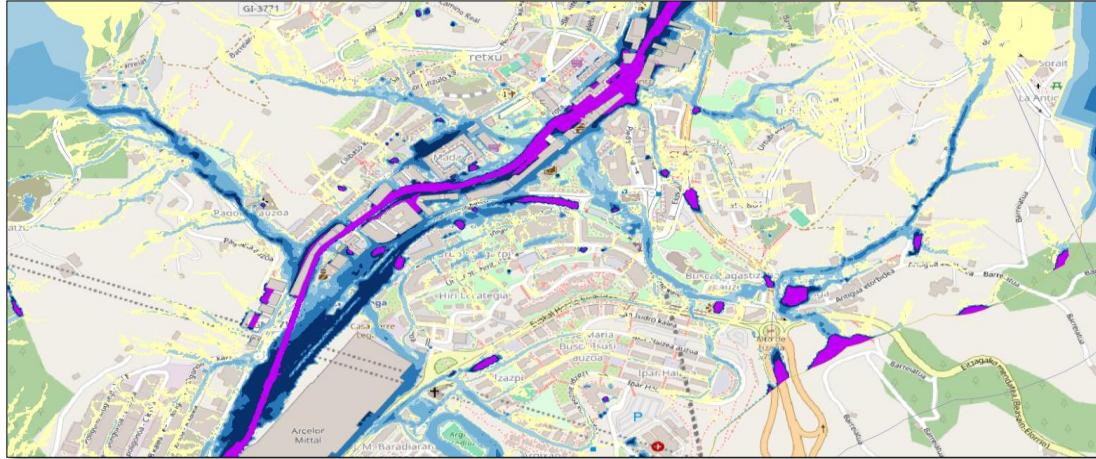


73 courbes de pluies : historiques, historiques majorées, aléatoires, etc.



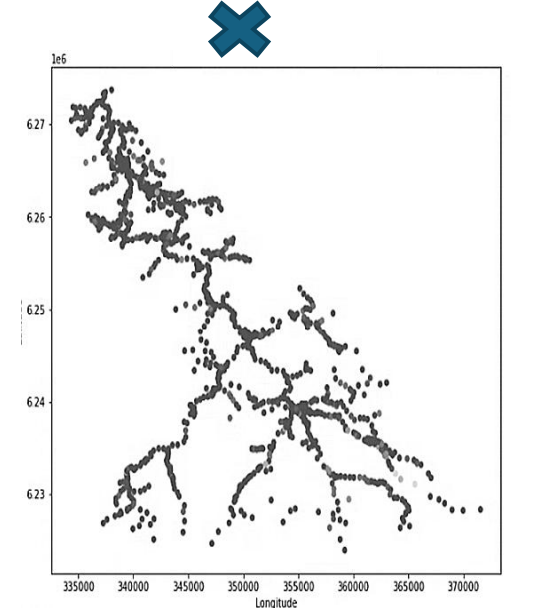
Constitution du jeu de données

3. Résultats globaux des modélisations



4. Extraction de séries temporelles aux points d'intérêts

Niveau_HEC-RAS.csv	
1	VilleFranque,Cambo,Les Bains,Osses,Baigorry,Bassussarry_1,Bassussarry_2,Bassussarry_3,Bassussarry_4,a63_1,a63_2,a63_3,Ceremal2,Ceremal3,Ceremal4,Ceremal5,Ceremal6,Ceremal7,Ceremal8,Ceremal9,Ceremal20,Ceremal21,Ceremal22,Ceremal23,Ceremal24,Ceremal25,Ceremal26,Ceremal27,Ceremal28,Ceremal29,Ceremal30,Ceremal31,Ceremal32,Ceremal33,Ceremal34,Ceremal35,Ceremal36,Ceremal37,Ceremal38,Ceremal39,Ceremal40,Ceremal41,Ceremal42,Ceremal43,Ceremal44,Ceremal45,Ceremal46,Ceremal47,Ceremal48,Ceremal49,Ceremal50,Ceremal51,Ceremal52,Ceremal53,Ceremal54,Ceremal55,Ceremal56,Ceremal57,Ceremal58,Ceremal59,Ceremal60,Ceremal61,Ceremal62,Ceremal63,Ceremal64,Ceremal65,Ceremal66,Ceremal67,Ceremal68,Ceremal69,Ceremal70,Ceremal71,Ceremal72,Ceremal73,Ceremal74,Ceremal75,Ceremal76,Ceremal77,Ceremal78,Ceremal79,Ceremal80,Ceremal81,Ceremal82,Ceremal83,Ceremal84,Ceremal85,Ceremal86,Ceremal87,Ceremal88,Ceremal89,Ceremal90,Ceremal91,Ceremal92,Ceremal93,Ceremal94,Ceremal95,Ceremal96,Ceremal97,Ceremal98,Ceremal99,Ceremal100
2	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
3	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
4	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
5	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
6	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
7	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
8	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
9	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
10	2.41,19.35,101.01,145.17,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
11	2.41,19.35,101.01,145.18,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
12	2.41,19.35,101.01,145.20,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
13	2.41,19.35,101.01,145.22,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
14	2.48,19.35,101.01,145.26,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
15	2.61,19.35,101.01,145.28,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
16	2.77,19.35,101.05,145.31,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
17	2.92,19.35,101.07,145.32,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
18	2.96,19.35,101.81,145.35,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.17,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
19	3.01,19.35,102.07,145.48,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.21,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.72,45.50
20	3.03,19.35,102.20,145.58,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.71,45.50
21	3.12,19.35,102.37,145.65,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.27,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.68,45.50
22	3.23,19.35,102.45,145.69,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
23	3.33,19.80,102.42,145.72,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
24	3.37,19.81,102.39,145.83,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
25	3.46,19.79,102.40,145.93,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.24,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
26	3.56,19.76,102.37,146.03,5.88,5.17,3.90,10.40,8.43,6.44,5.53,67.33,14.01,38.72,156.68,12.03,77.26,21.39,105.26,17.78,105.55,154.74,229.72,243.23,155.35,19.19,146.77,7.84,65.33,160.67,231.23,178.67,45.50
27	



Enrichissement : ingénierie des données (features)

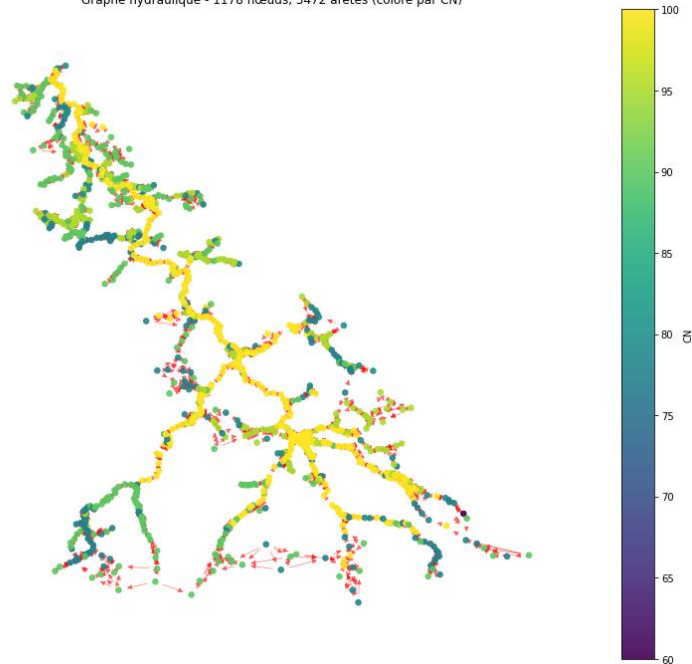
Les features suivantes ont été introduites :

- Time : [0h - 1h - 2h - 3h - 4h - 5h - 6h - 7h - 8h - 9h - 10h - 11h - 12h - 13h - 14h - 15h - 16h - 17h - 18h - 19h - 20h - 21h - 22h - 23h - 24h]
- Cos (Time) : [Cos (2.P.Time / 24)]
- Sin (Time) : [Sin (2.P.Time / 24)]
- Rain : [rain (mm/h)]
- Rain_Somme mobile : [statistique : Somme mobile sur 3h, 6h, 12h, 24h]
- Twi_mean : [Topographic Wetness Index]
- Manning_mean : [Manning]
- CN_mean : [Curve number]
- S_mean : [Pente moyenne]
- Z_mean : [Altitude moyenne]

GNN : Graphe Neural Networks

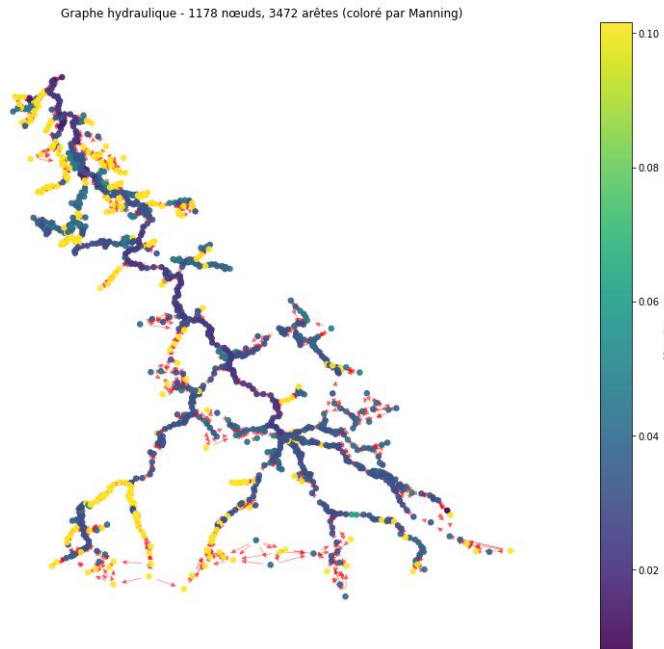
Pour la Nive, graphe construit : 1178 nœuds, 3472 arêtes (maximum 5 arrêtes par nœud)

Graphe hydraulique - 1178 nœuds, 3472 arêtes (coloré par CN)



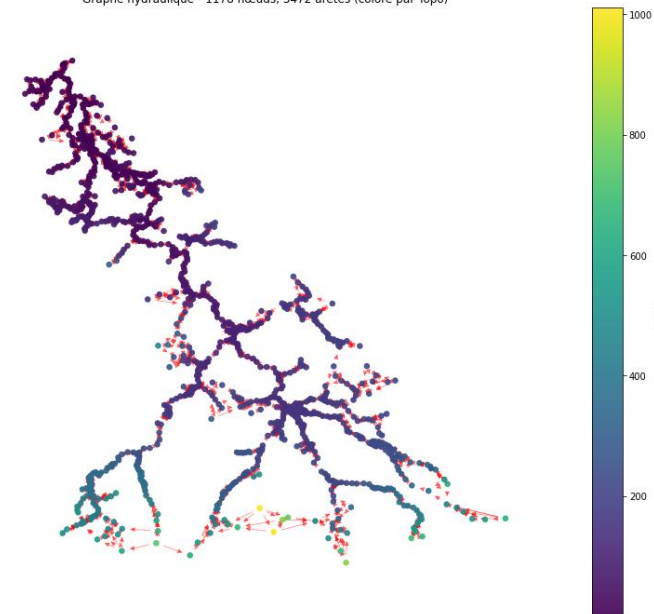
Curve number

Graphe hydraulique - 1178 nœuds, 3472 arêtes (coloré par Manning)



Manning

Graphe hydraulique - 1178 nœuds, 3472 arêtes (coloré par Topo)



MNT

PINN : Physics-informed neural networks

Intégration des lois physiques dans le processus d'entraînement → réduction du nombre de scénarios d'apprentissage

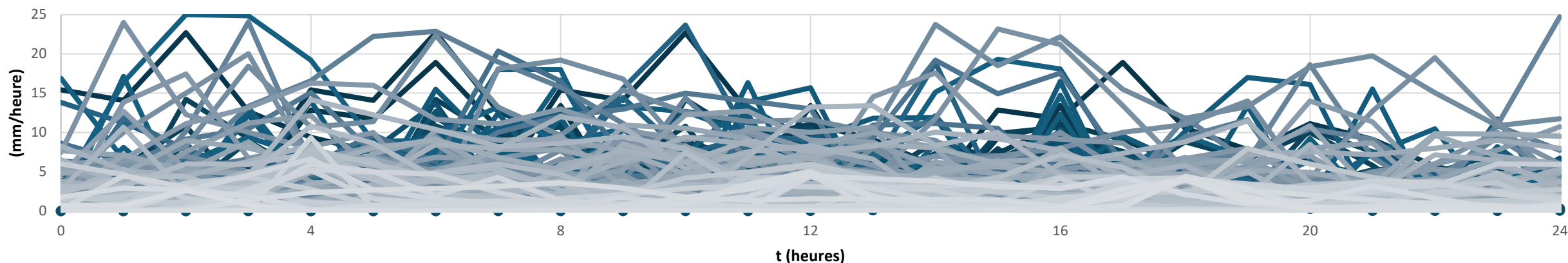
Equation de continuité simplifiée :

$$\partial h / \partial t = r(t) - (v(S)/n) * h^{(5/3)} - \text{Infiltration}(\text{CN})$$

- $\partial h / \partial t$: Variation temporelle de la hauteur d'eau h
- $r(t)$: Pluie nette, apport d'eau par les précipitations
- $(v(S)/n) * h^{(5/3)}$: Terme de drainage ou d'écoulement (formule de Manning simplifiée)
- S : Pente moyenne
- n : Coefficient de Manning
- $\text{Infiltration}(\text{CN})$: Pertes par infiltration dans le sol basée sur le Curve Number (CN)

Entrainement du modèle : Deep Ensembles

Cas de la NIVE : 1178 points de contrôles, 200 scénarios d'apprentissage

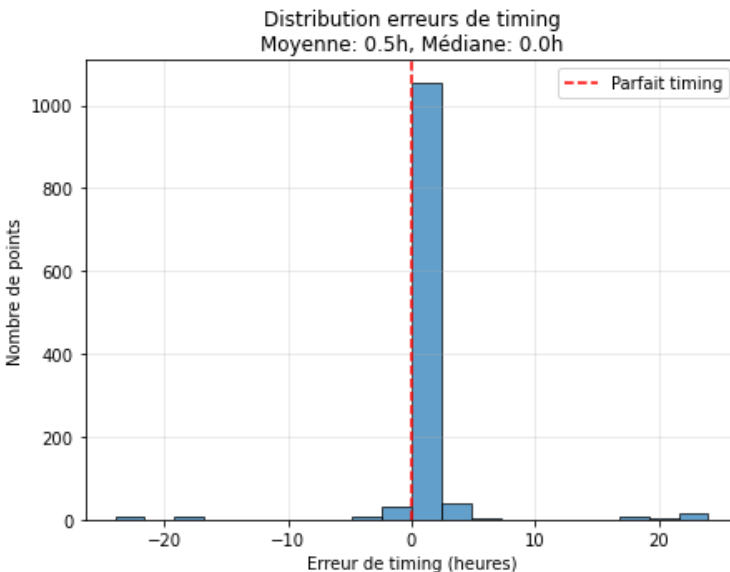
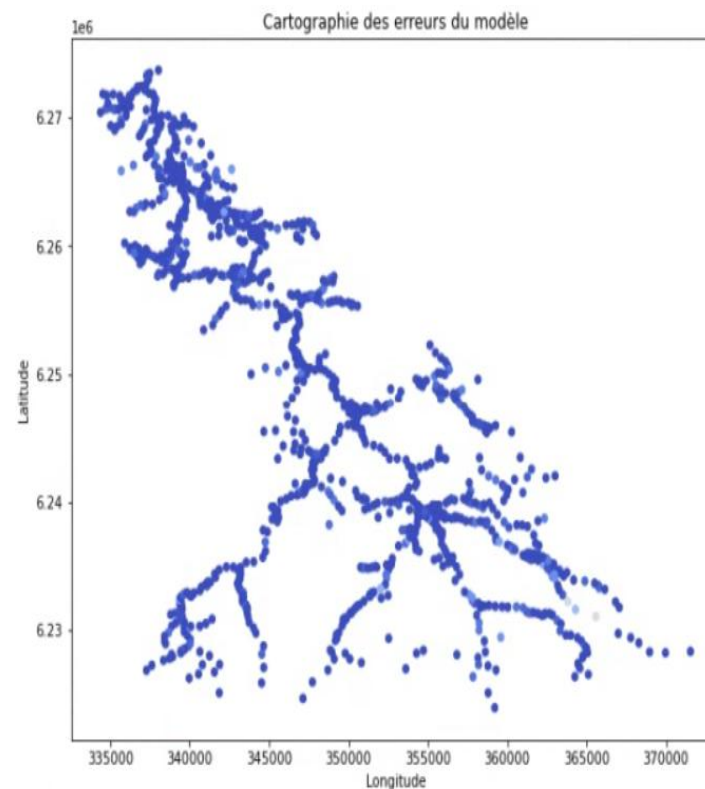
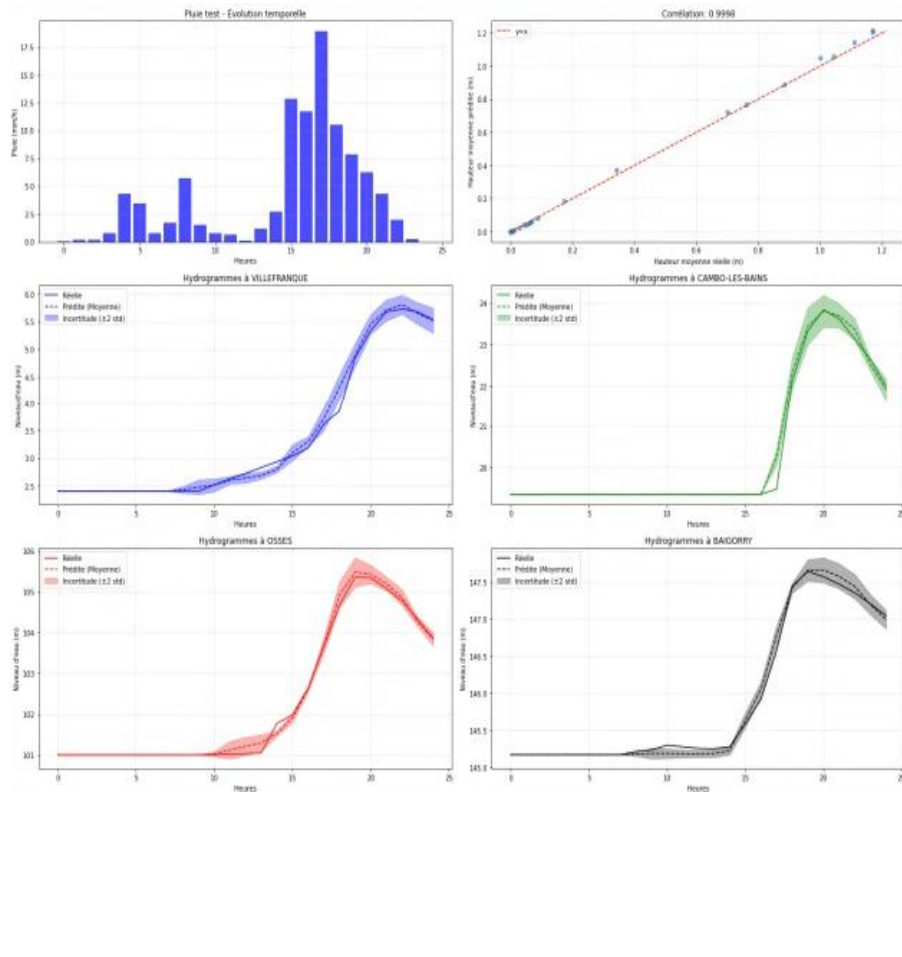


200 courbes de pluies : historiques, historiques majorées, aléatoires, etc (2014 – 2025)

Deep Ensembles : tester 30 modèles et garder 5 modèles pour l'incertitude

- **Réduction de la variance** : réduit le risque de surapprentissage (overfitting) et on améliore la généralisation.
- **Robustesse** : Si un modèle individuel fait une erreur, les autres peuvent compenser.
- **Incertitude** : Permet d'estimer l'incertitude des prédictions (par exemple, en regardant la variance entre les prédictions des différents modèles).

Validations: Nive, crue de juillet 2014



=== MÉTRIQUES DE PERFORMANCE ===

MSE total: 0.0061

RMSE total: 0.078 m

MAE total: 0.024 m

R^2 : 0.86

=== BIAIS DU PIC PAR POINT ===

Biais moyen: -0.046 m

Biais max (absolu): 0.72 m

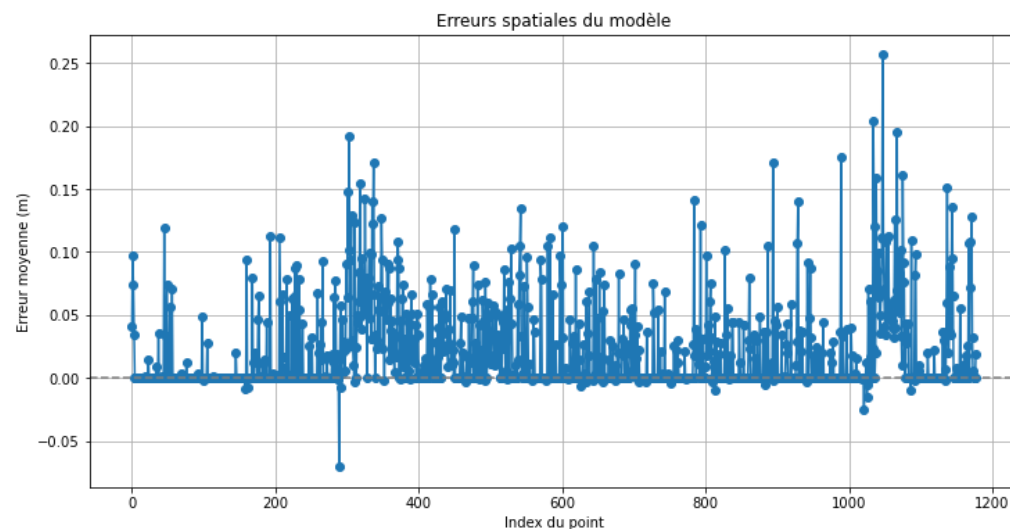
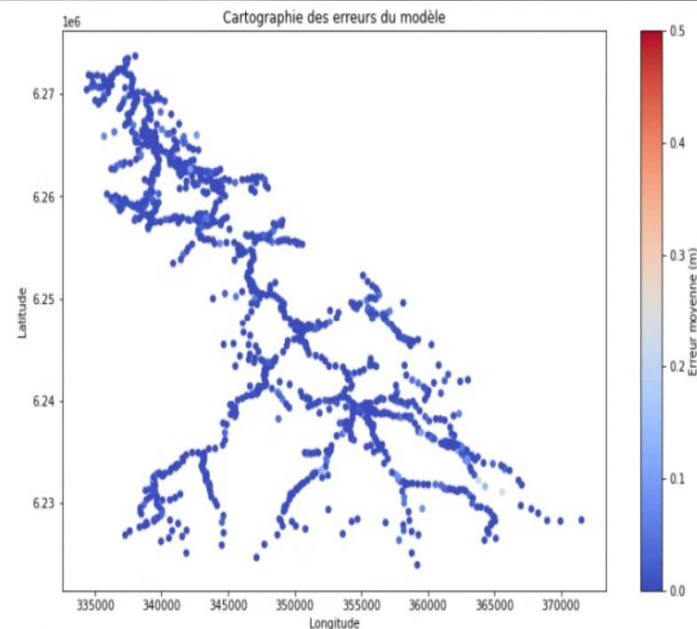
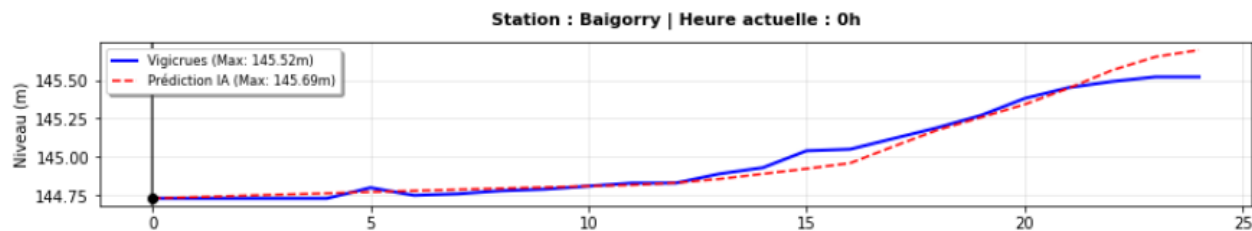
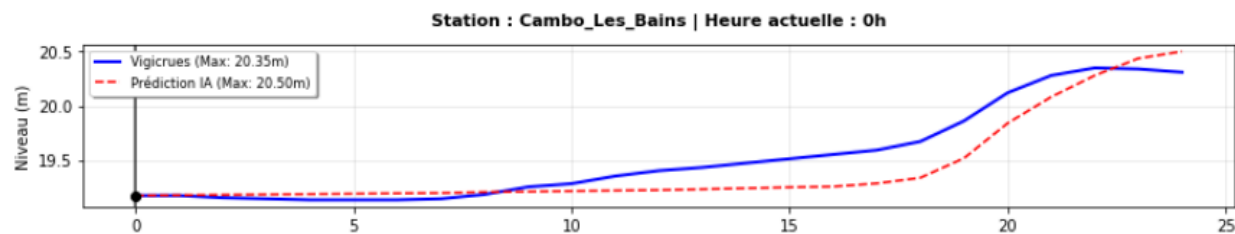
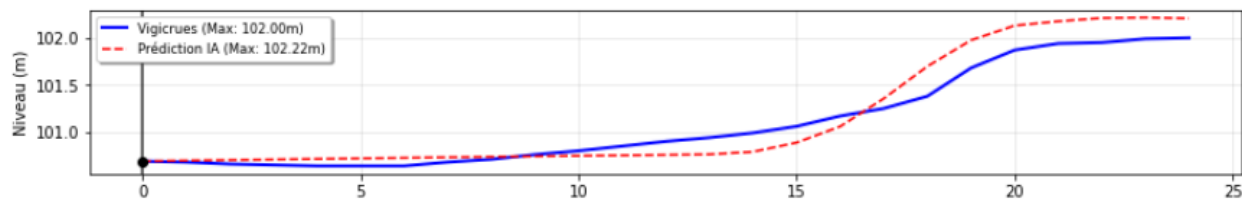
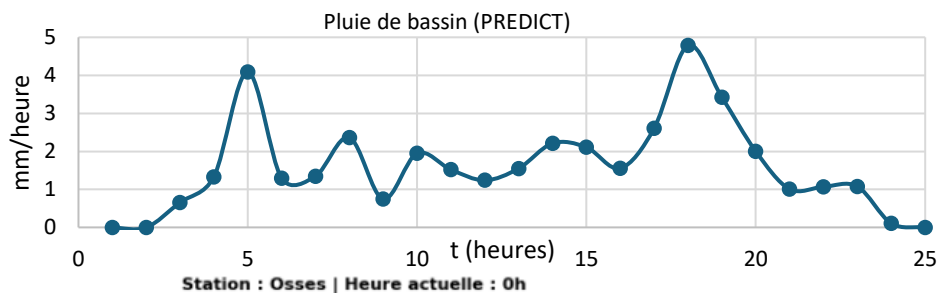
=== ANALYSE ERREURS TIMING ===

Points en avance (erreur < 0): 53

Points à l'heure ($\pm 1h$): 1079

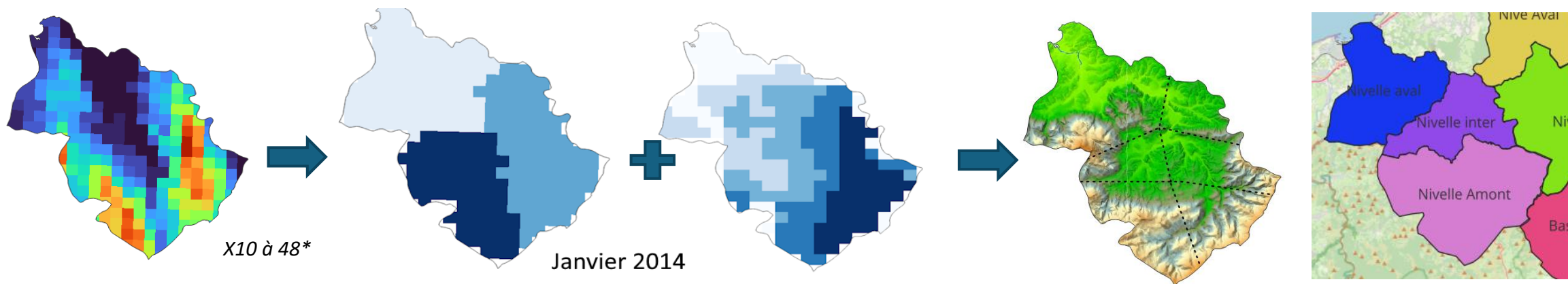
Points en retard (erreur > 0): 211

Test : 26 janvier 2026



Enrichissement : distribution spatiale des pluies horaires

- Analyse puis apprentissage sur données COMEPHORE
- Simplification par recherche de zones de précipitations semblables représentatives du fonctionnement des bassins versants (Quantiles des cumuls + classification des ensembles de cumuls horaires par K-Moyenne sur une quinzaine d'événement)
- La confrontation à l'expérience des gestionnaires et prévisionnistes locaux permet une confirmation des résultats et/ou une adaptation aux contraintes opérationnelles (disponibilité des prévisions, présence de pluviomètres pour le contrôle de la qualité des données etc.)



Critiques et suites

Des premiers tests concluants, à confirmer par une évaluation plus large

- **Qualité de la prévision $\approx$ qualité du modèle 2d + complétude des scénarios**

Avec une variété suffisante de scénarios, le passage à un modèle entraîné semble causer une perte de fiabilité très faible au regard des imprécisions d'un modèle hydrologique-hydraulique bien calé.

- **Difficulté à représenter des événements réels sur grands BV par des pluies homogènes, difficultés liées à la transformation des pluies par SCS**

Introduire les pluies spatialisées dans un format intégrable aux modèles 1D et envisageable en prévision, introduire d'autres formules hydrologique de production au sein des modélisations 2D (ex : IBER, dev. Telemac...)

- **Besoin de gérer les erreurs de prévisions ou écarts aux observations**

Introduction d'une correction temps réel par filtre de Kalman + instrumentation supplémentaires des BV

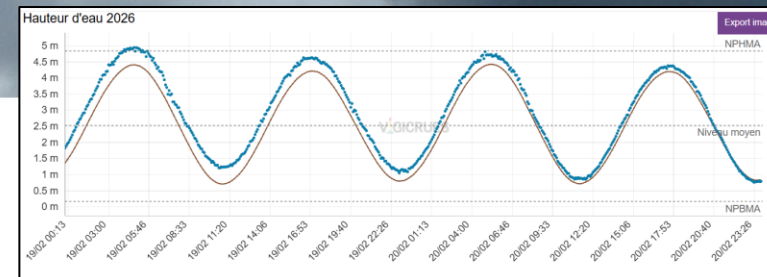
Perspectives CAPB

Prendre en compte l'influence maritime

Mutualiser les résultats

Evaluer de la pertinence des résultats

Héberger et collecter les données et modèles IA



D.O.S.



VIGICRUES



COMMUNAUTÉ
D'AGGLOMÉRATION
—
HIRIGUNE
ELKARGOA
—
COMUNAUTAT
D'AGLOMERACION

Interreg
POCTEFA



Cofinanciado por
la UNIÓN EUROPEA
Cofinancé par
l'UNION EUROPÉENNE

AI4FLOOD





Muchas gracias
Merci beaucoup

Interreg
POCTEFA



Cofinanciado por
la UNIÓN EUROPEA
Cofinancé par
l'UNION EUROPÉENNE



El proyecto Ai4FLOOD ha sido cofinanciado al 65% por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2021-2027). El objetivo del POCTEFA es reforzar la integración económica y social de la zona fronteriza España-Francia-Andorra