

COLLOQUE FINAL TRAJECTOIRE, LE 11 JUIN 2025

L'IA AU SERVICE DE LA SCENARISATION DES TRAJECTOIRES PREDICTIVES DU CESIUM-137

K. PELÉ, V. NICOULAUD-GOUIN

CONTEXTE DU PROJET

OBJECTIF :

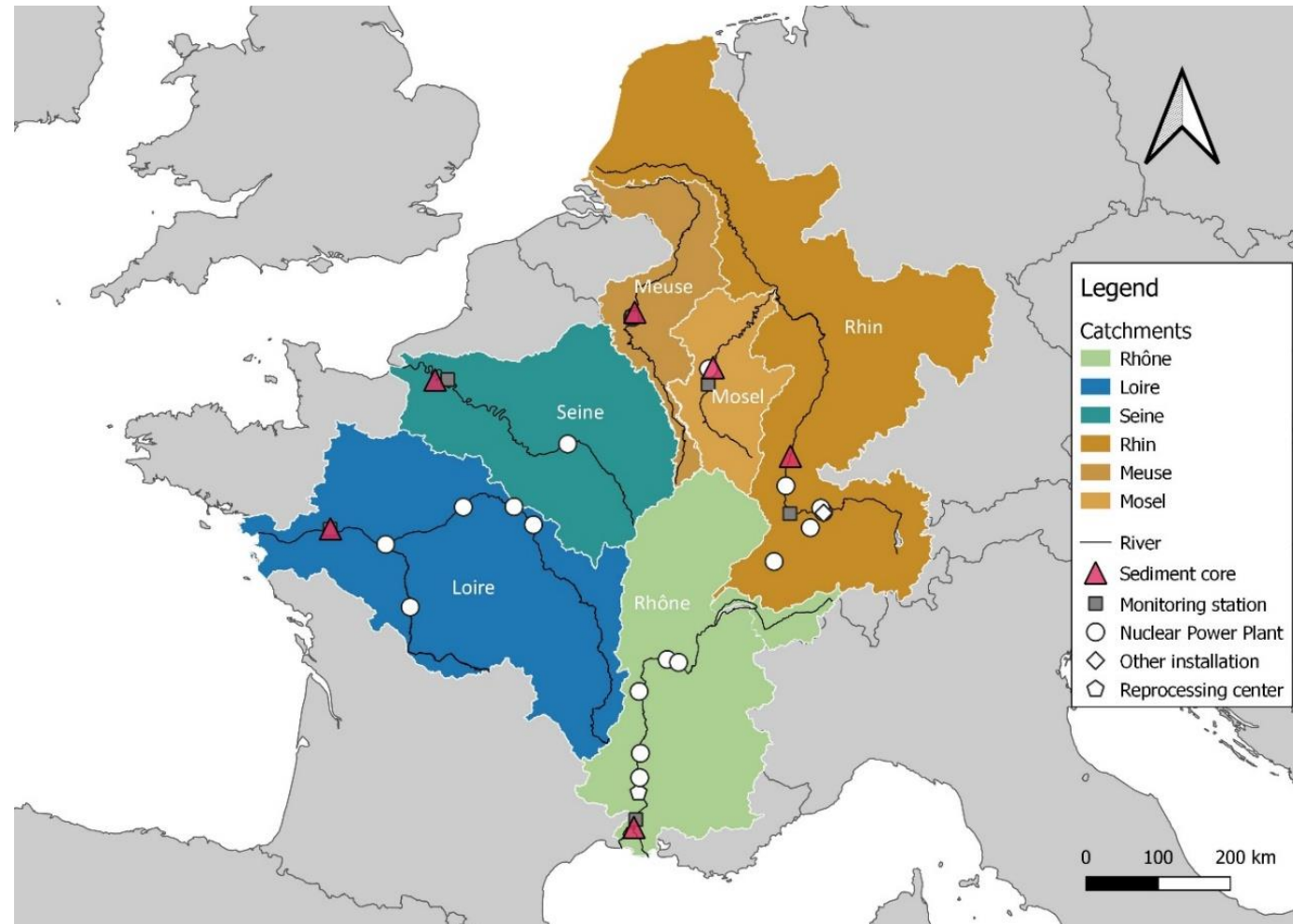
PRÉDIRE LA CONCENTRATION DE CÉSIUM-137 DANS LES ARCHIVES SÉDIMENTAIRES DANS 6 FLEUVES FRANÇAIS

SOMMAIRE :

1- LES DONNÉES

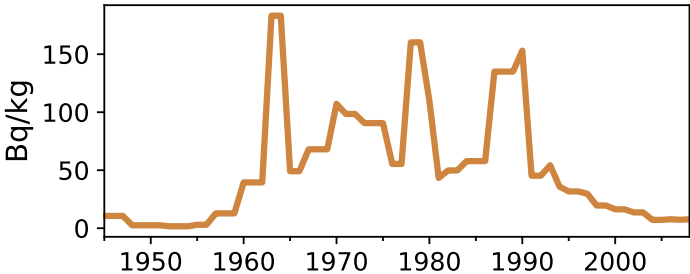
2- LE MODÈLE

3- RÉSULTATS ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ



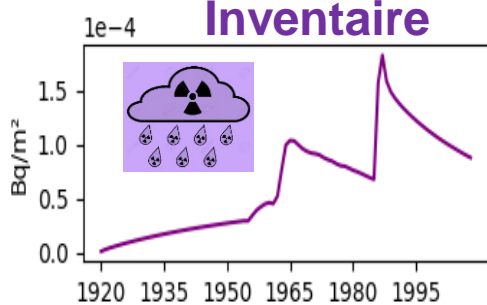
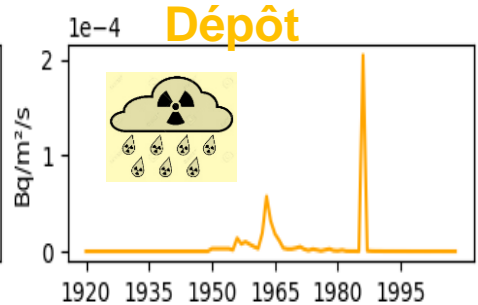
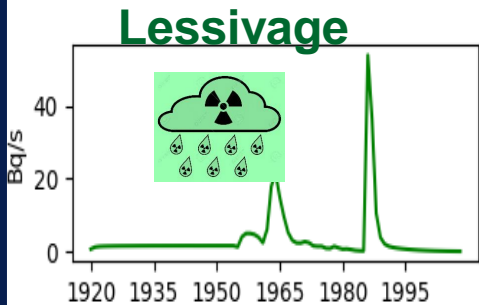
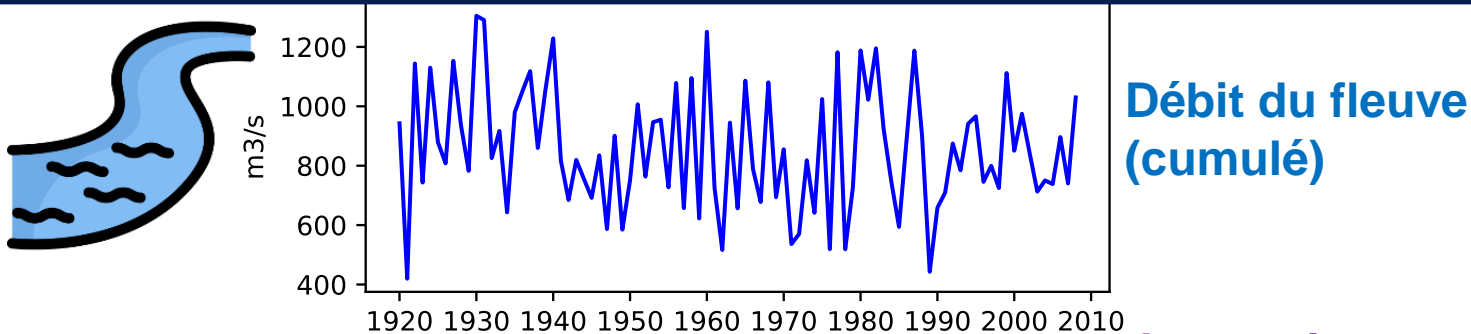
LES DONNÉES (exemple du Rhône)

VARIABLE CIBLE

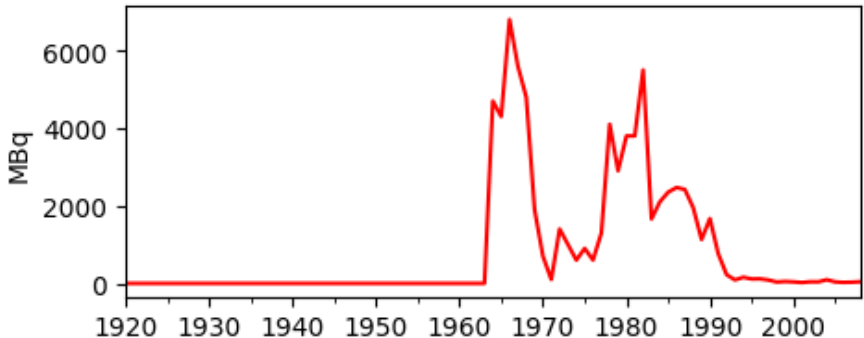


Des archives sédimentaires avec la concentration de césium 137

COVARIABLES

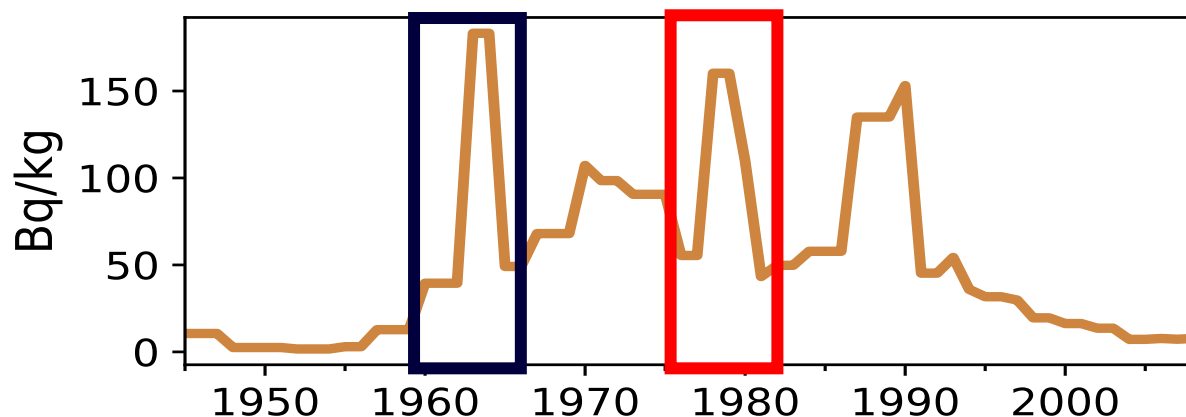


Industrie nucléaire



AUGMENTATION DU NOMBRE DE DONNÉES

Ref : An empirical survey of data augmentation for time series classification with neural networks, Brian Kenji Iwana ,Seiichi Uchida (July 15, 2021)

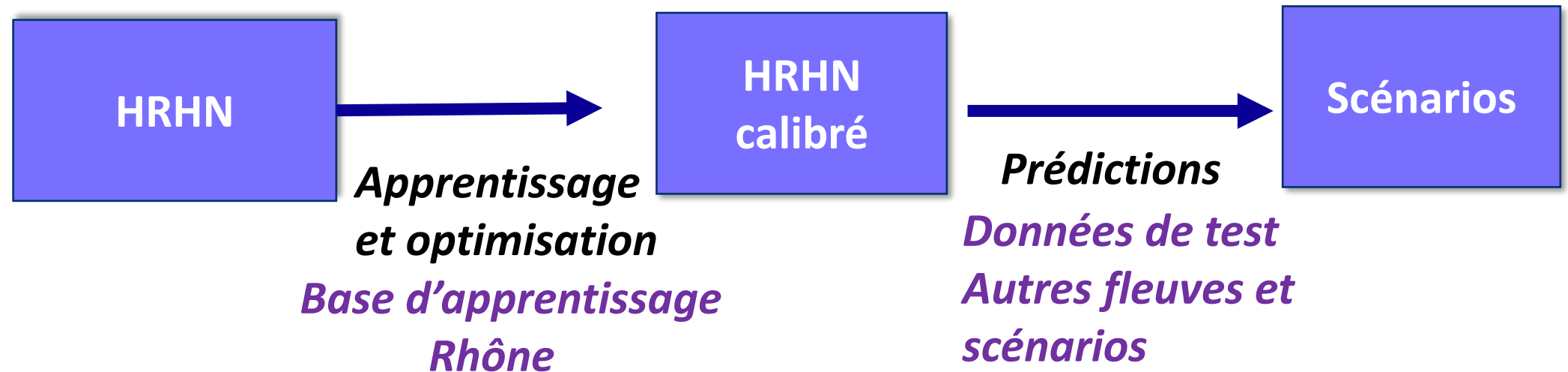


- **1) Réarrangement de chaque série:** découpe en fenêtre temporelle.
- **2) Duplication avec un bruit uniforme**

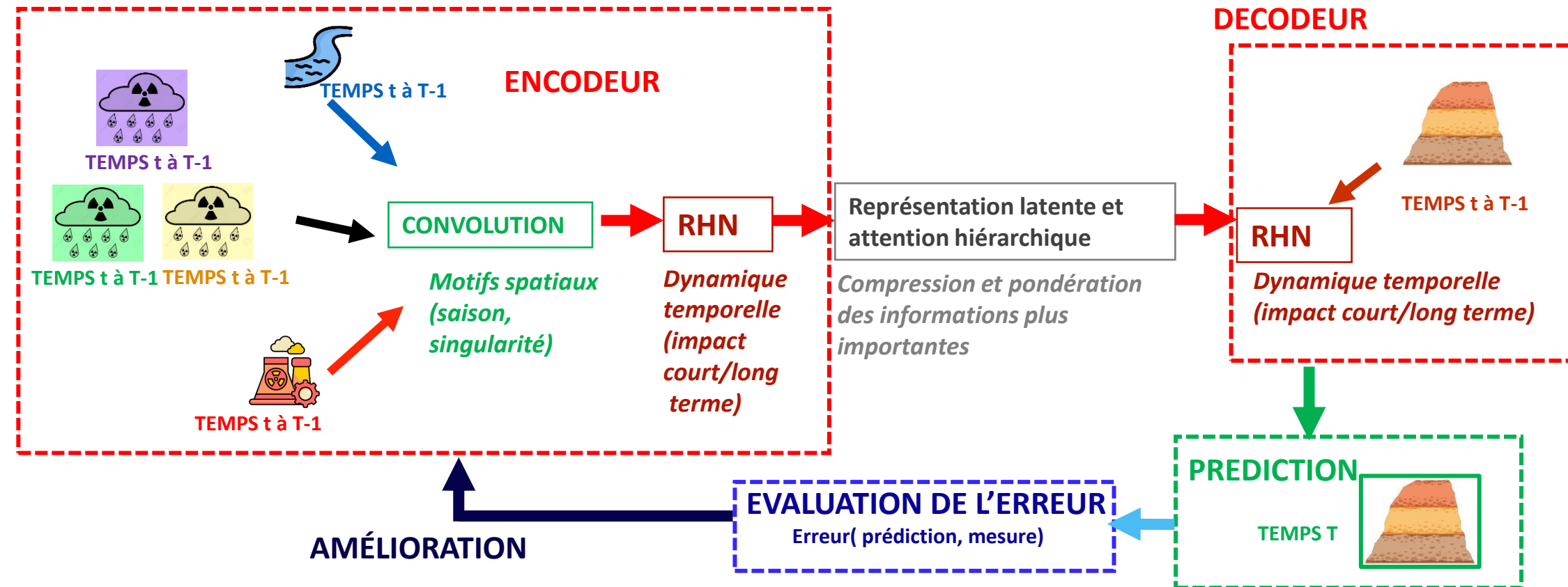
Une plus grande base de données pour une meilleure robustesse du modèle

MODÉLISATION

- Réseau de neurones encodeur-décodeur
- Ref : HRHN (Hierarchical Attention-Based Recurrent Highway Networks) :
Tao AND AL. 2016

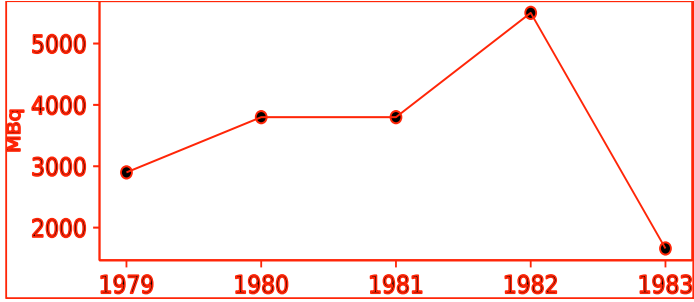


APPRENTISSAGE POUR HRHN : CALIBRATION DES PONDÉRATIONS SUR LE RHÔNE

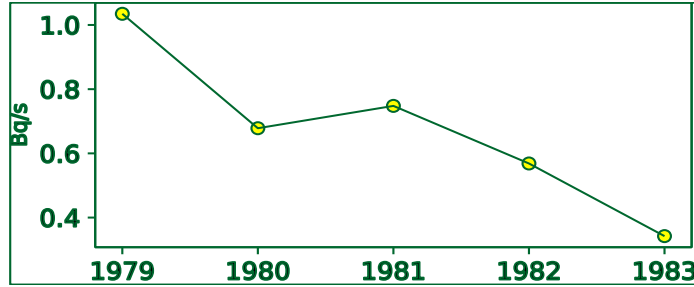




1979 à 1983



1979 à 1983



et pareil



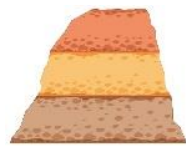
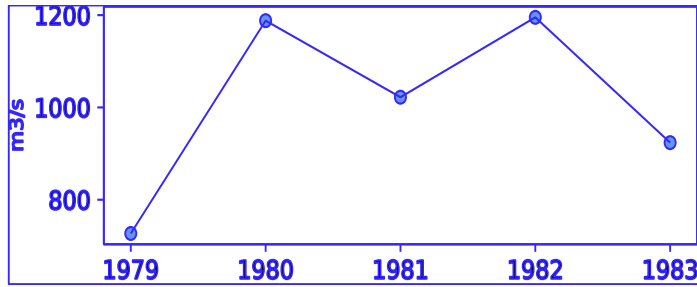
1979 à 1983



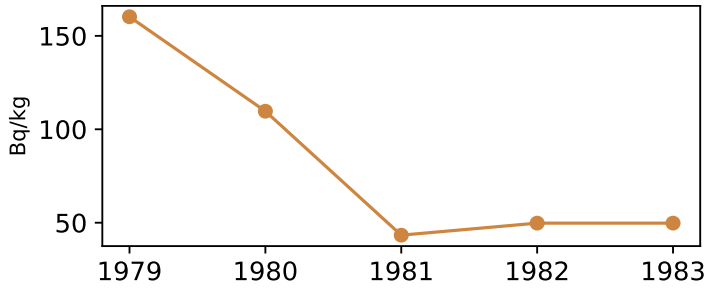
1979 à 1983



1979 à 1983

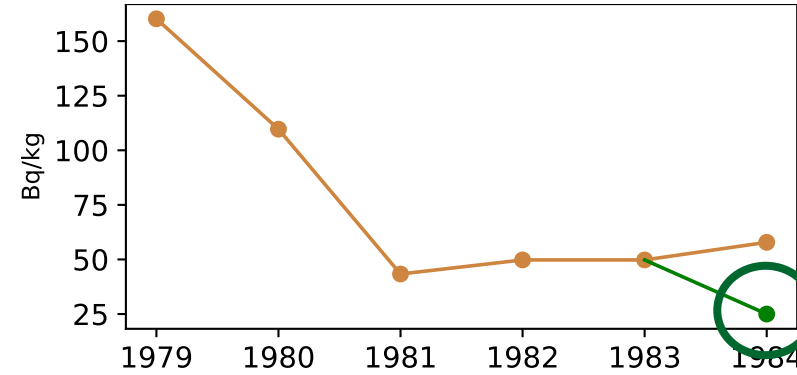


1979 à 1983

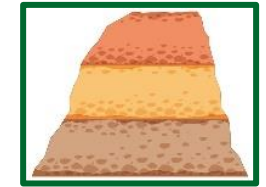


DÉROULEMENT D'UNE PRÉDICTION AUTO-REGRESSIVE (1/2)

HRHN

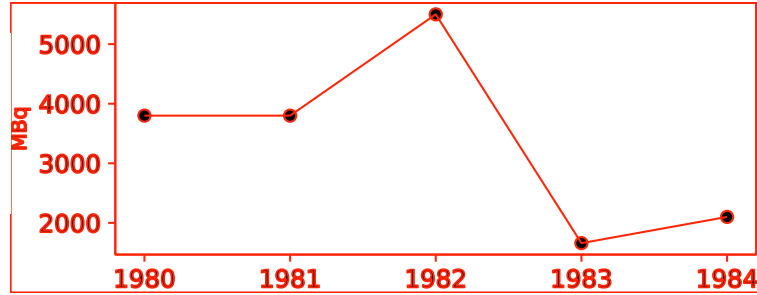


Prédiction en 1984

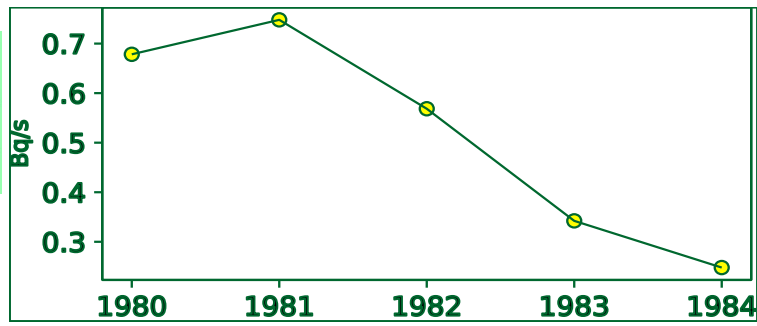




1980 à 1984



1980 à 1984



et pareil



1980 à 1984

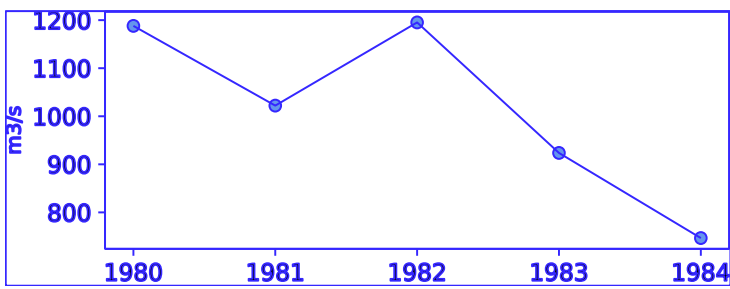


1980 à 1984

HRHN



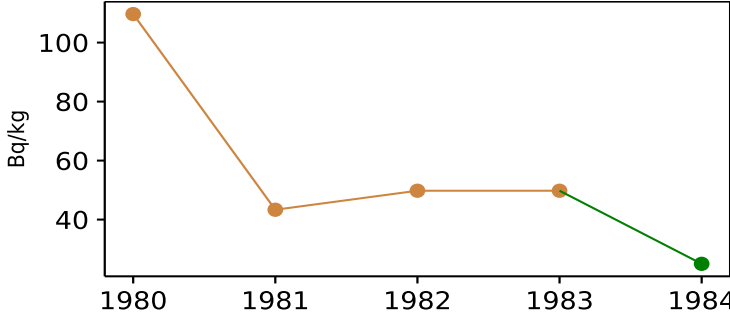
1980 à 1984



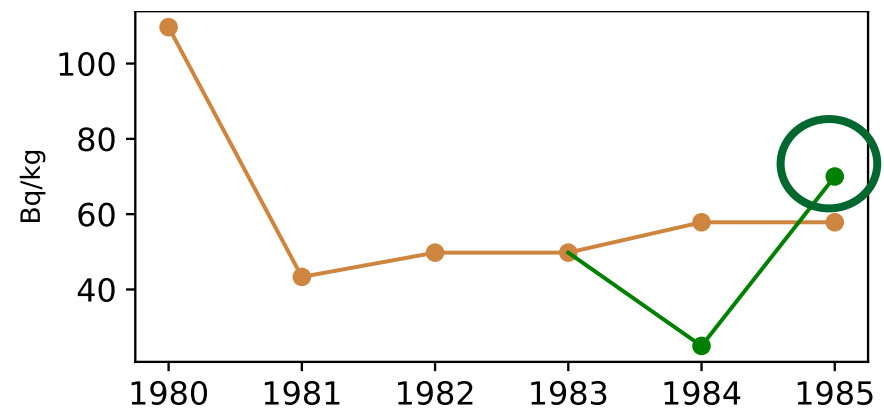
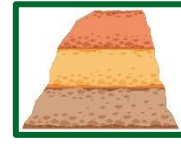
1980 à 1983



1984







DÉROULEMENT D'UNE PRÉDICTION AUTO-REGRESSIVE (2/2)



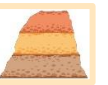
Prédiction en 1985

ANALYSE DE SENSIBILITÉ: ACCUMULATED LOCAL EFFECTS (ALE 1D)

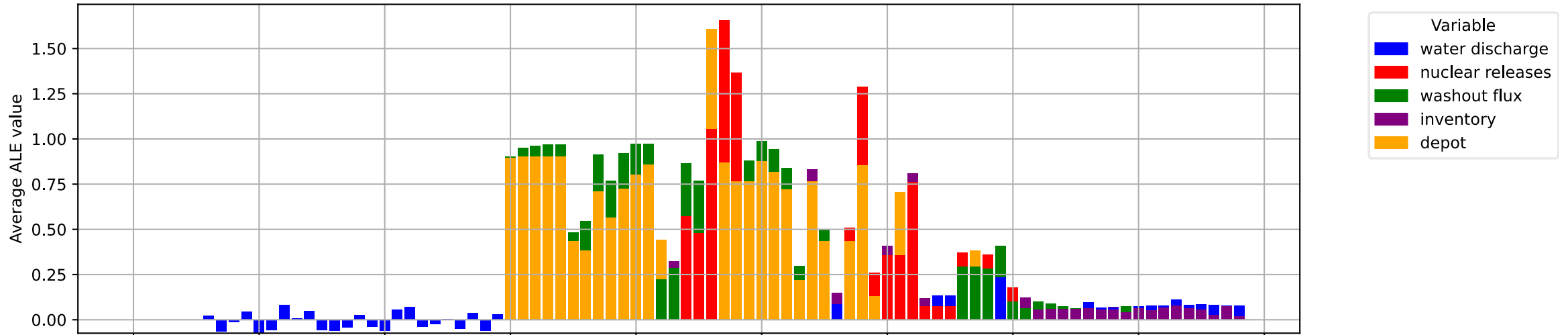
- Mesure comment la prédiction du modèle change quand on modifie une seule variable (par petits morceaux) en gardant les autres constantes.
- ALE  sur une année  Contribution à l'augmentation la valeur prédite
- ALE  sur une année  Contribution à la diminution la valeur prédite
- **Quels sont les sources contaminantes qui contribue le plus à l'augmentation de la concentration de césium 137 ?**
- **Focus sur les deux variables qui contribue le plus par année**



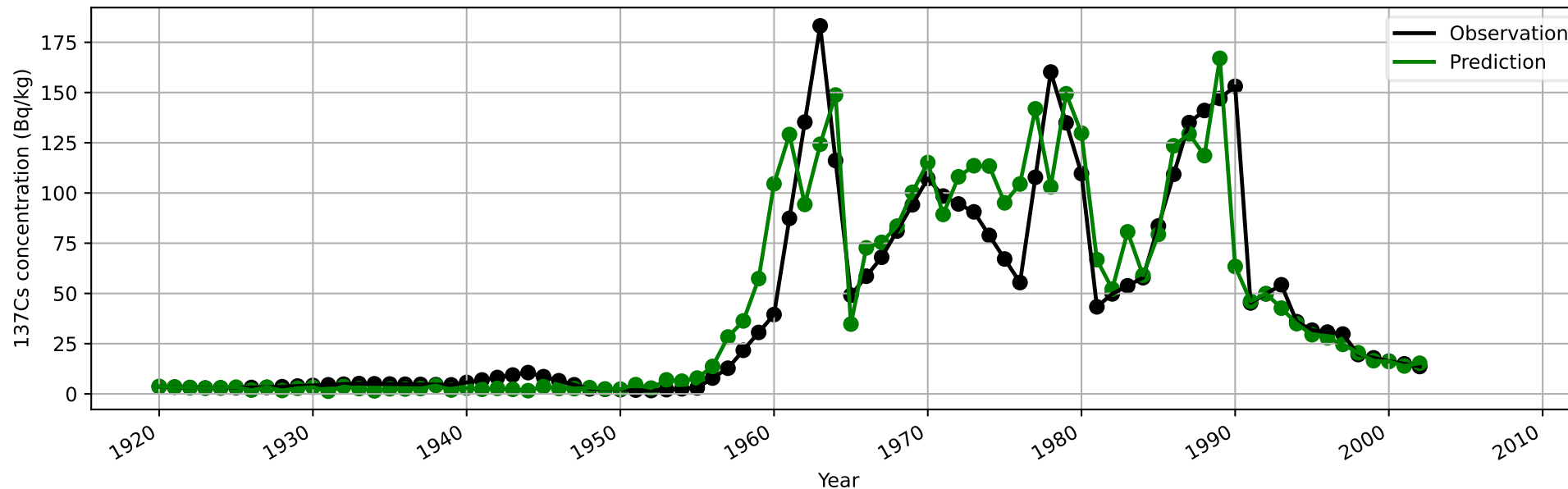
RESULTATS: ARCHIVE DU RHONE 1920-2008



Influence of Top 2 Variables per Year

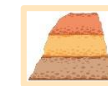


Predicted vs Observed ¹³⁷Cs Concentrations

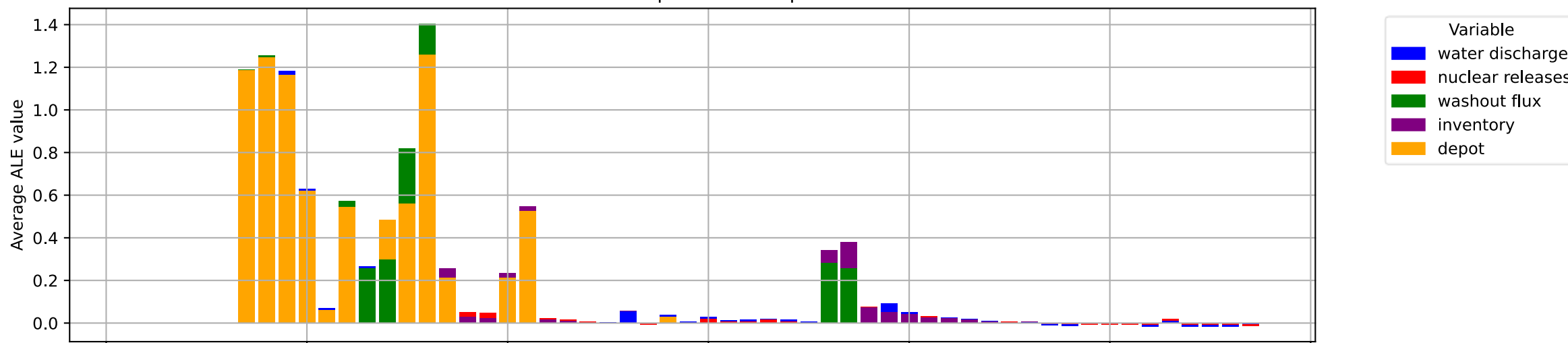




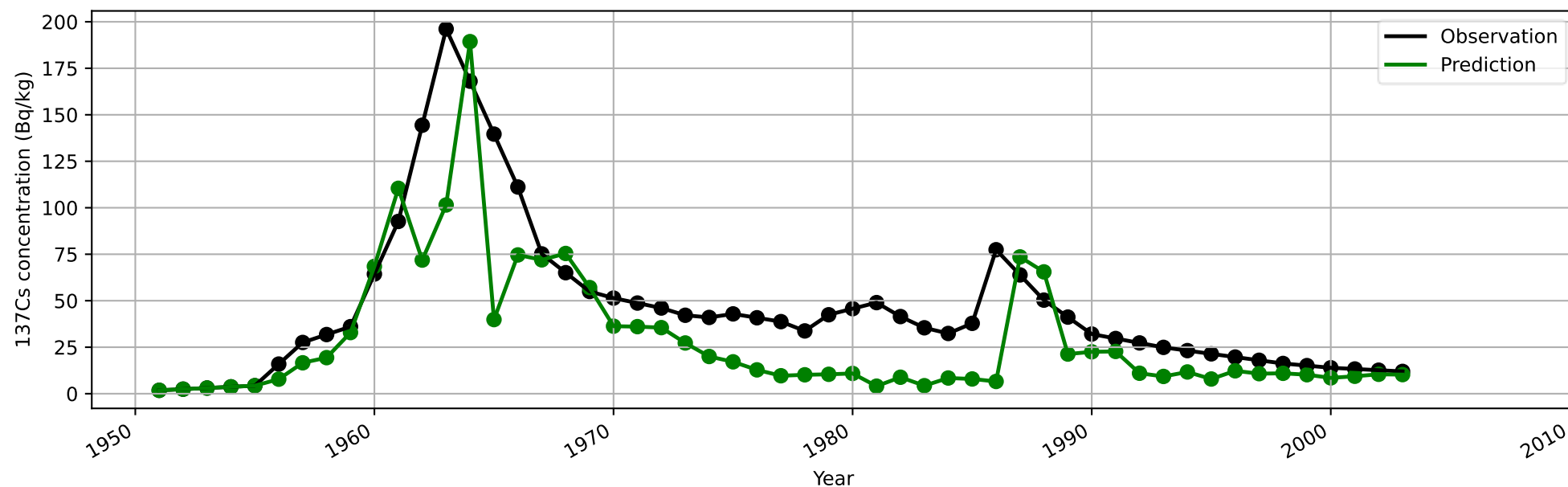
RESULTATS: ARCHIVE DE LA LOIRE



Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations

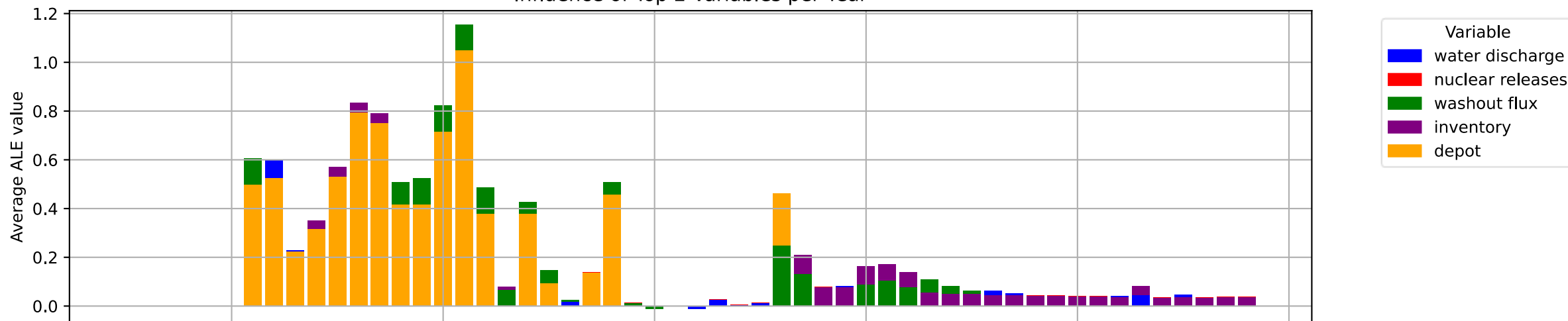




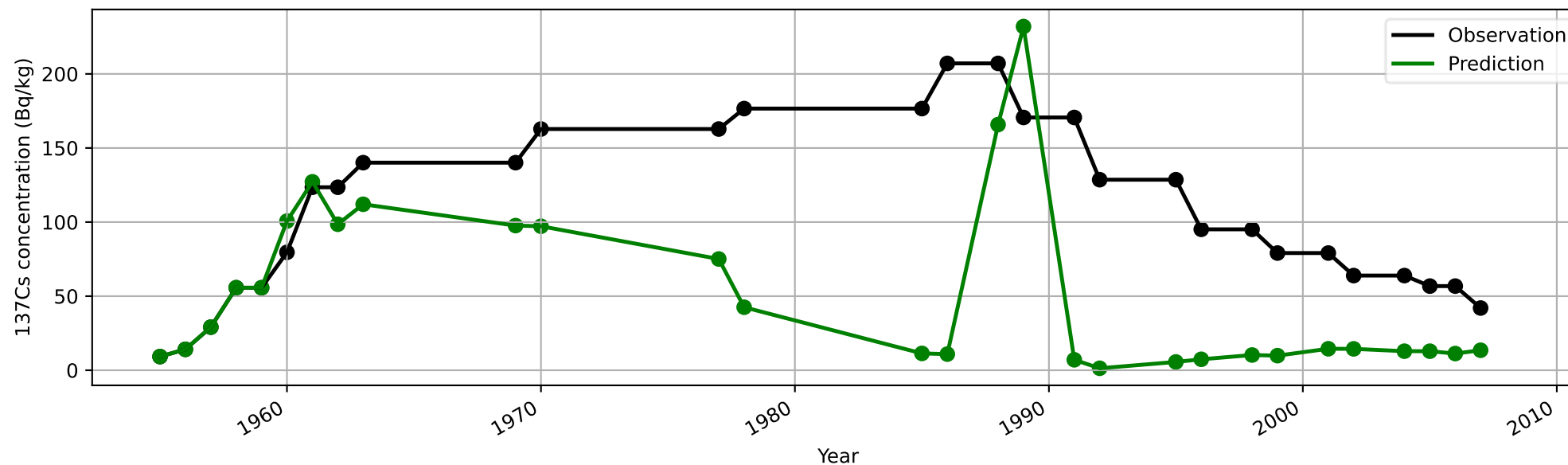
RESULTATS: ARCHIVE DU RHIN



Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations

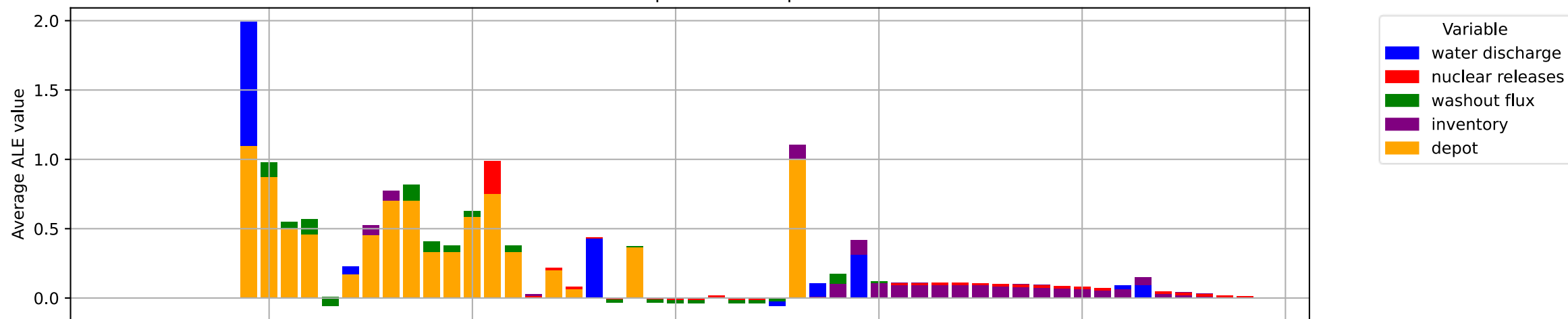




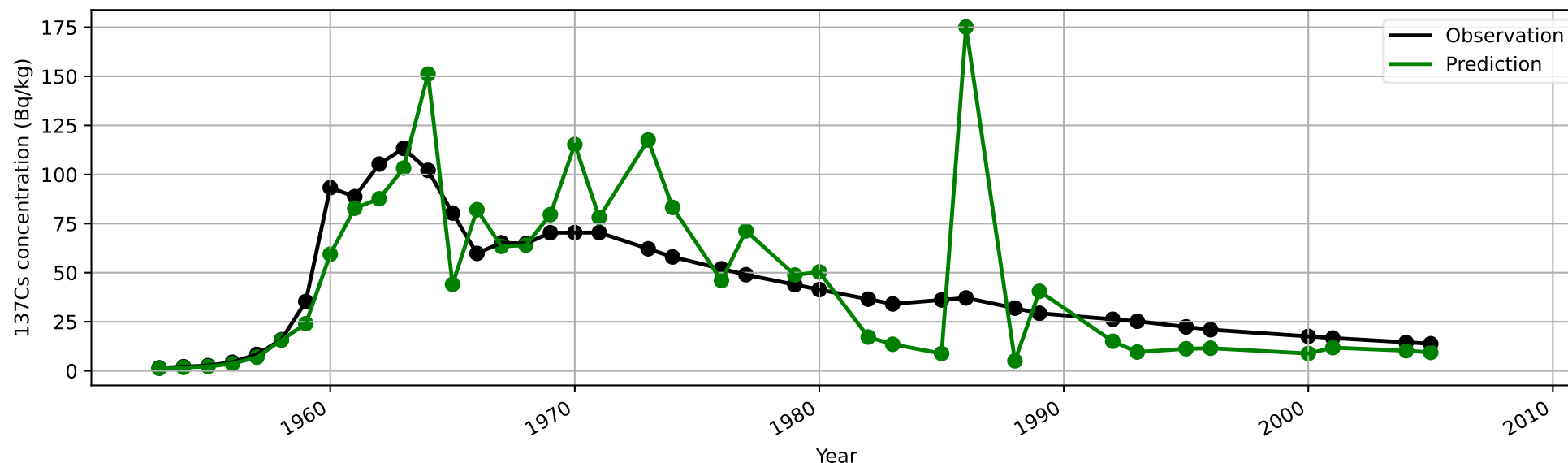
RESULTATS: ARCHIVE DE LA MEUSE



Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations



POINTS PRINCIPAL DE L'INTERPRETATION DE L'ALE

Dépôt atmosphérique :



Principal facteur expliquant la contamination au césium-137 durant **la période des essais nucléaires**.

Lessivage :



Dominant en 1986 (caractéristique Tchernobyl) : un transfert contrôlé par les précipitations et le ruissellement.

Inventaire :



Mémoire environnementale : stock résiduel de césium-137 dans l'environnement, mobilisable par érosion ou crue

Débit :



Joue un rôle **modulateur** : atténue ou amplifie l'effet d'autres variables selon le contexte hydrologique.

Rejet :

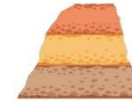


Dominance identifiée **uniquement lorsque les données sont précises et bien renseignées.**

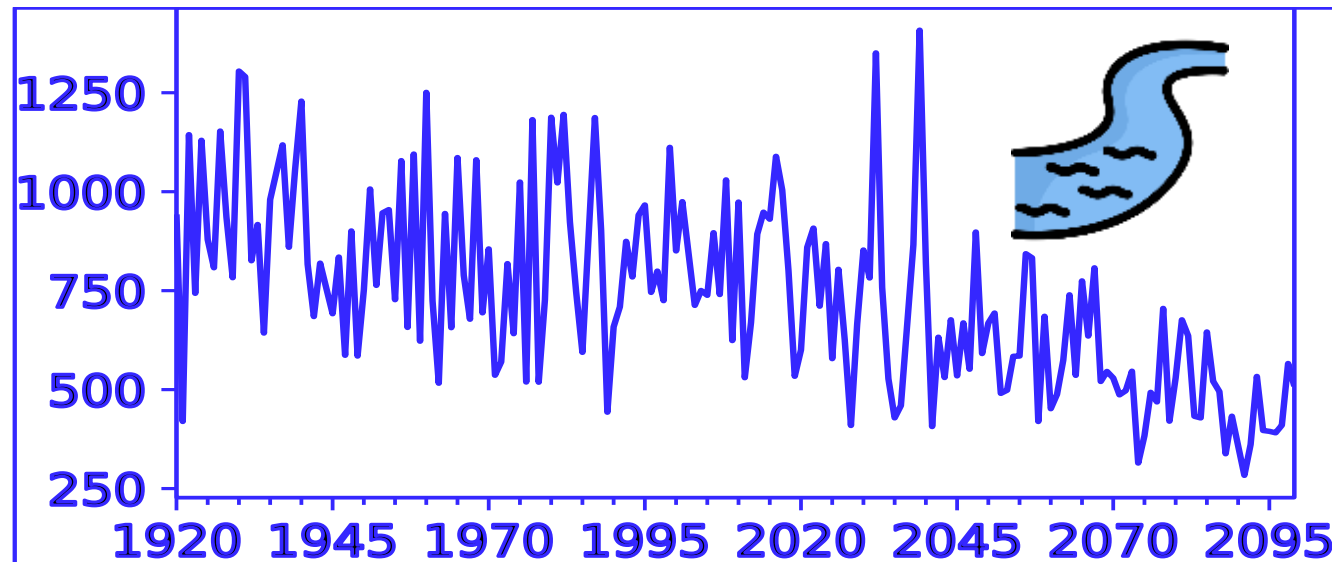
SCENARIOS : DE 1920 JUSQU'EN 2100

- Réaliser des prédictions de la concentration du césium 137 sur la période 1920-2100 avec le modèle HRHN avec le début de la chronique (historique) :

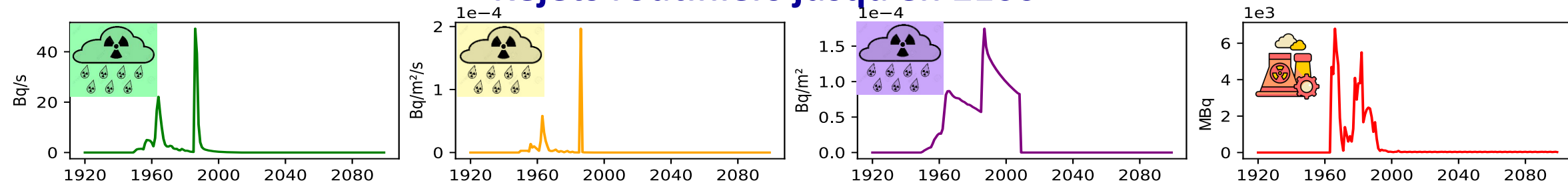
1920	1921	1922	1923
3,64	3,39	3,15	2,91



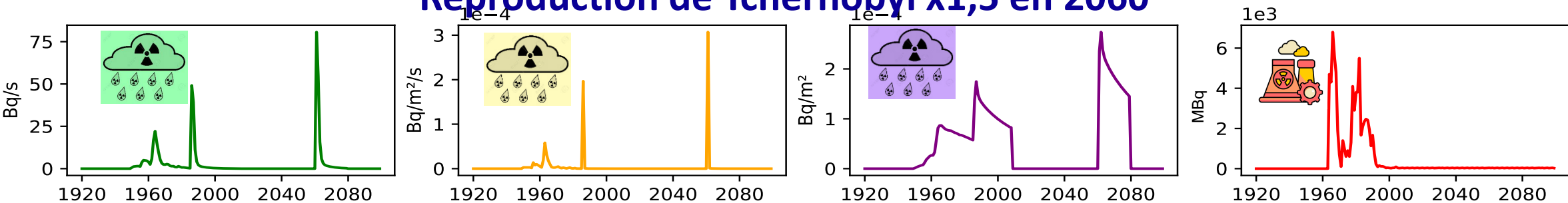
- Période 1920-2100 avec un débit progressivement plus faible



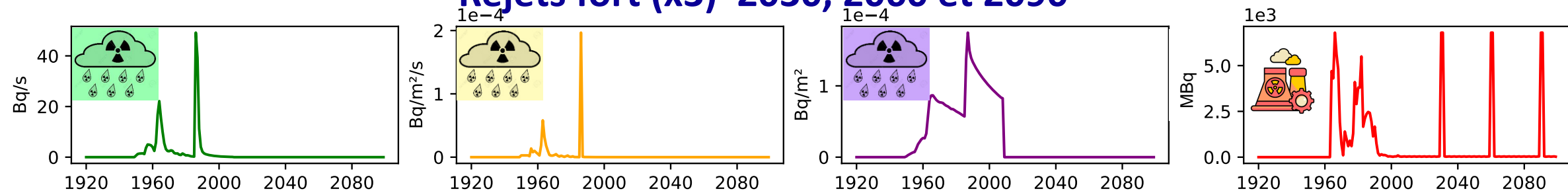
Rejets routiniers jusqu'en 2100



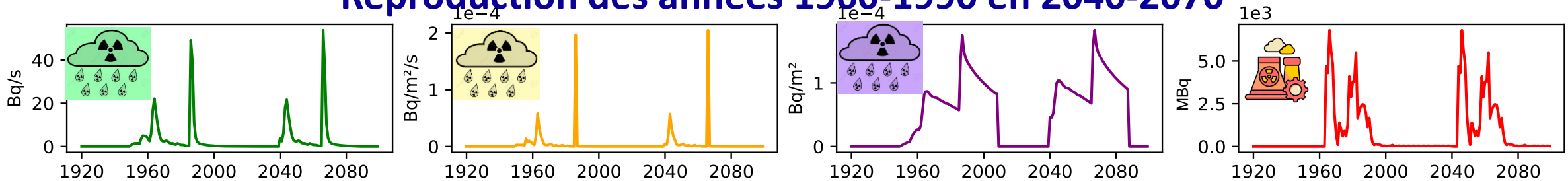
Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



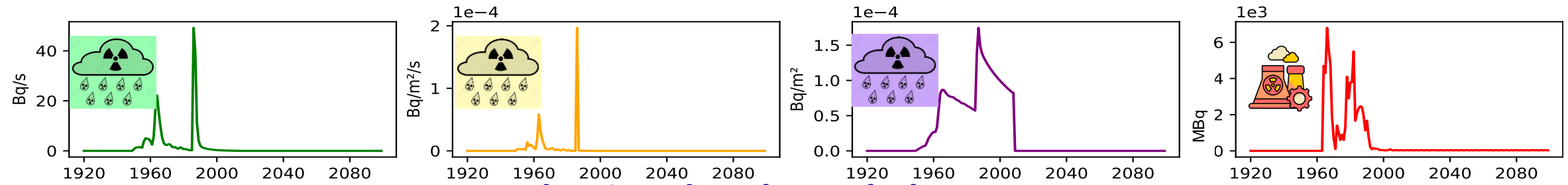
Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090



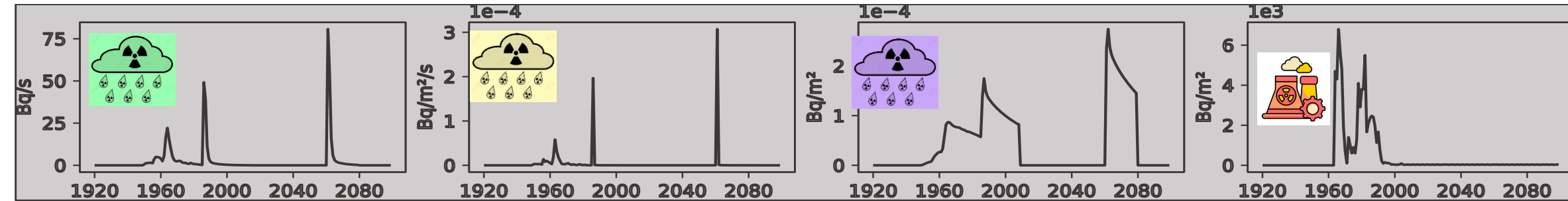
Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070



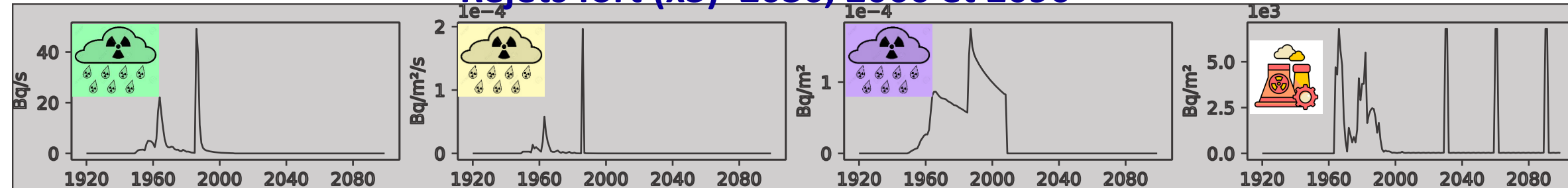
Rejets routiniers jusqu'en 2100



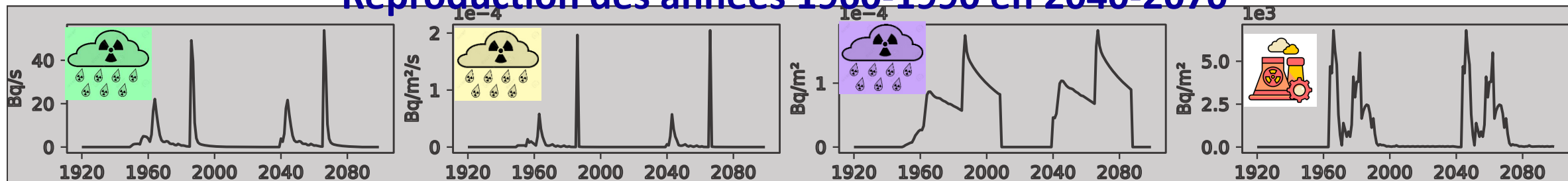
Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

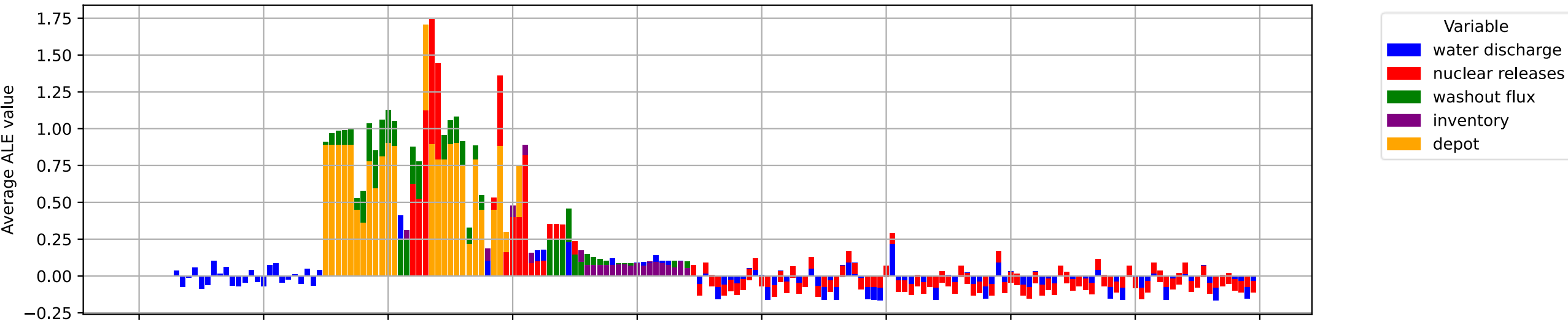


Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

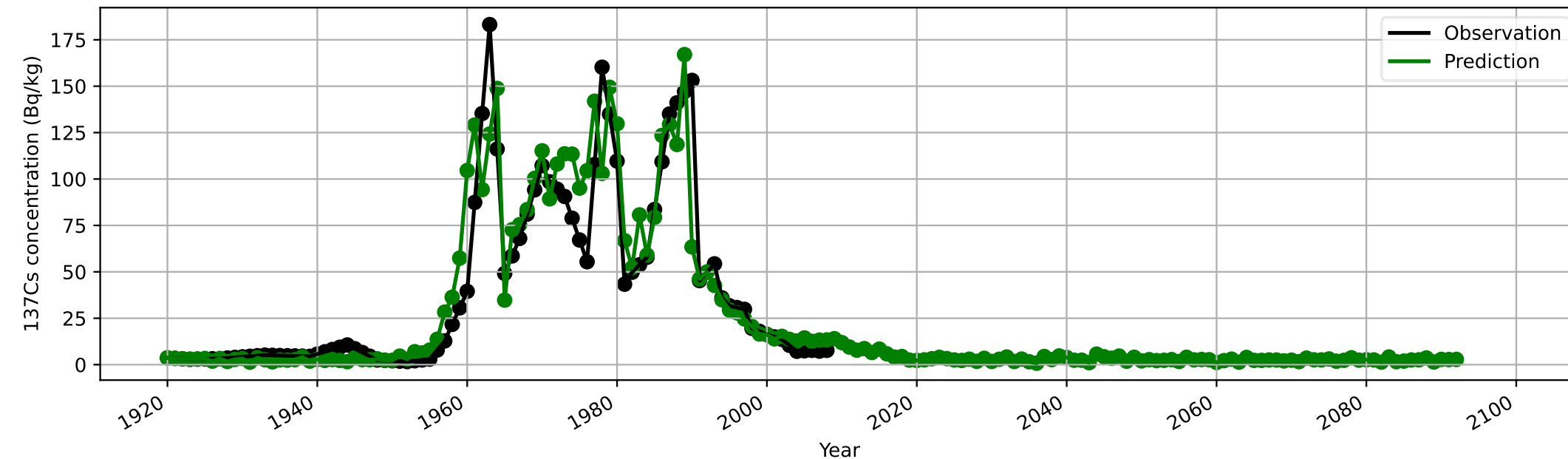


SCENARIOS : REJETS ROUTINIERS JUSQU'EN 2100

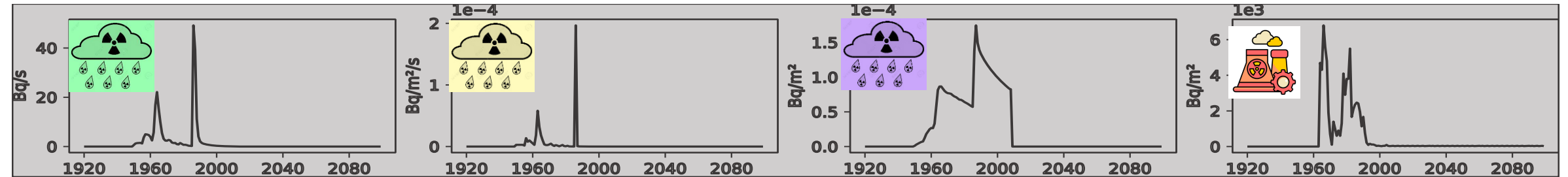
Influence of Top 2 Variables per Year



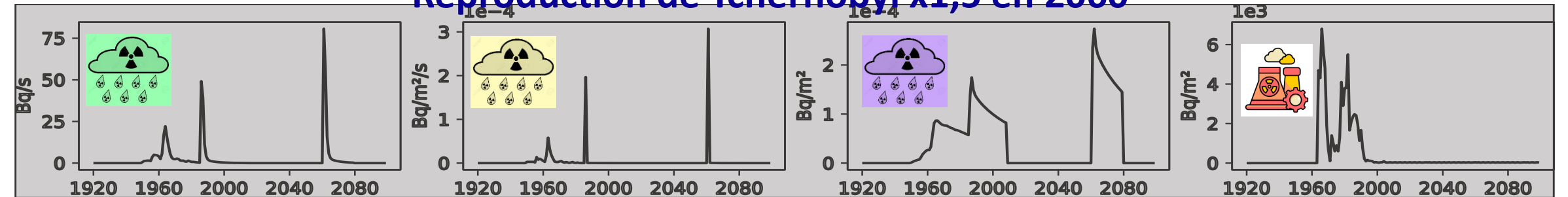
Predicted vs Observed ¹³⁷Cs Concentrations



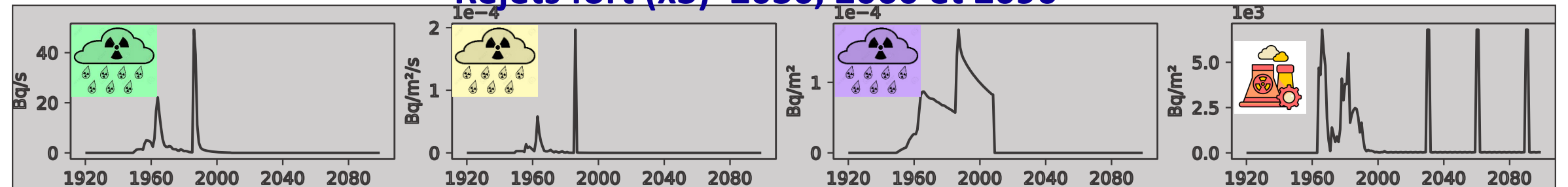
Rejets routiniers jusqu'en 2100



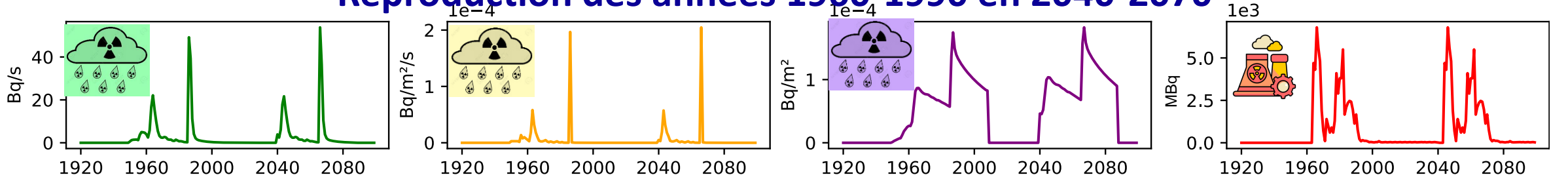
Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

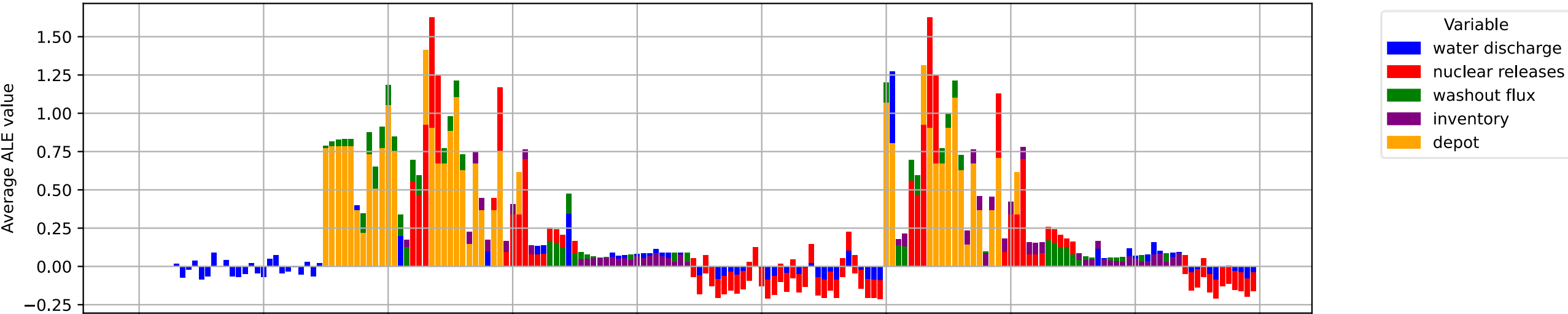


Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

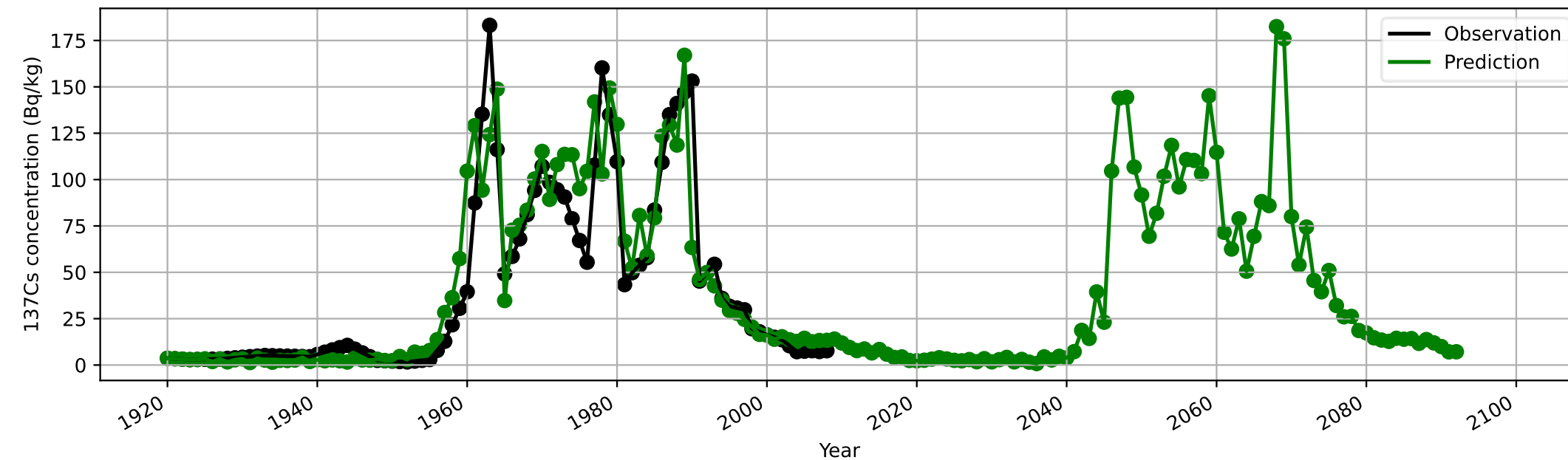


SCENARIOS : RÉPÉTITION 60-90

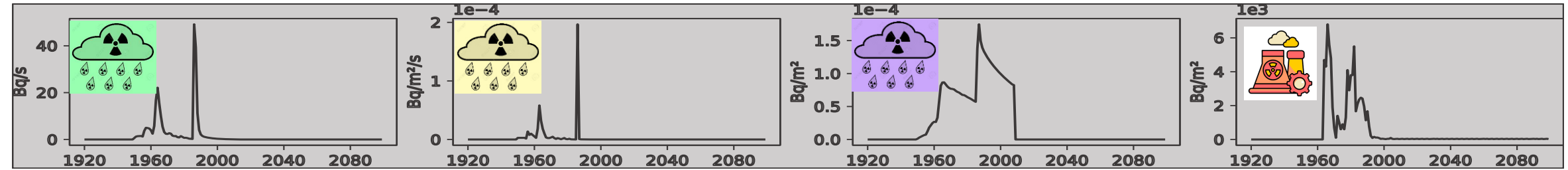
Influence of Top 2 Variables per Year



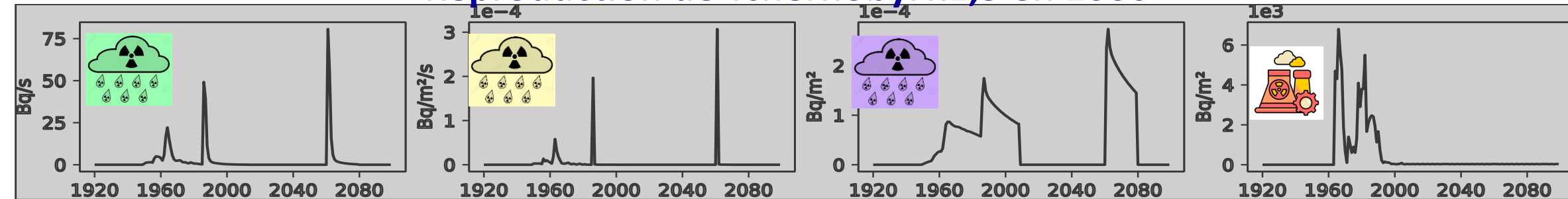
Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations



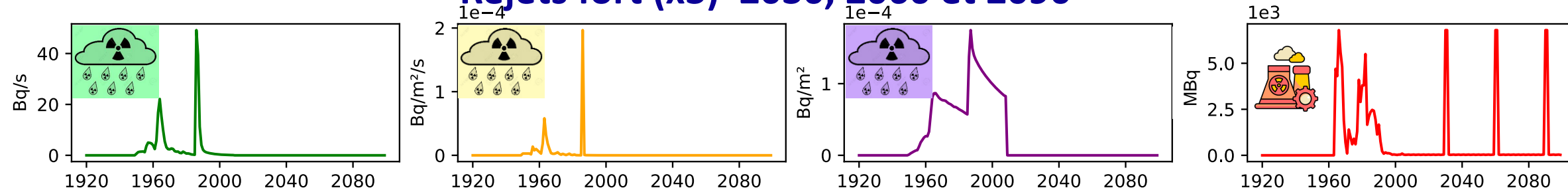
Rejets routiniers jusqu'en 2100



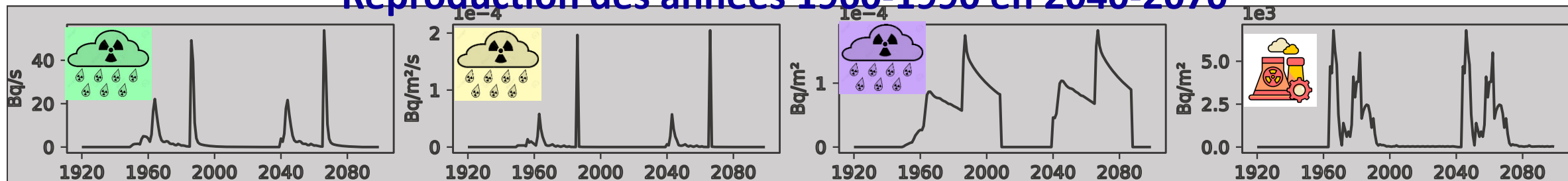
Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

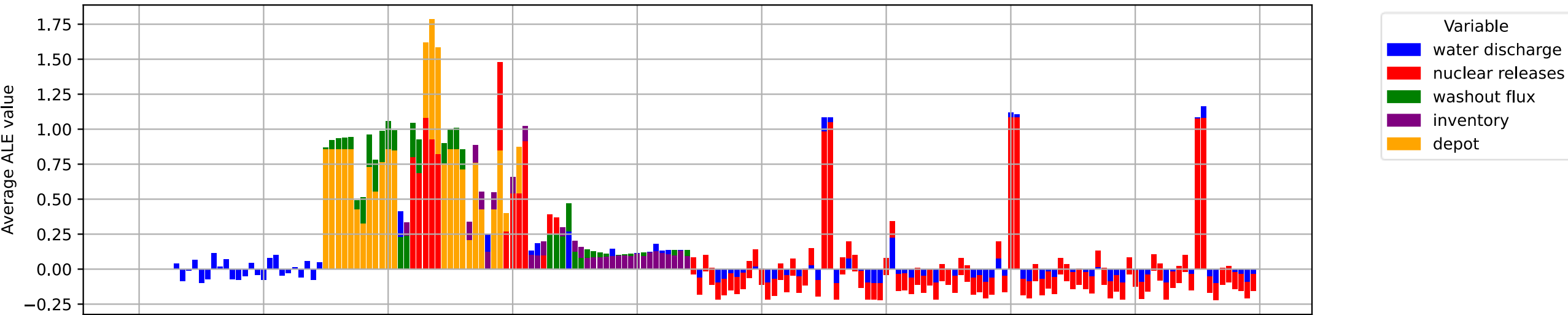


Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

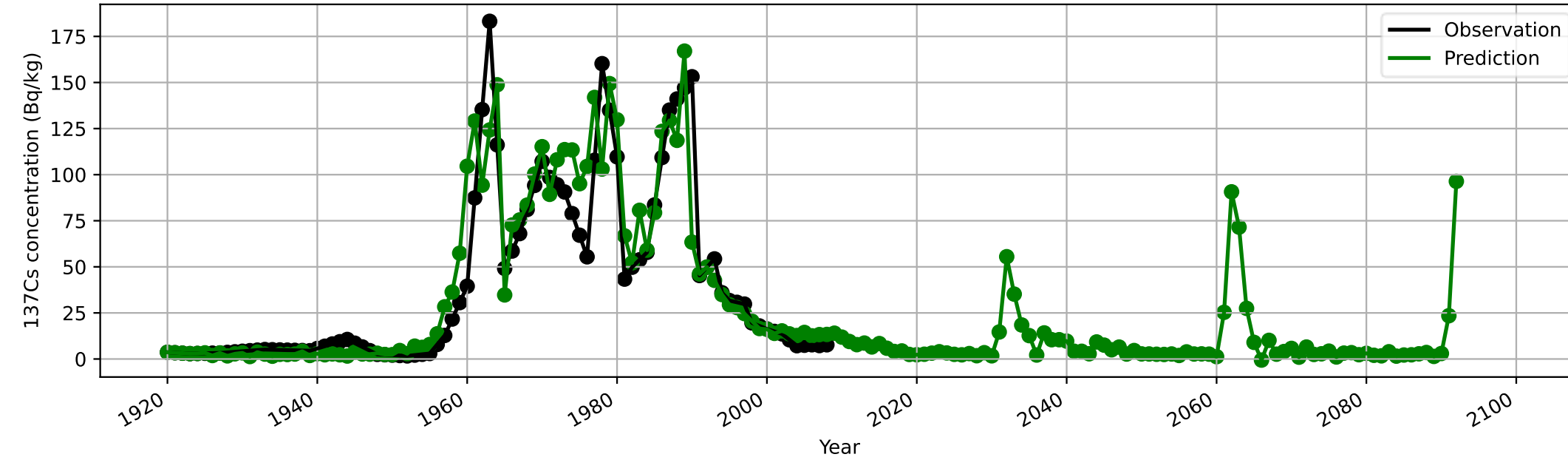


SCENARIOS : REJETS FORTS

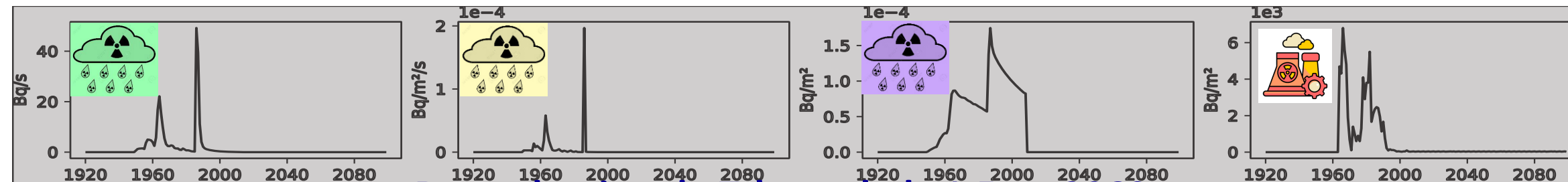
Influence of Top 2 Variables per Year



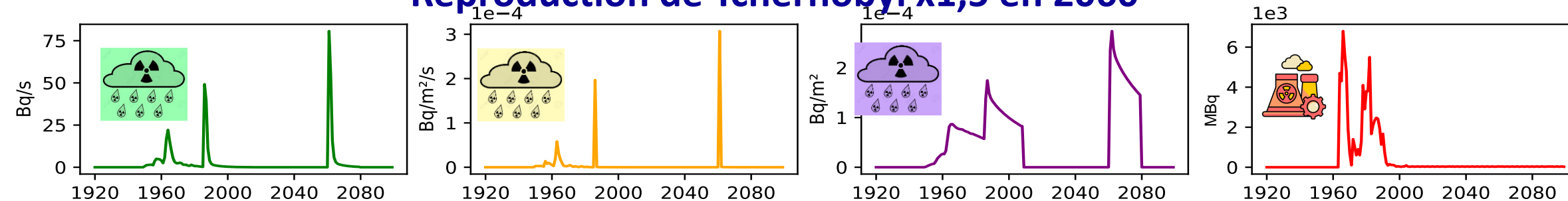
Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations



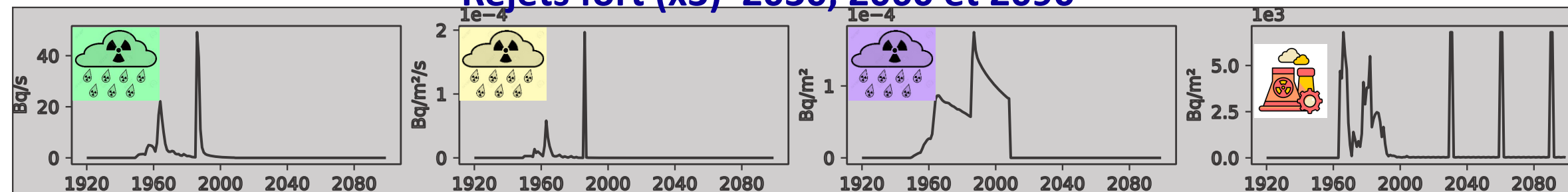
Rejets routiniers jusqu'en 2010



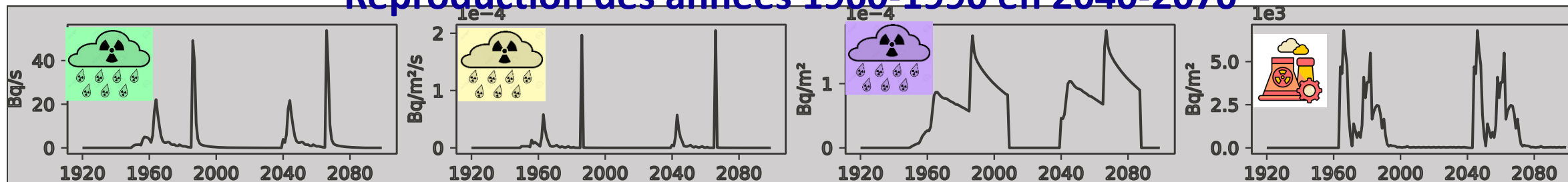
Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

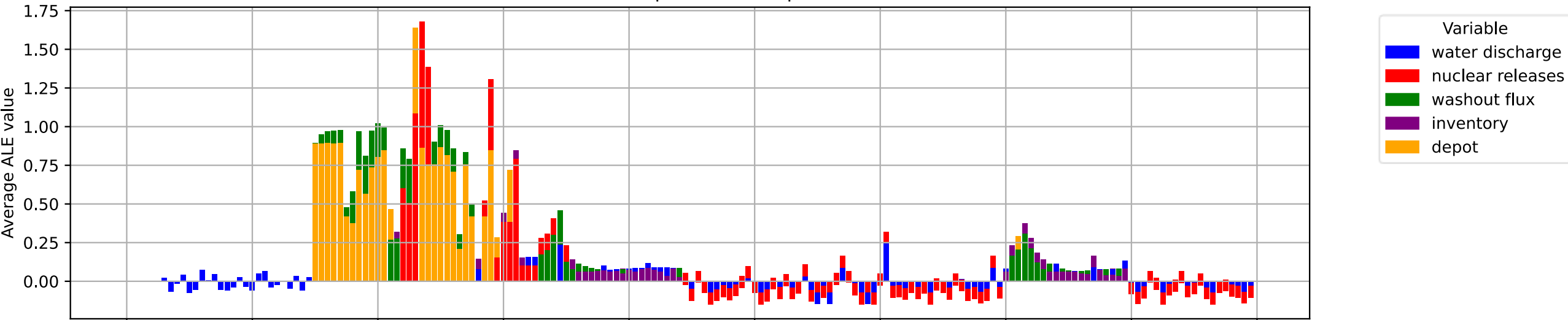


Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

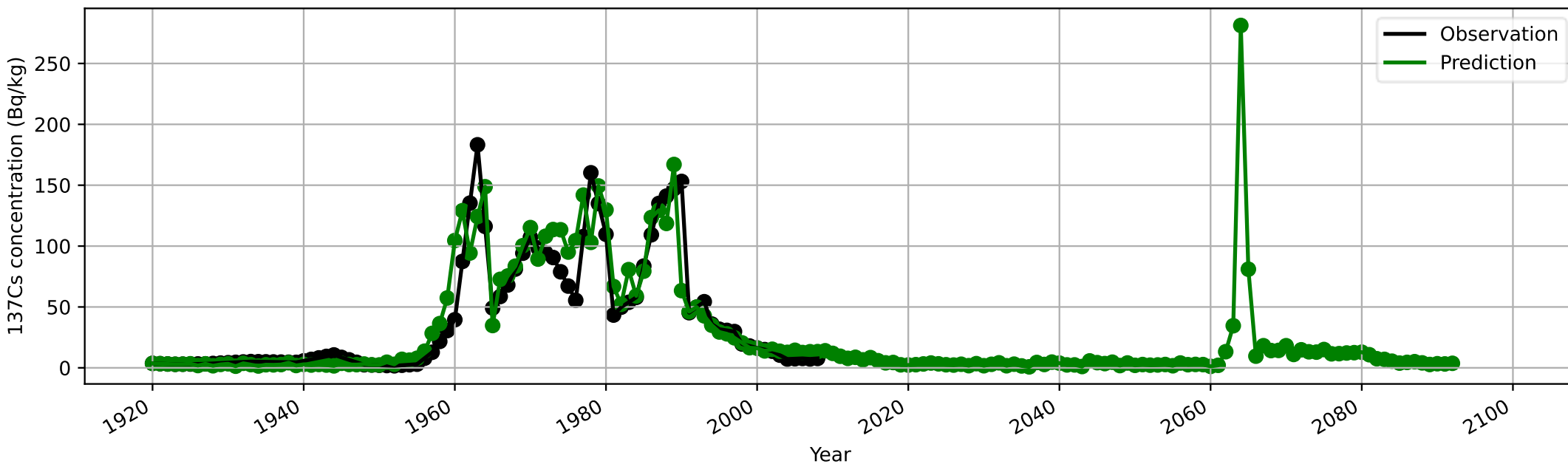


SCENARIOS : RÉPÉTITION TCHERNOBYL

Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed ^{137}Cs Concentrations



CONCLUSION

- Bonnes performances de HRHN sur la reconstruction d'archives sur des fleuves différents dans le cas du Césium137
- Adaptation à de multiples scénarios sur le Rhône 2008-2100

AMELIORATIONS

- ALE 2D : mesurer les contributions croisées. Quels effets conjoints entre le débit et les apports ?
- Méthode de Génération alternative de données (GAN)

APPLICATIONS

- Le modèle HRHN pour le cas du Potassium 40 : Valérie Nicoulaud-Gouin

ANNEXE HRHN

Entrées : séries exogènes
(batch_size,nbre va, taille historique)

$$\begin{pmatrix} x_1^1, x_2^1, \dots, x_{(T-1)}^1 \\ x_1^2, x_2^2, \dots, x_{(T-1)}^2 \\ \vdots \\ x_1^N, x_2^N, \dots, x_{(T-1)}^N \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} X_{(T-1)} &= (x_{(T-1)}^1, x_{(T-1)}^2, \dots, x_{(T-1)}^N) \\ &\vdots \\ X_2 &= (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^N) \\ X_1 &= (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^N) \end{aligned}$$

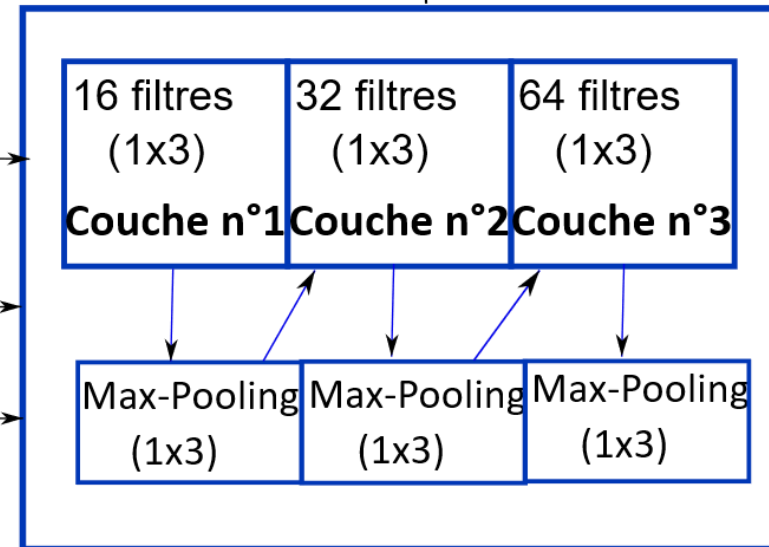
Coupe temporelle
(batch_size,taille historique,nbre va)

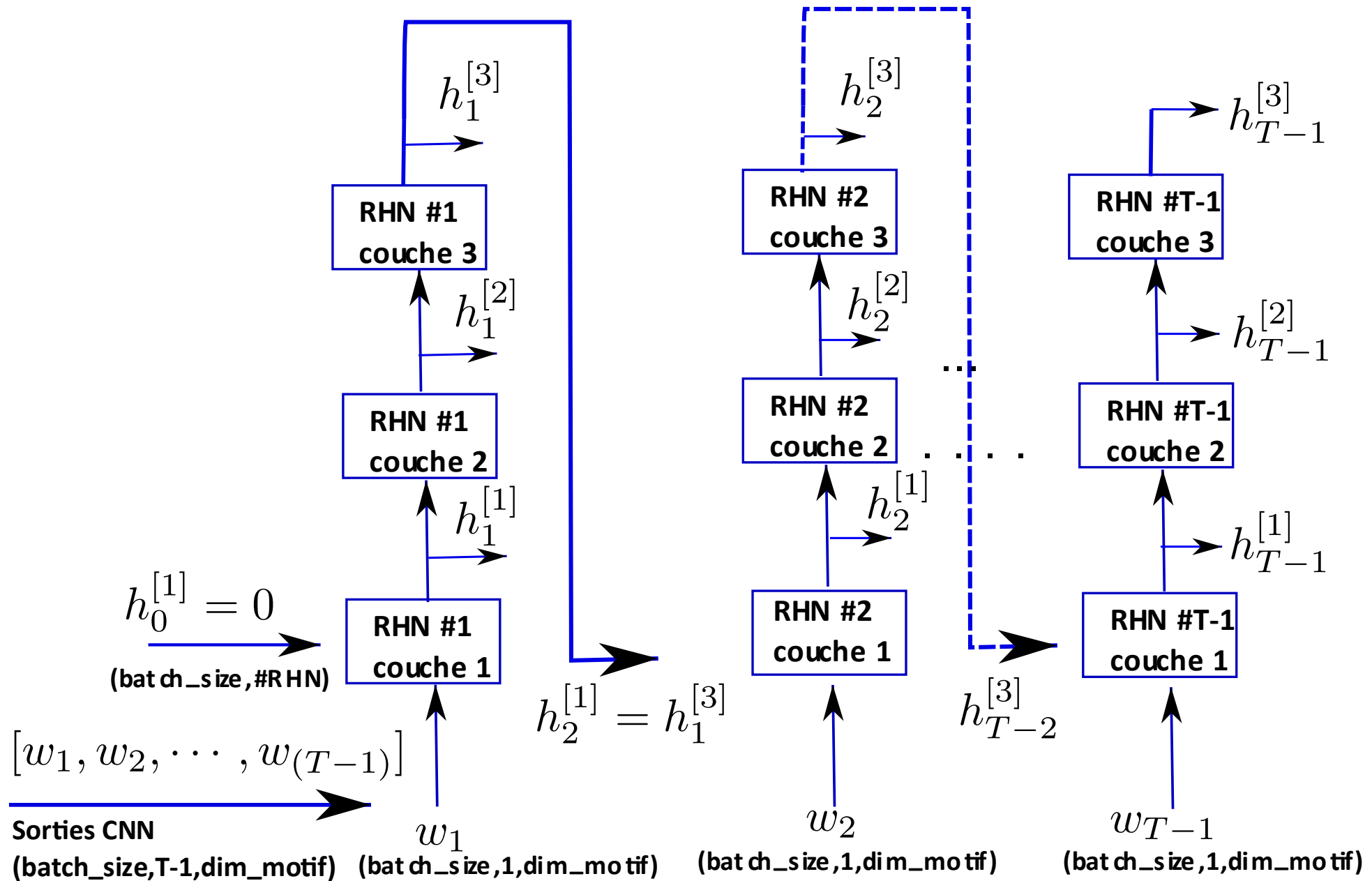
Sorties : Relations spatiales
(batch_size,T-1,dim_motif)
 $[w_1, w_2, \dots, w_{(T-1)}]$

Couche dense
 units = dim_motif

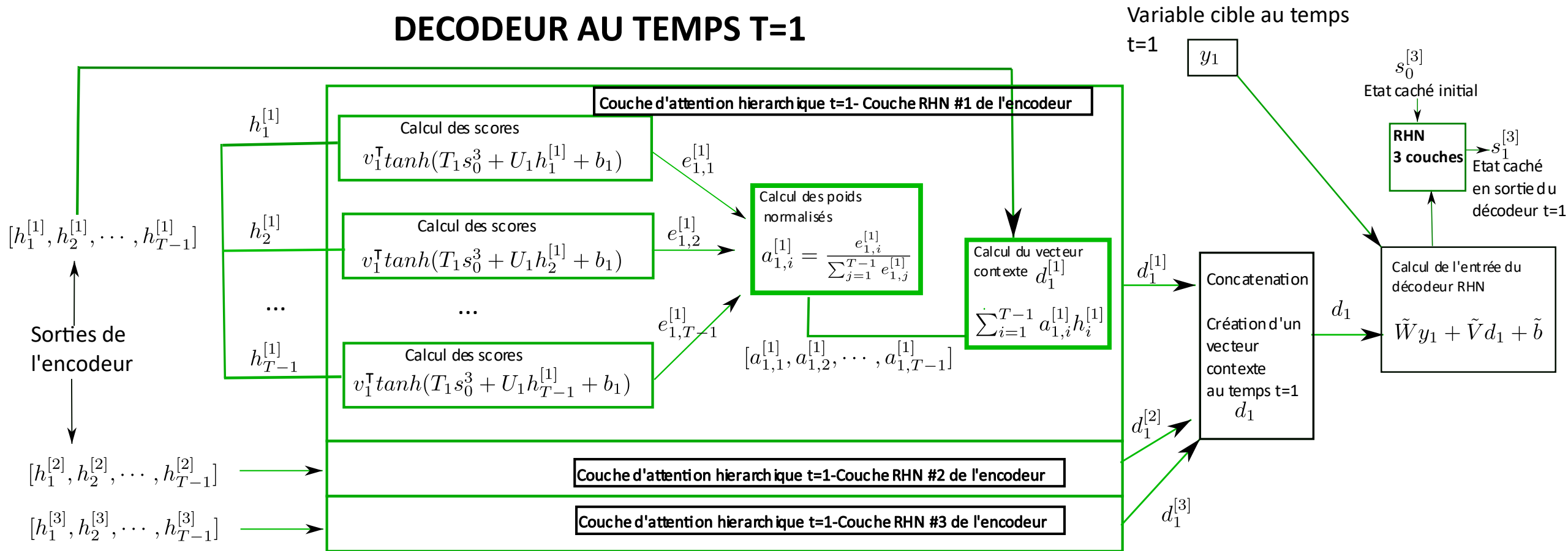
(batch_size,T-1,dim pooling,64)

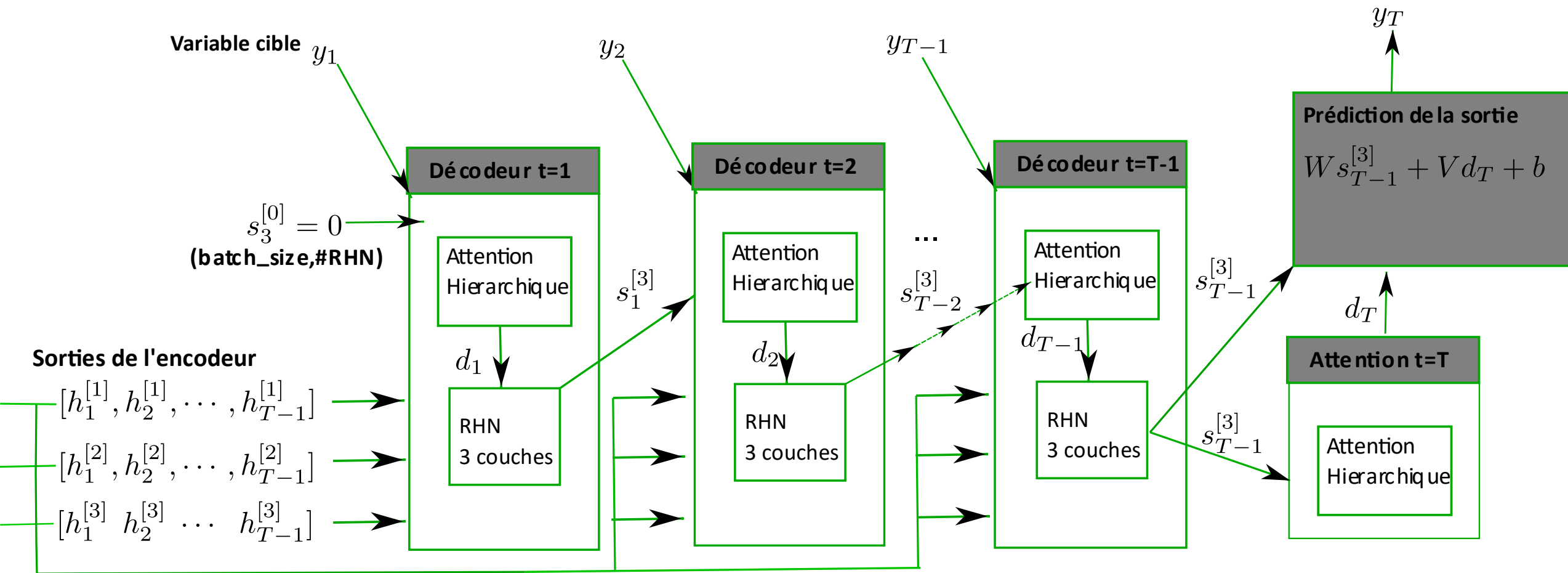
T-1 réseaux de convolutions CNN 1D



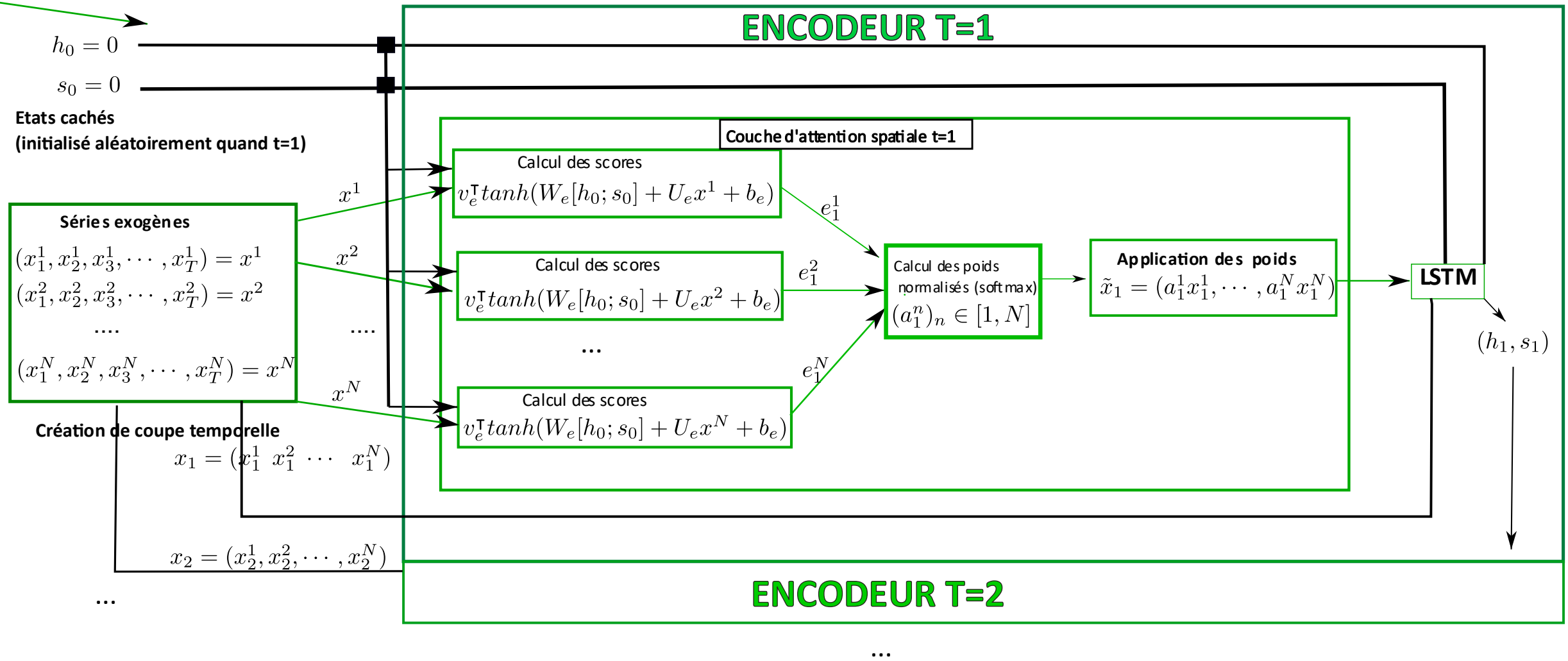


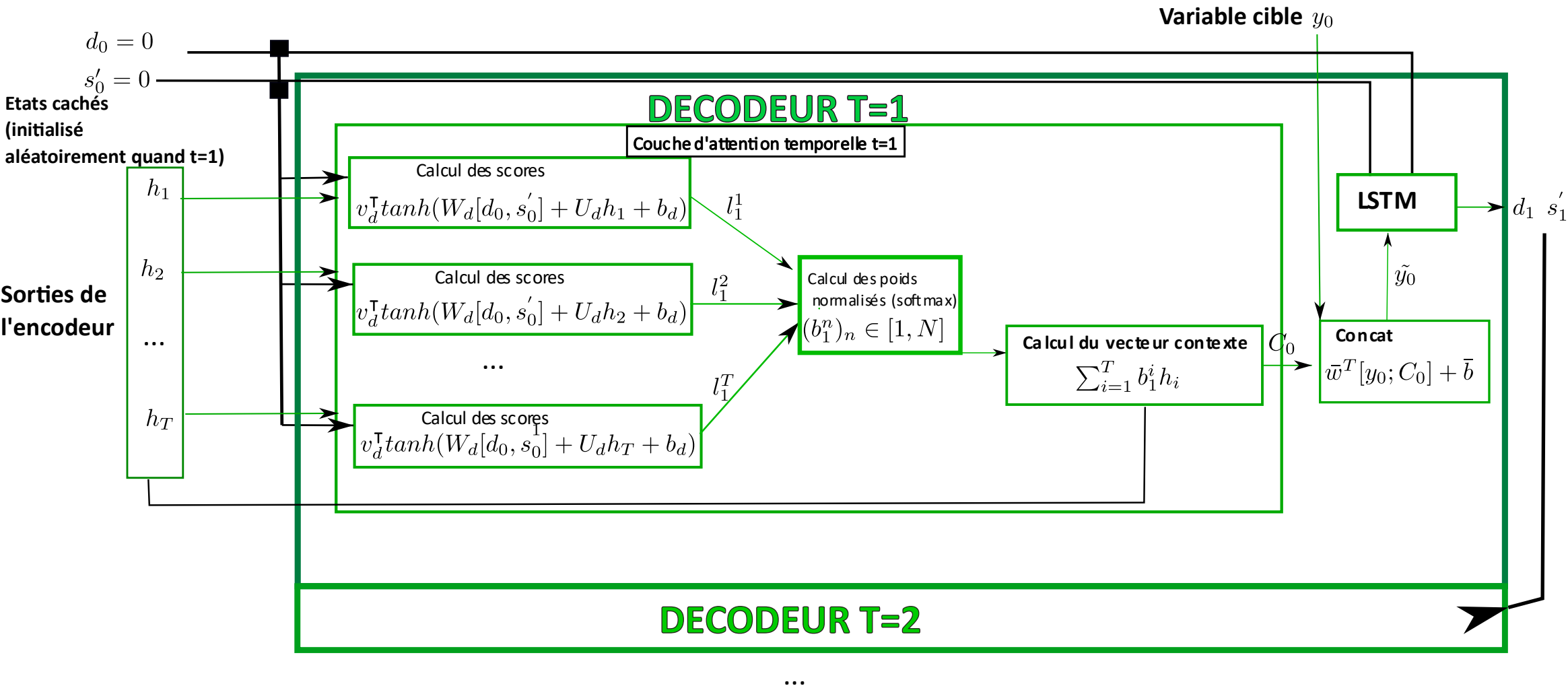
DECODEUR AU TEMPS T=1





ANNEXE DA-RNN





Variable cible

y_{T-1}

d_{T-1}
 s'_{T-1}

Etats cachés du décodeur
au temps T-1

$[h_1, h_2, \dots, h_T]$
Sortie de l'encodeur

Décodeur t=T

Attention
temporelle
+
LSTM

Un état caché t=T

d_T

C_T
Vecteur contexte
au temps t=T

Estimation sortie

$$v_z^T (W_z [d_T; C_T] + b_w) + b_v$$

y_T

ANNEXE DONNEES

APPORT DES BASSINS VERSANTS

DONNÉES DE DÉPÔT ATMOSPHÉRIQUE ($Bq.m^{-2}.s^{-1}$) DE LA SEINE ESTIMÉ À PARTIR DE CHRONIQUES D'ACTIVITÉ DANS L'AIR ET L'EAU DE PLUIE

FLUX DE LESSIVAGE ($Bq.s^{-1}$) EST OBTENU PAR LE PRODUIT DE CONVOLUTION DU FLUX DE DÉPÔT ATMOSPHÉRIQUE ET D'UNE FONCTION DE TRANSFERT F

INVENTAIRE ($Bq.m^{-2}$) EST OBTENU PAR LE PRODUIT DE CONVOLUTION DU FLUX DE DÉPÔT ATMOSPHÉRIQUE ET D'UNE FONCTION DE TRANSFERT F*

DONNÉES DES CENTRALES NUCLÉAIRES

