



Autorité de  
sûreté nucléaire  
et de radioprotection

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

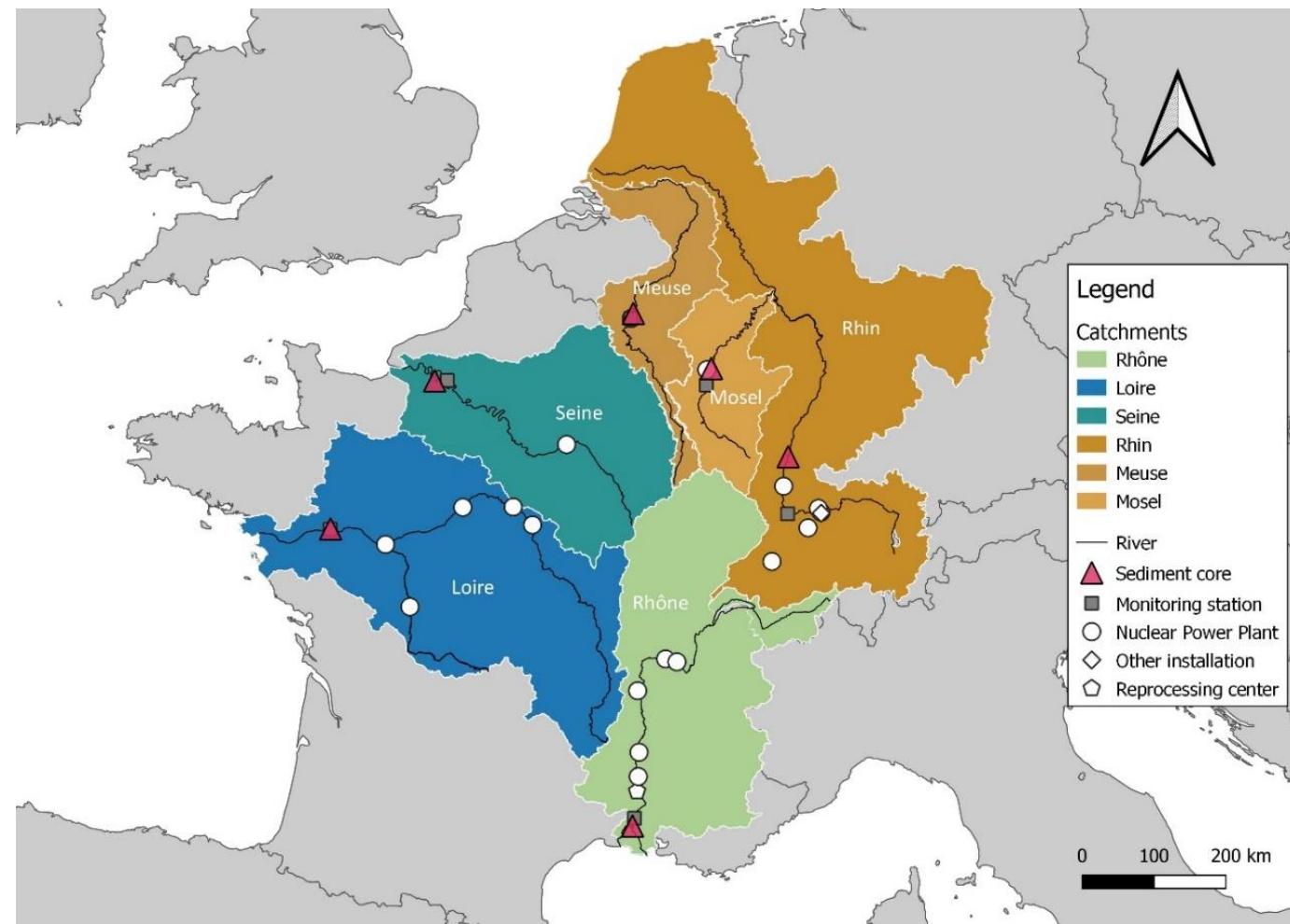
**OBJECTIF :**  
**PRÉDIRE LA CONCENTRATION DE**  
**CÉSIUM-137 DANS LES ARCHIVES**  
**SÉDIMENTAIRES DANS 6 FLEUVES**  
**FRANÇAIS**

**SOMMAIRE :**

**1- LES DONNÉES**

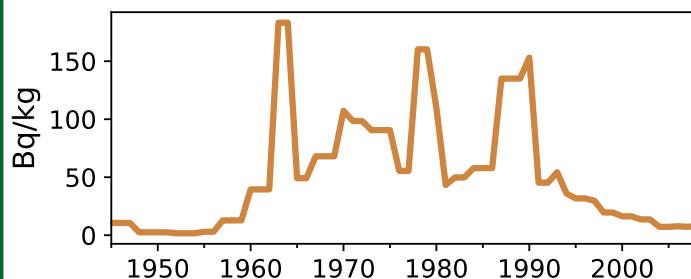
**2- LE MODÈLE**

**3- RÉSULTATS ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ**



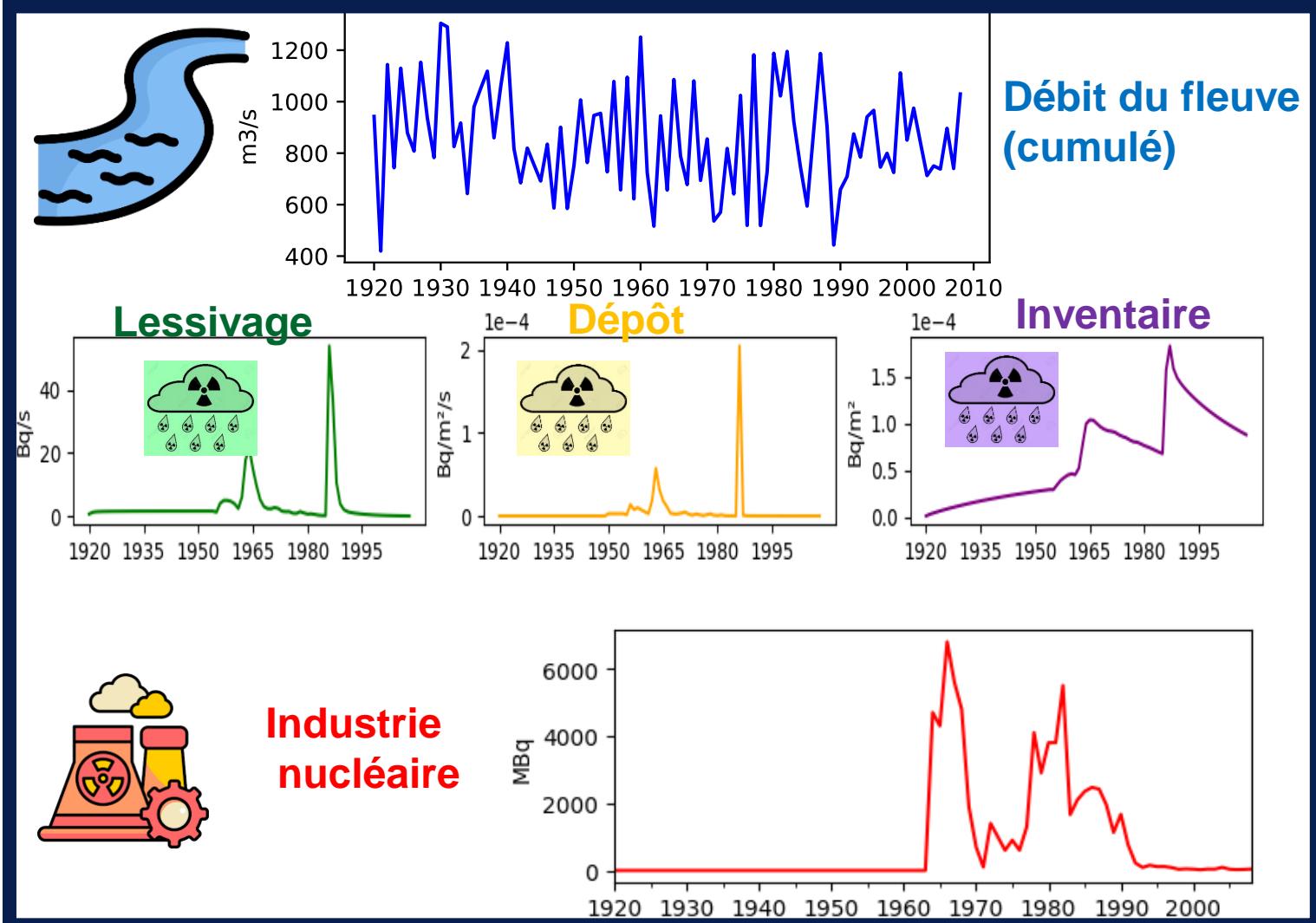
# LES DONNÉES (exemple du Rhône)

## VARIABLE CIBLE



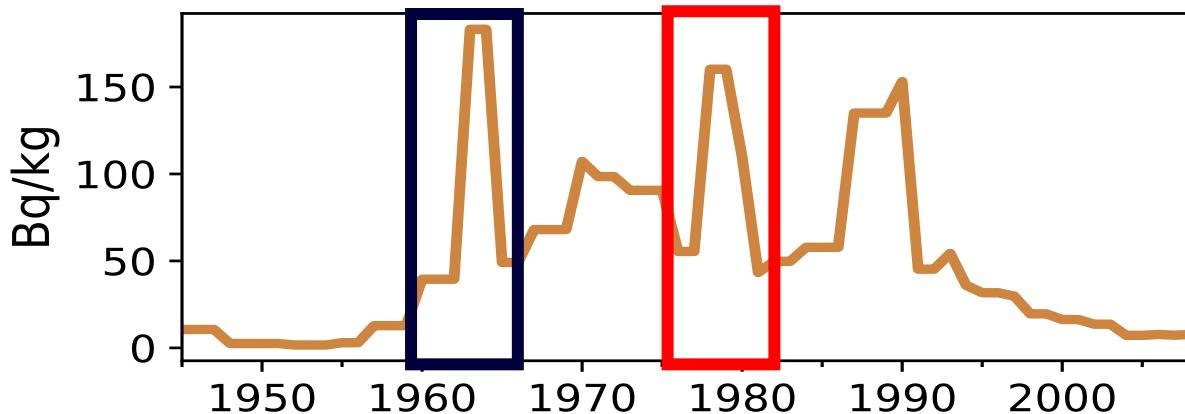
Des archives sédimentaires avec la concentration de césium 137

## COVARIABLES



# 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)

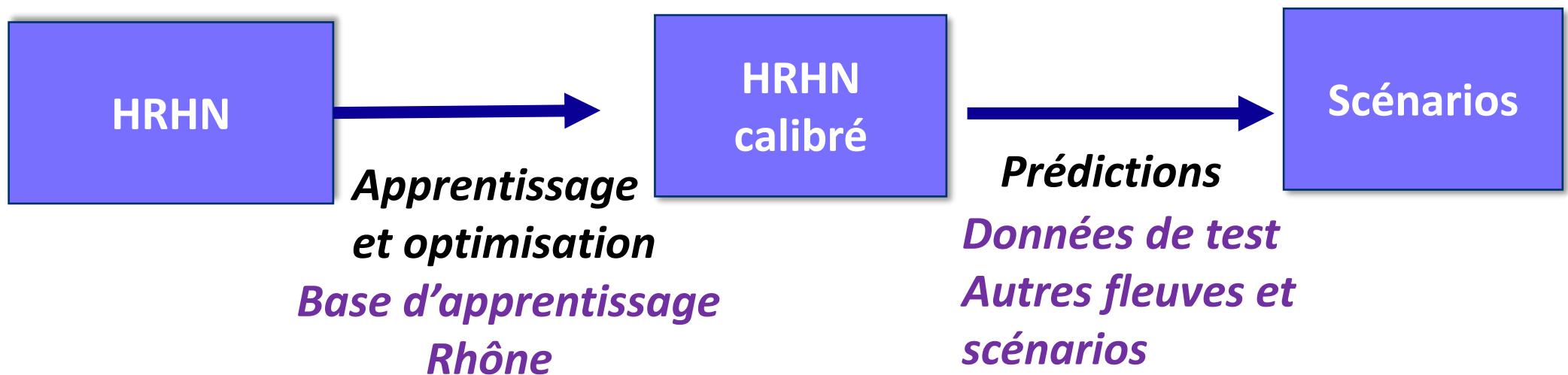


- 1) Réarrangement de chaque série:  
découpe en fenêtre temporelle.
- 2) Duplication avec un bruit uniforme

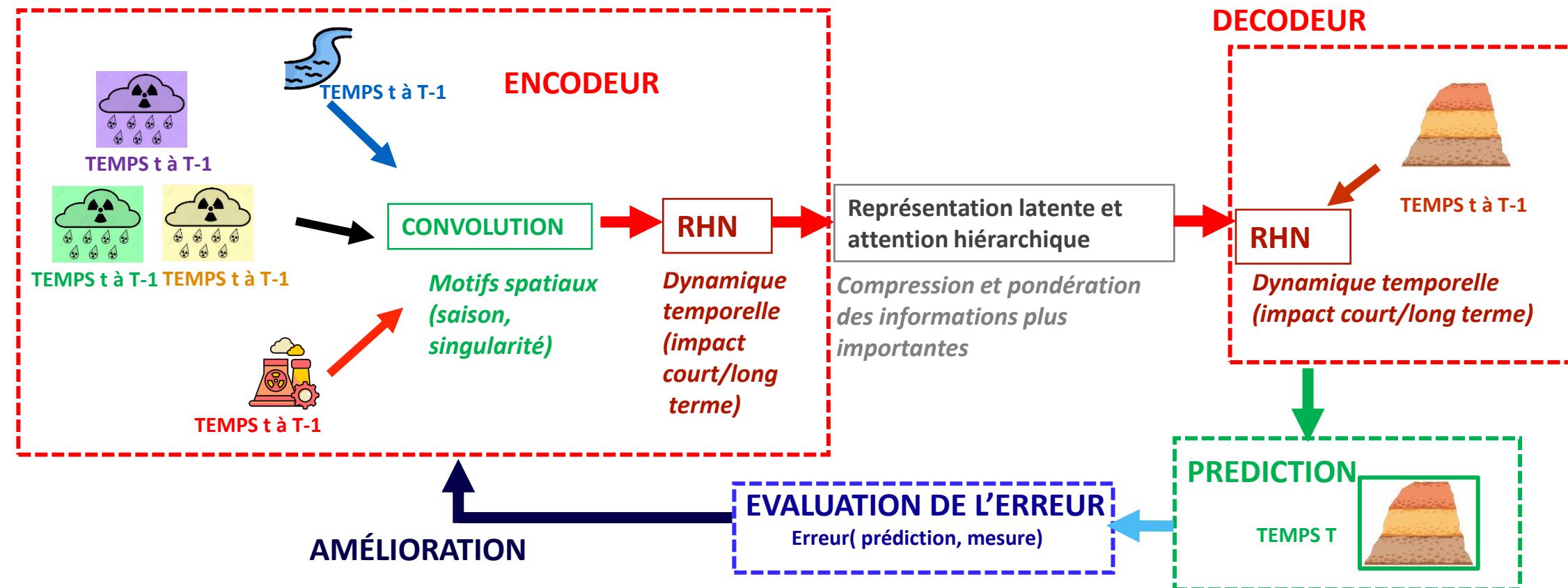
Une plus grande base de données pour une meilleure robustesse du modèle

# MODÉLISATION

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

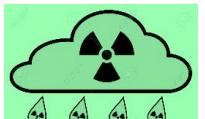
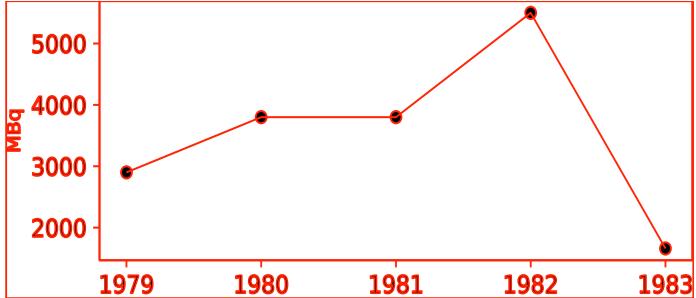


# APPRENTISSAGE POUR HRHN : CALIBRATION DES PONDÉRATIONS SUR LE RHÔNE

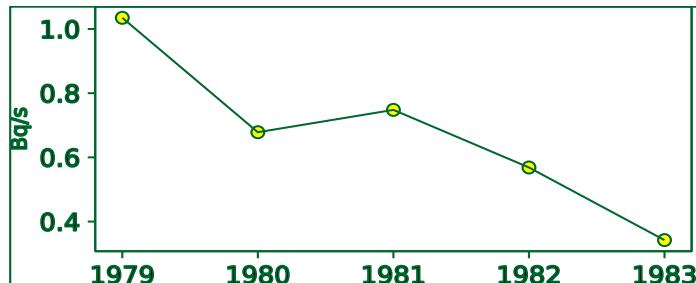




1979 à 1983



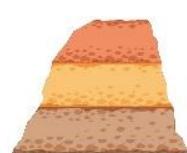
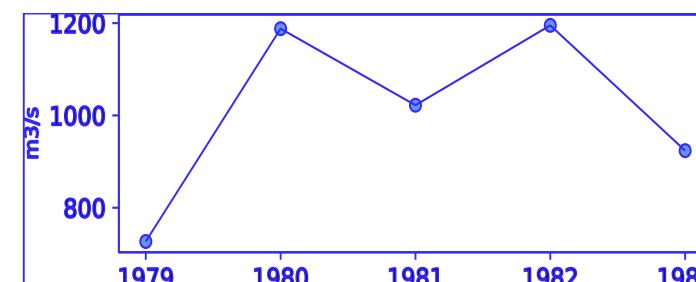
1979 à 1983



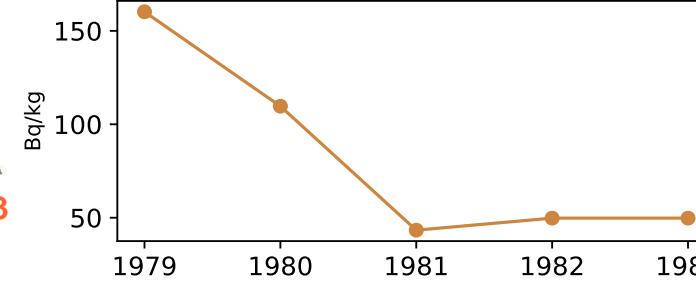
et pareil



1979 à 1983

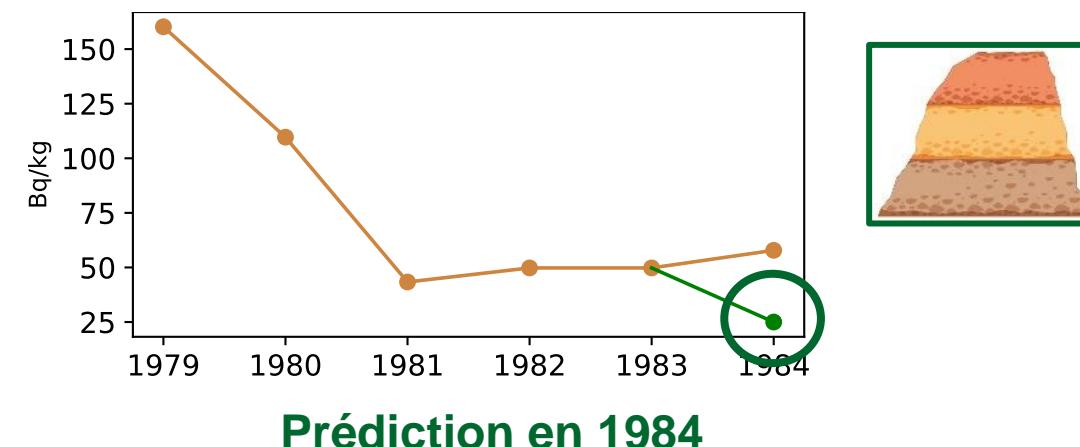


1979 à 1983



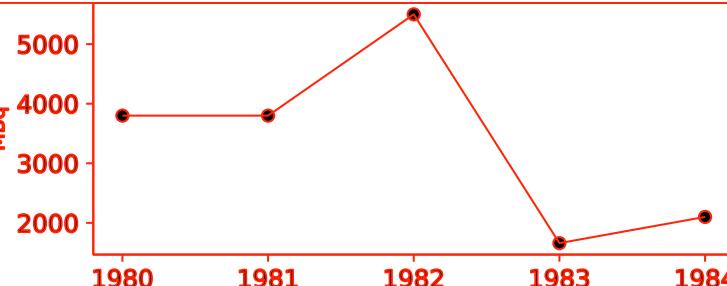
# DÉROULEMENT D'UNE PRÉDICTION AUTO-REGRESSIVE (1/2)

HRHN

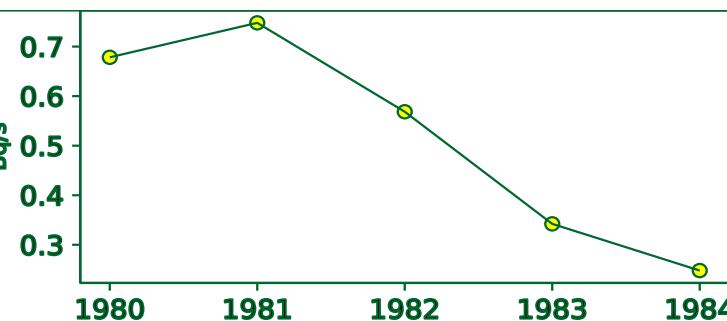




1980 à 1984



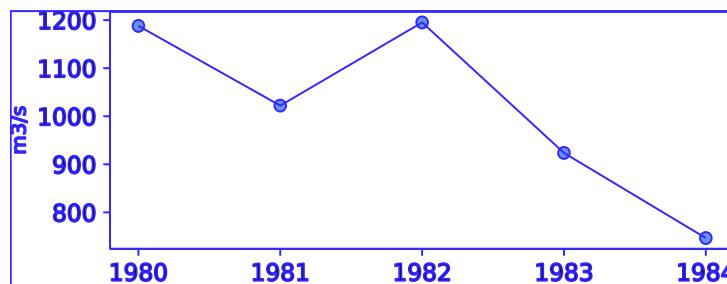
1980 à 1984



et pareil



1980 à 1984



1980 à 1983

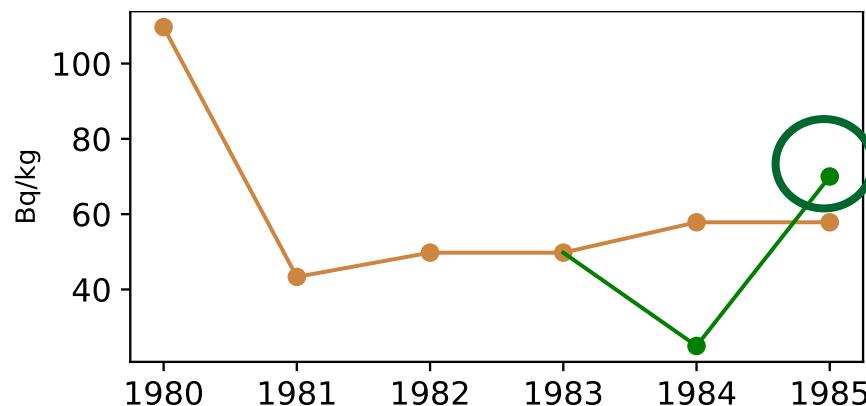


1984

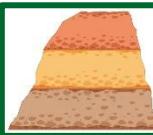


# DÉROULEMENT D'UNE PRÉDICTION AUTO-REGRESSIVE (2/2)

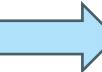
HRHN



Prédition en 1985



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

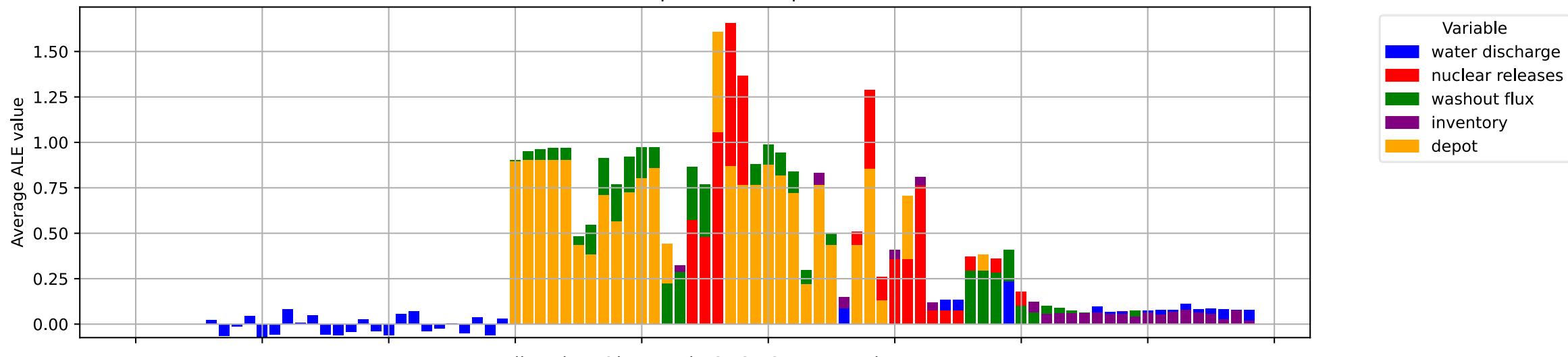
- Mesure comment la prédiction du modèle change quand on modifie une seule variable (par petits morceaux) en gardant les autres constantes.
- ALE  sur une année  Contribution à l'augmentation la valeur prédite
- ALE  sur une année  Contribution à la diminution la valeur prédite
- **Quels sont les sources 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**



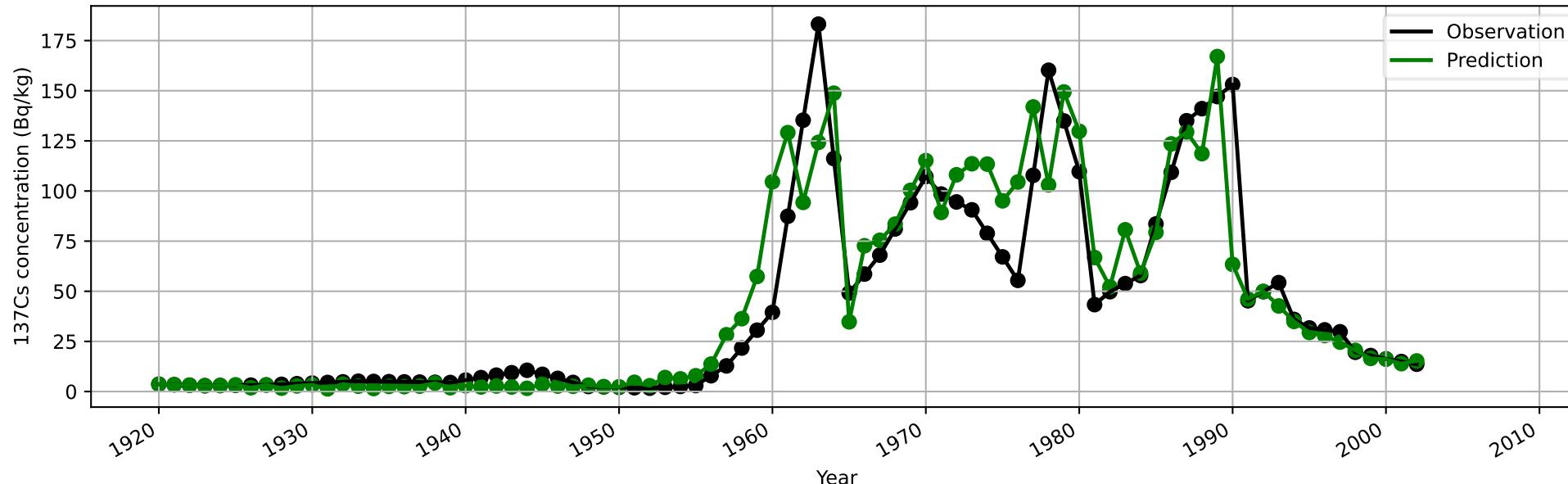
# RESULTATS: ARCHIVE DU RHONE 1920-2008



Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed  $^{137}\text{Cs}$  Concentrations

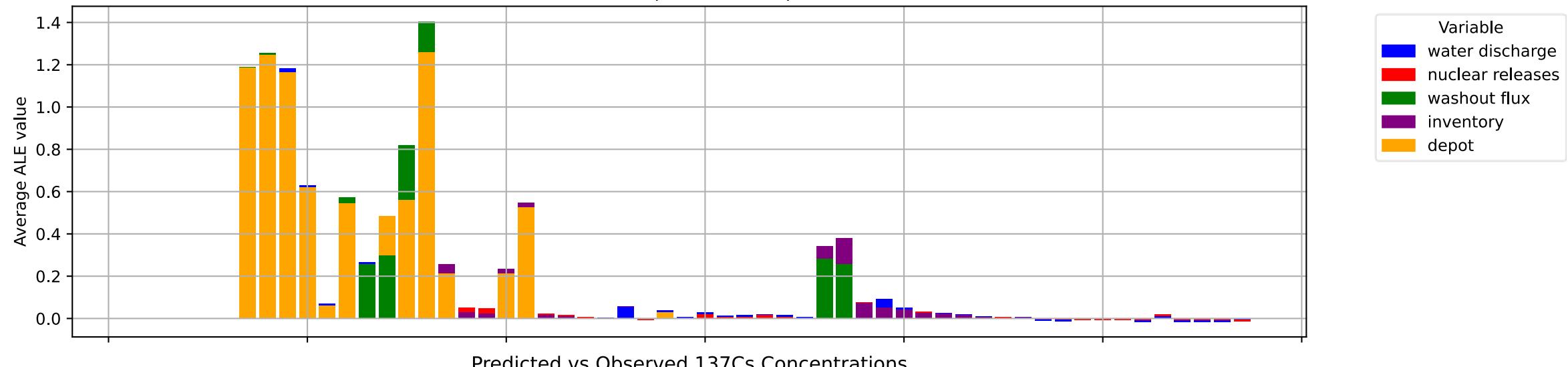




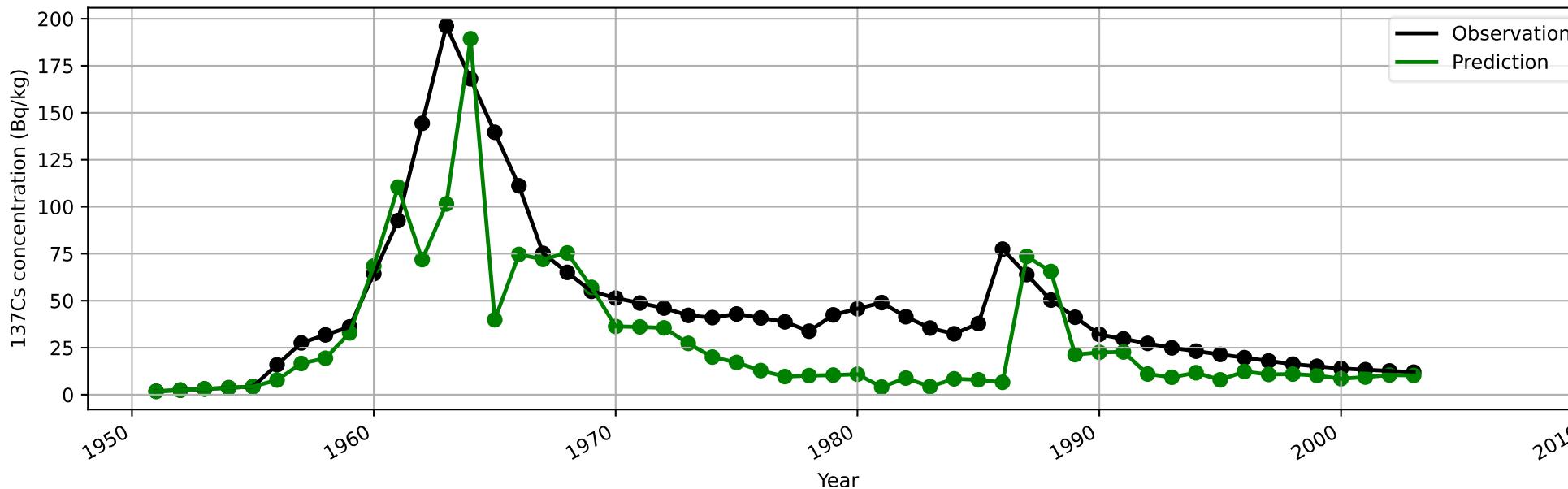
# RESULTATS: ARCHIVE DE LA LOIRE



Influence of Top 2 Variables per Year

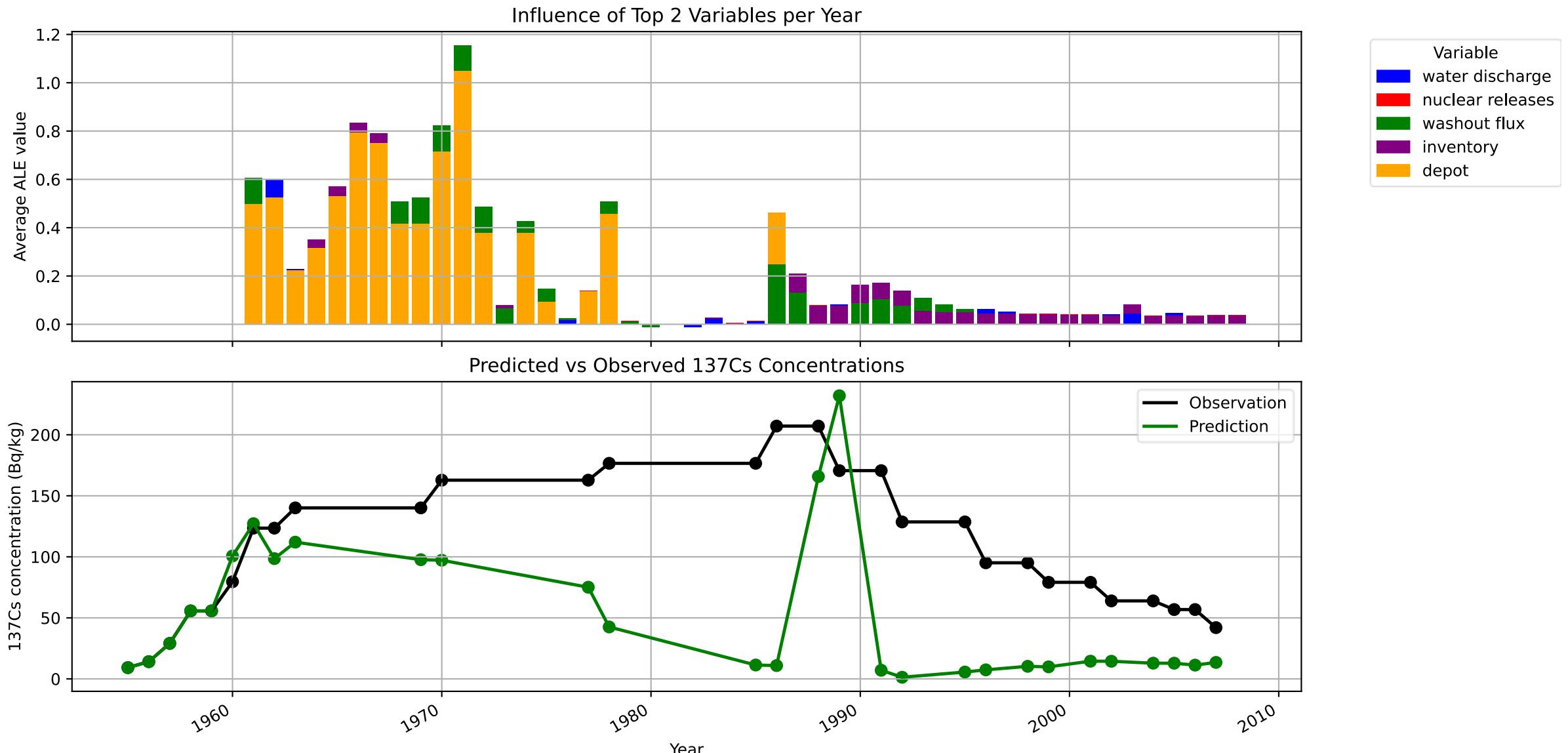


Predicted vs Observed 137Cs Concentrations





# RESULTATS: ARCHIVE DU RHIN

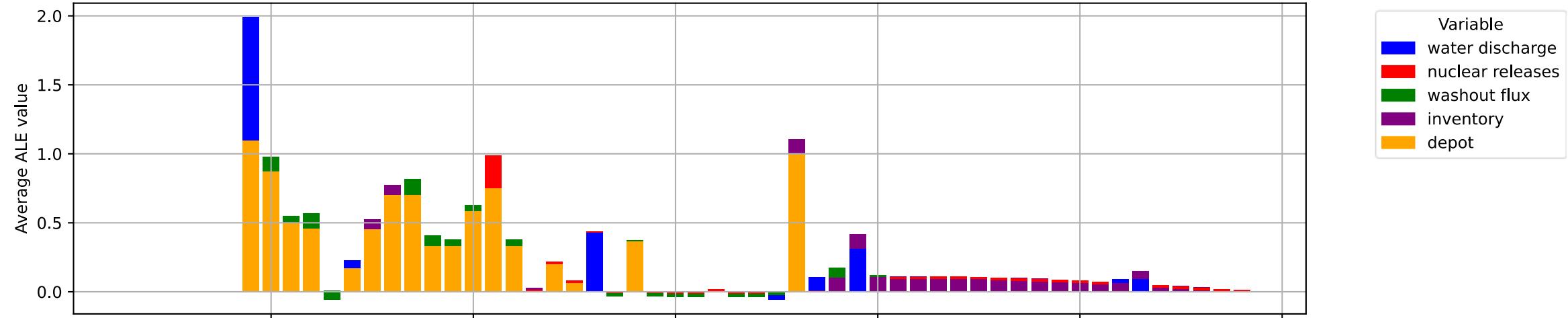




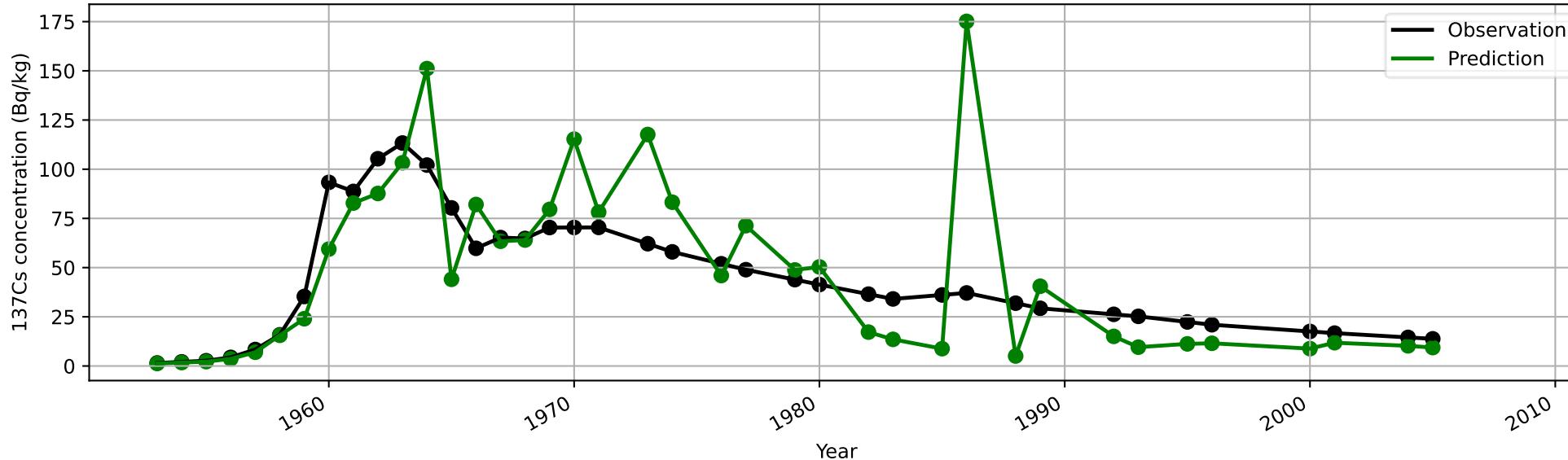
# RESULTATS: ARCHIVE DE LA MEUSE



Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed 137Cs 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.

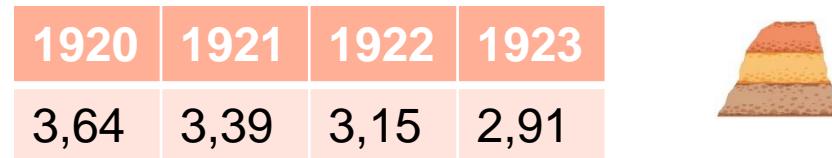
## Rejet :



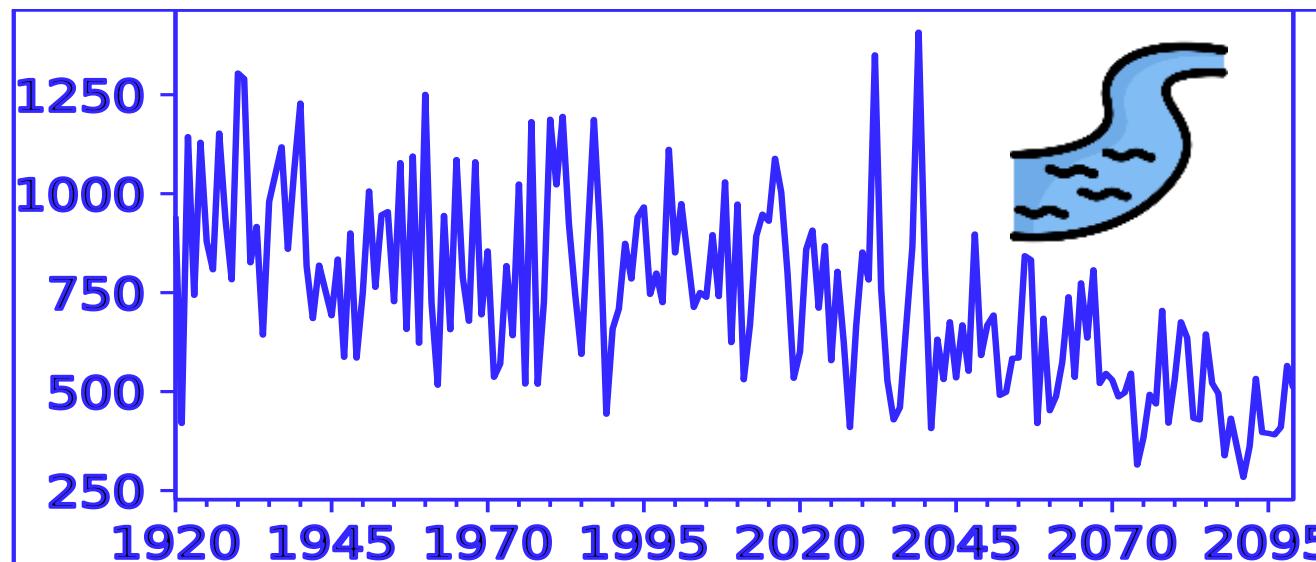
Dominance identifiée **uniquement lorsque les données sont précises et bien renseignées**.

# SCENARIOS : DE 1920 JUSQU'EN 2100

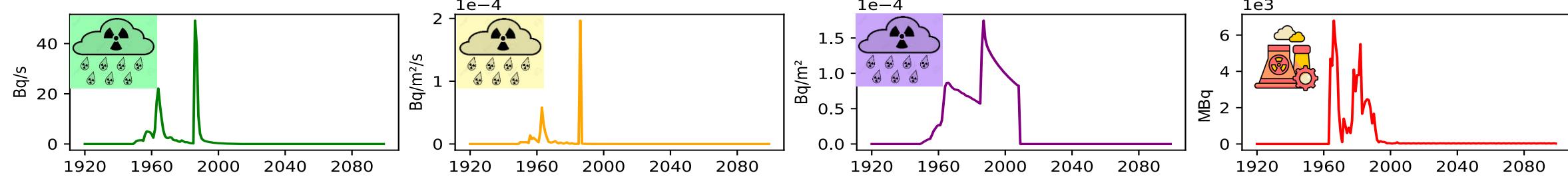
- Réaliser des prédictions de la concentration du césium 137 sur la période 1920-2100 avec le modèle HRHN avec le début de la chronique (historique) :



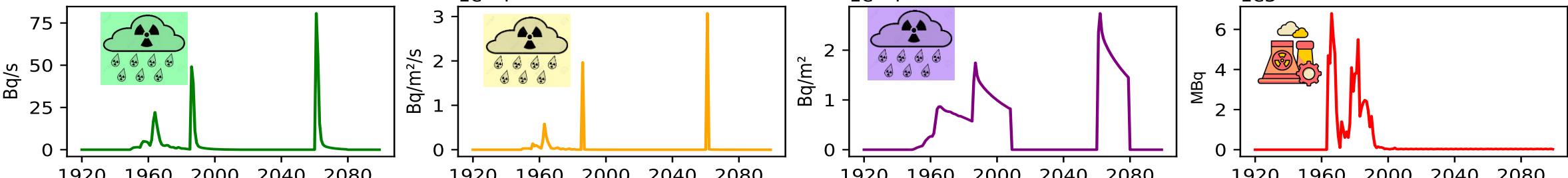
- Période 1920-2100 avec un débit progressivement plus faible



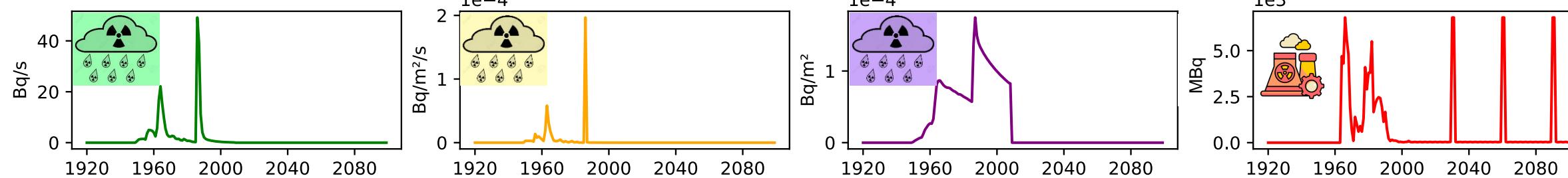
# Rejets routiniers jusqu'en 2100



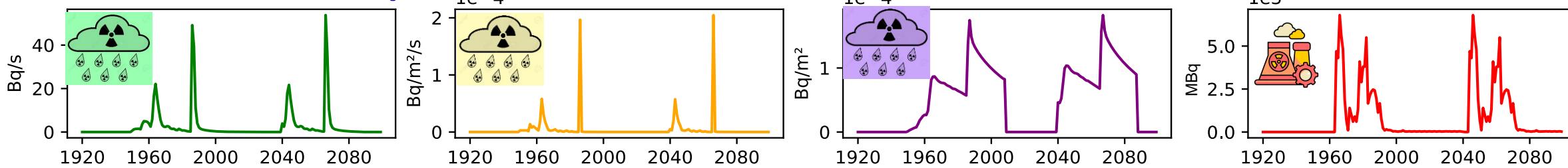
## Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



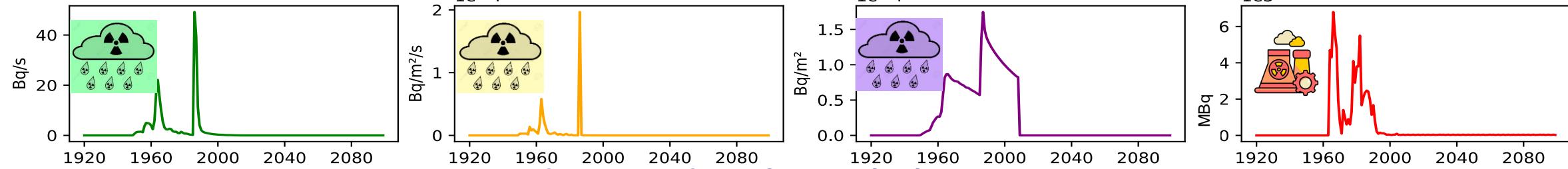
## Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090



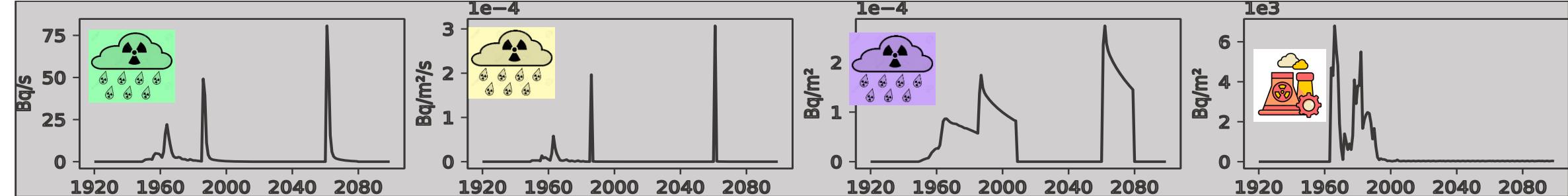
## Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070



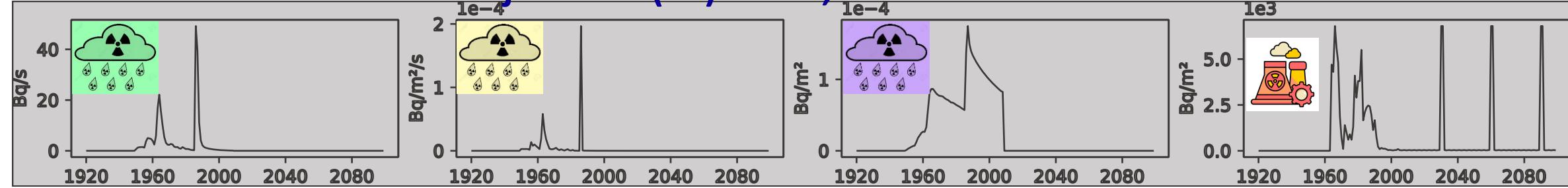
# Rejets routiniers jusqu'en 2100



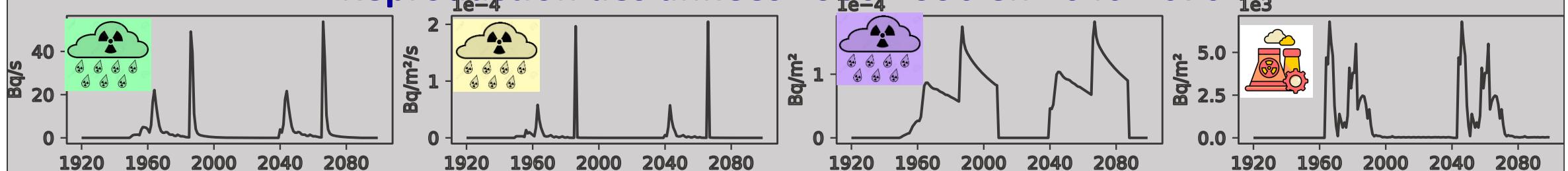
## Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



## Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

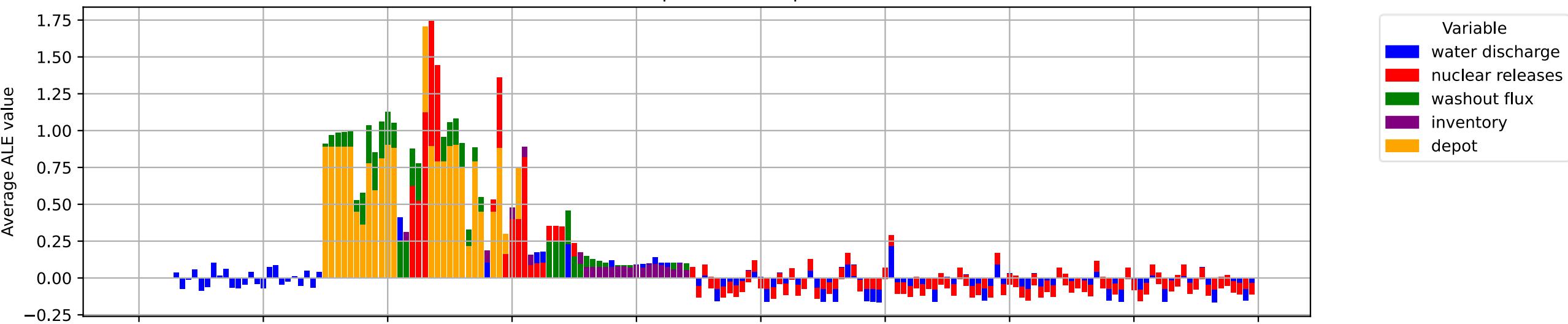


## Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

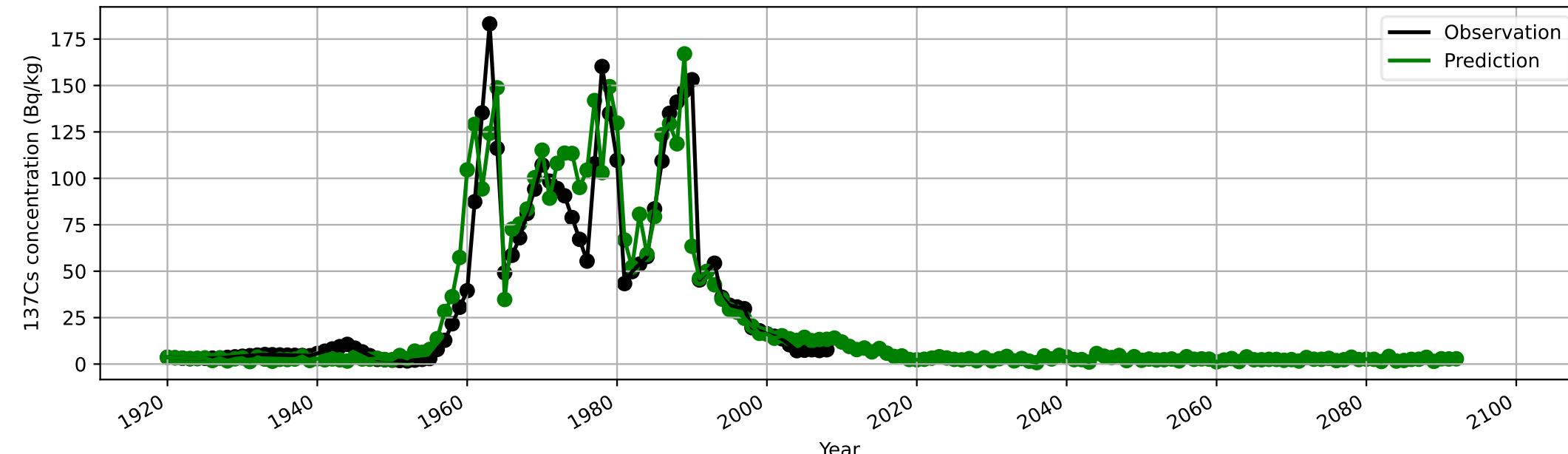


# SCENARIOS : REJETS ROUTINIERS JUSQU'EN 2100

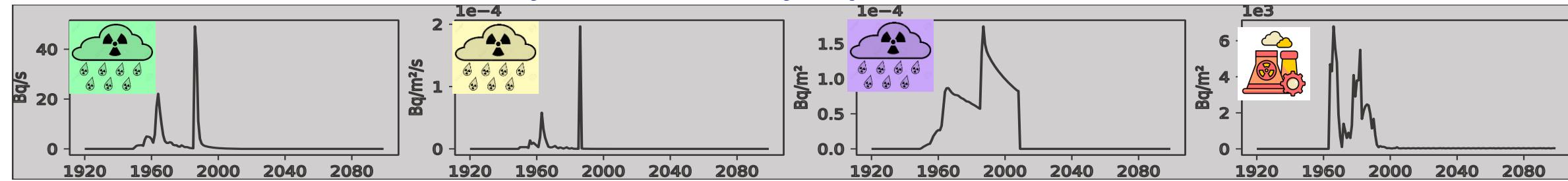
Influence of Top 2 Variables per Year



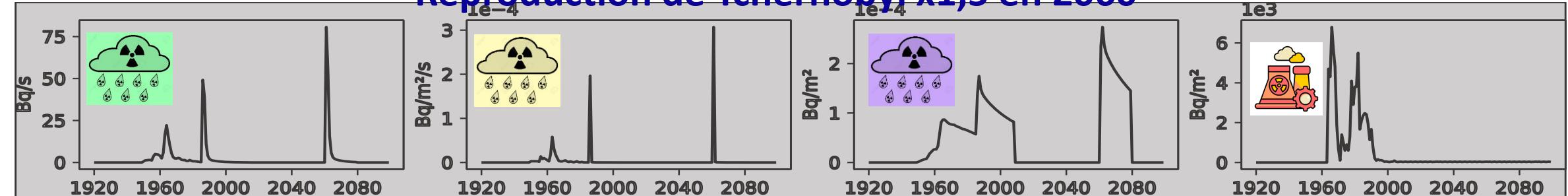
Predicted vs Observed  $^{137}\text{Cs}$  Concentrations



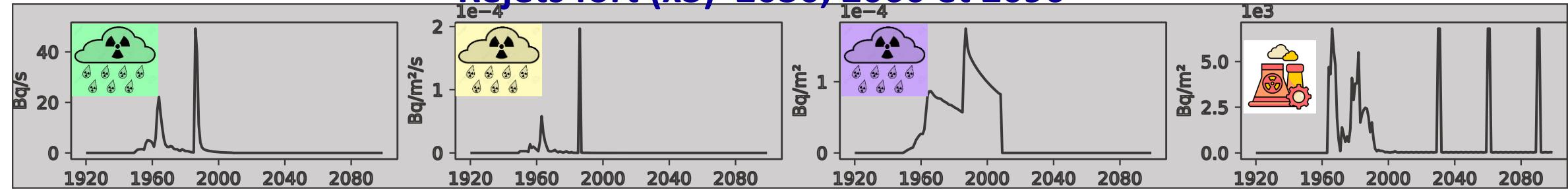
# Rejets routiniers jusqu'en 2100



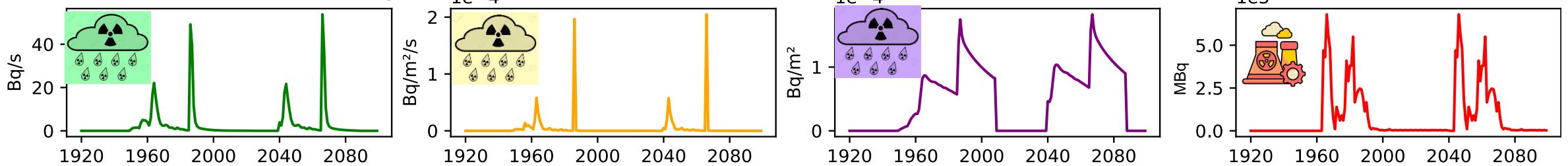
## Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



## Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

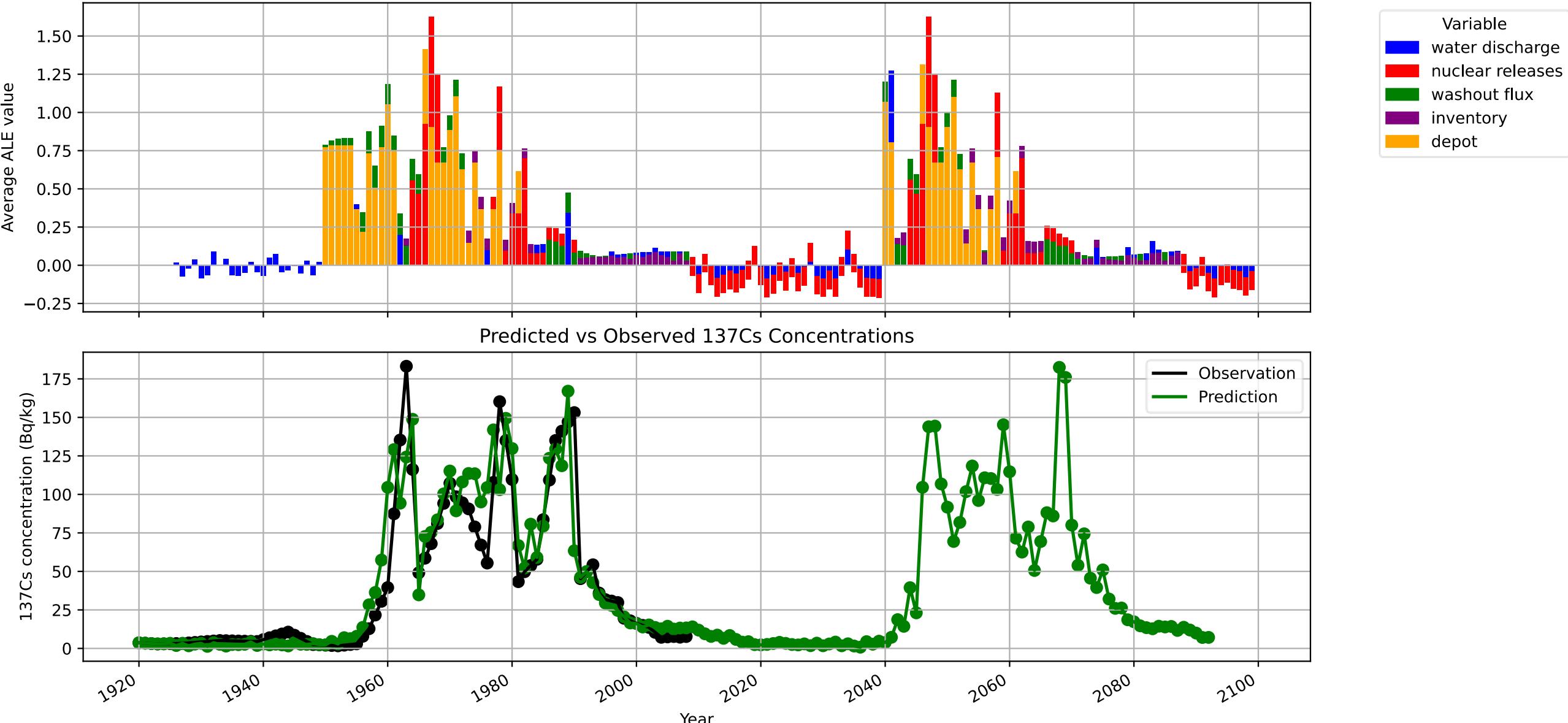


## Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

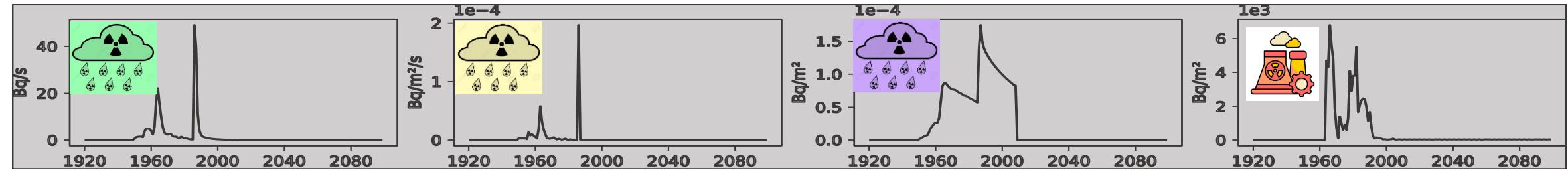


# SCENARIOS : RÉPÉTITION 60-90

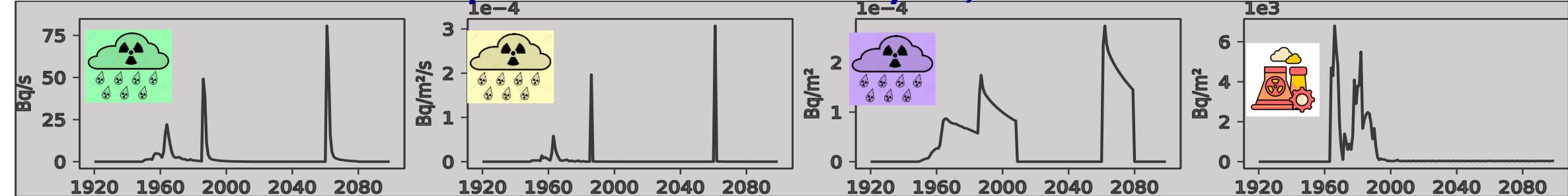
Influence of Top 2 Variables per Year



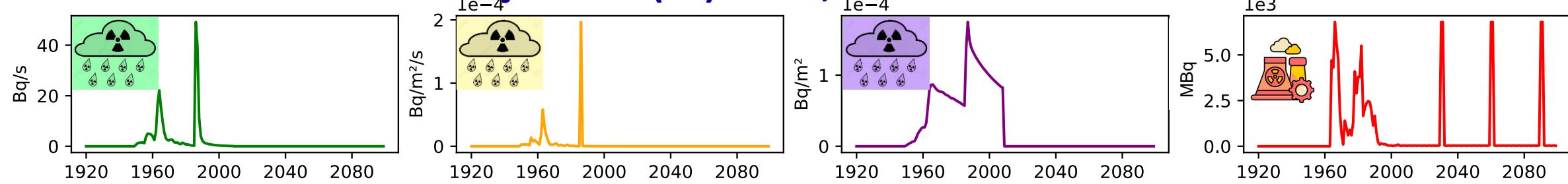
# Rejets routiniers jusqu'en 2100



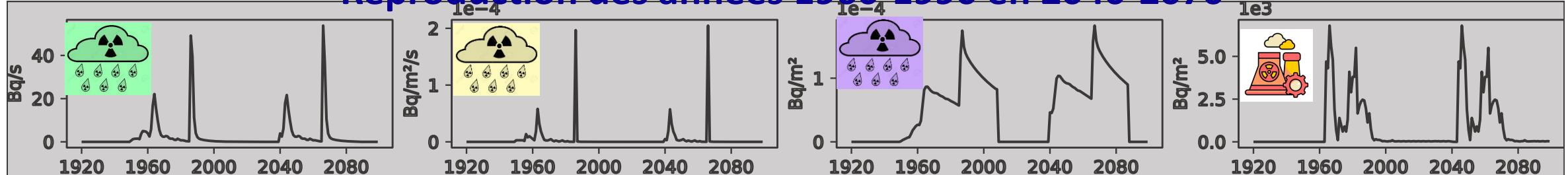
## Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



## Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

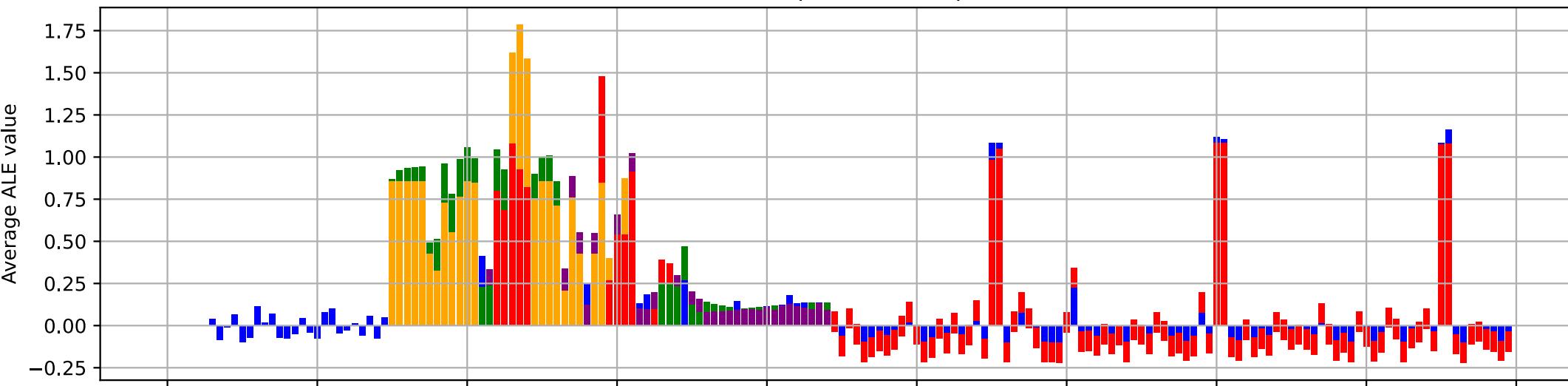


## Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

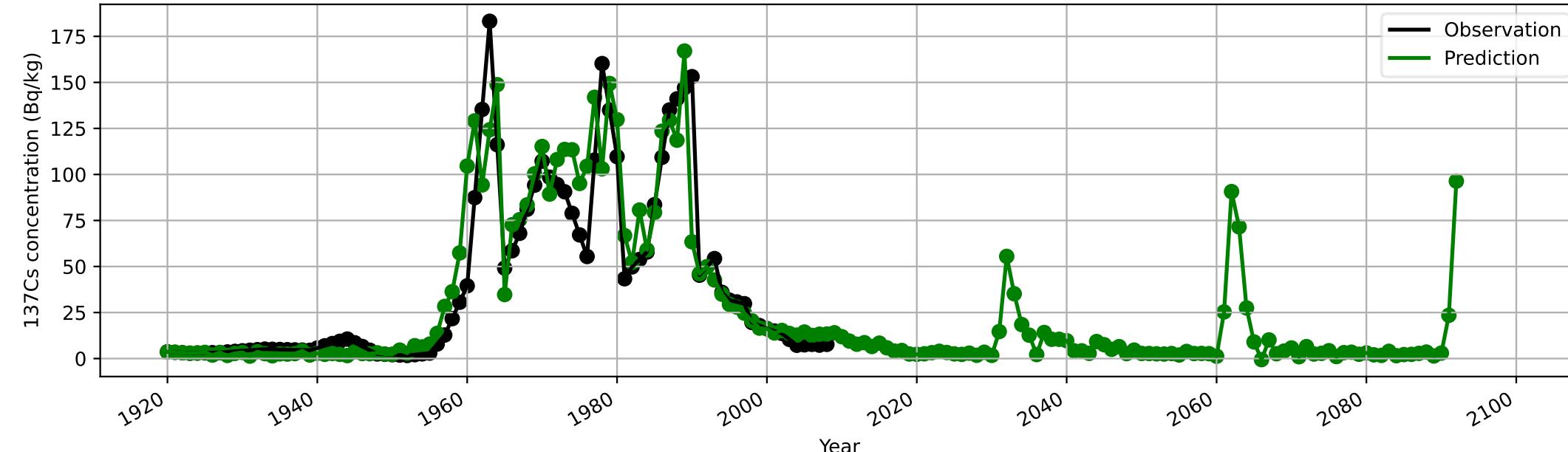


# SCENARIOS : REJETS FORTS

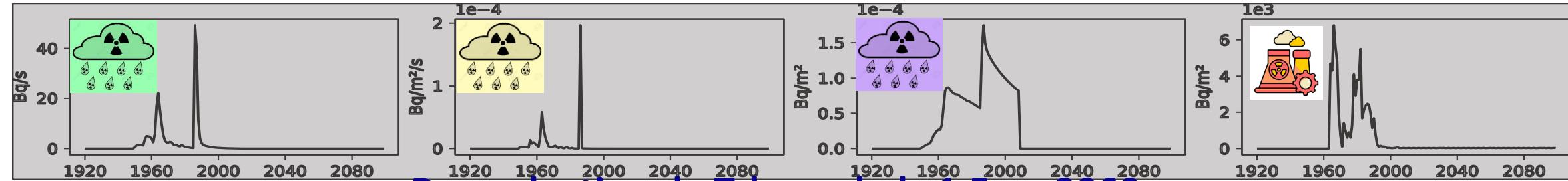
Influence of Top 2 Variables per Year



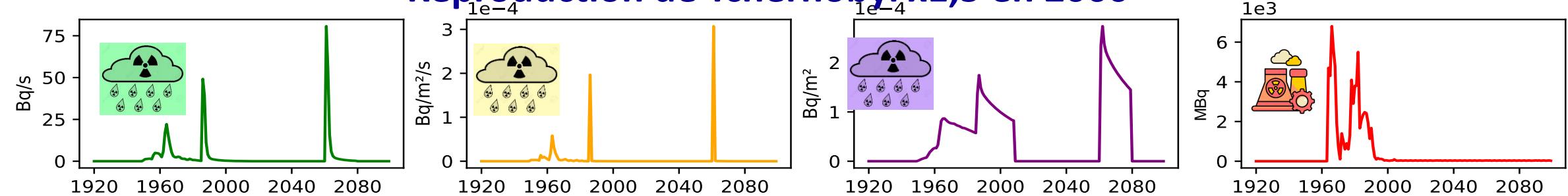
Predicted vs Observed  $^{137}\text{Cs}$  Concentrations



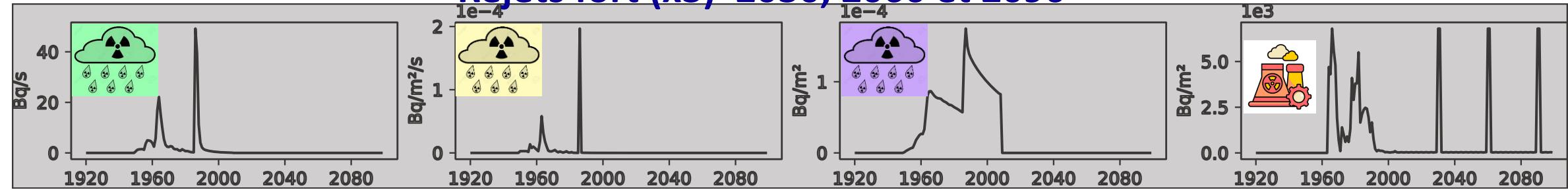
# Rejets routiniers jusqu'en 2100



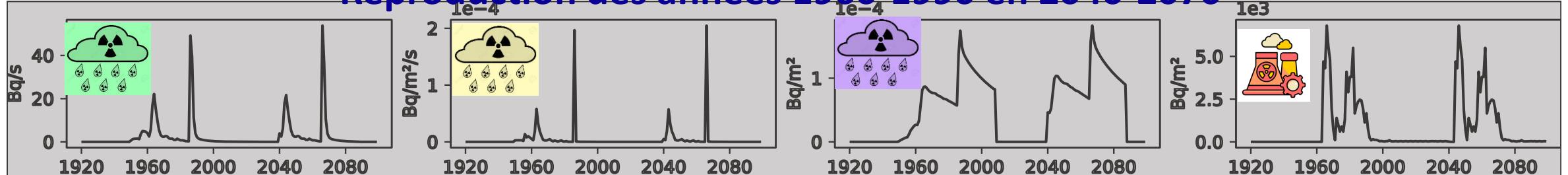
## Reproduction de Tchernobyl x1,5 en 2060



## Rejets fort (x3) 2030, 2060 et 2090

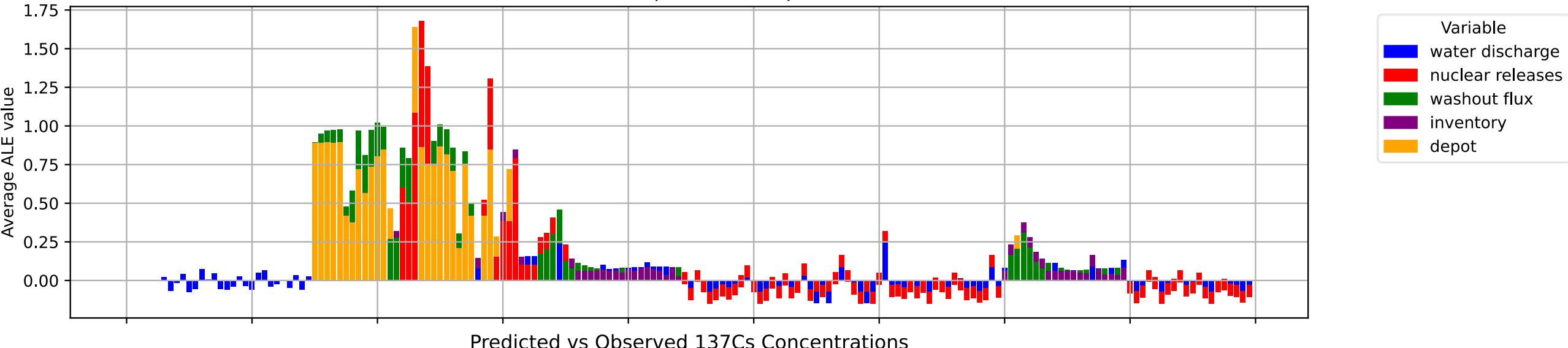


## Reproduction des années 1960-1990 en 2040-2070

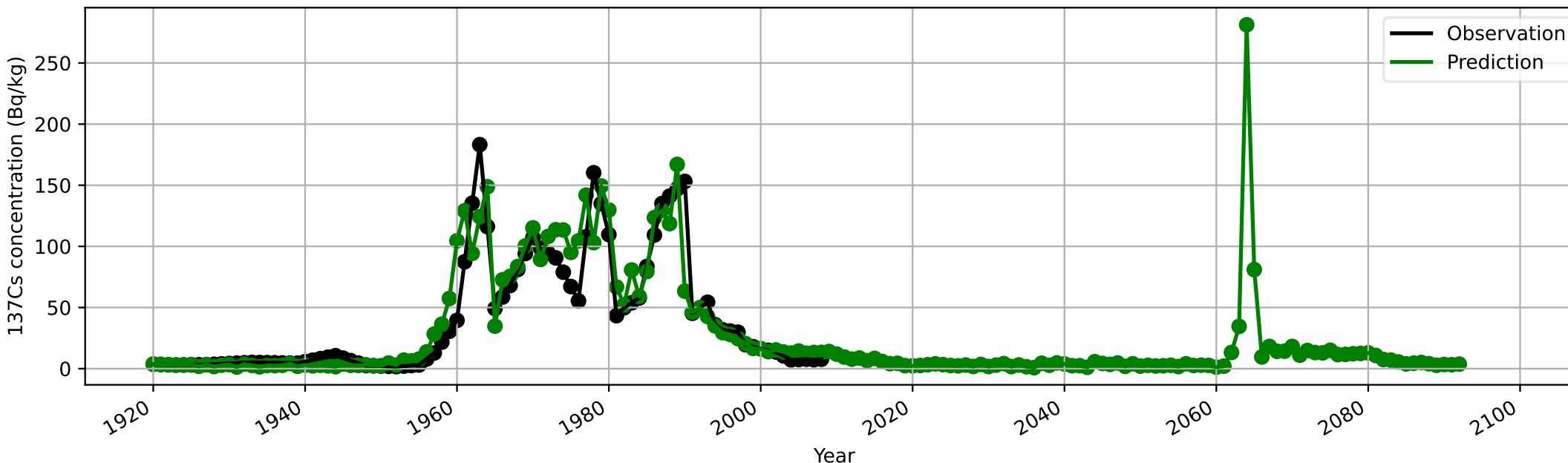


# SCENARIOS : RÉPÉTITION TCHERNOBYL

Influence of Top 2 Variables per Year



Predicted vs Observed  $^{137}\text{Cs}$  Concentrations



# CONCLUSION

- Bonnes performances de HRHN sur la reconstruction d'archives sur des fleuves différents dans le cas du Césium137
- Adaptation à de multiples scenarios 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)

$$(x_1^1, x_2^1, \dots, x_{(T-1)}^1)$$

$$(x_1^2, x_2^2, \dots, x_{(T-1)}^2)$$

$$\vdots$$

$$(x_1^N, x_2^N, \dots, x_{(T-1)}^N)$$

$$\boxed{X_{(T-1)} = (x_{(T-1)}^1, x_{(T-1)}^2, \dots, x_{(T-1)}^N)}$$
$$\downarrow$$
$$\vdots$$
$$X_2 = (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^N)$$
$$X_1 = (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^N)$$

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

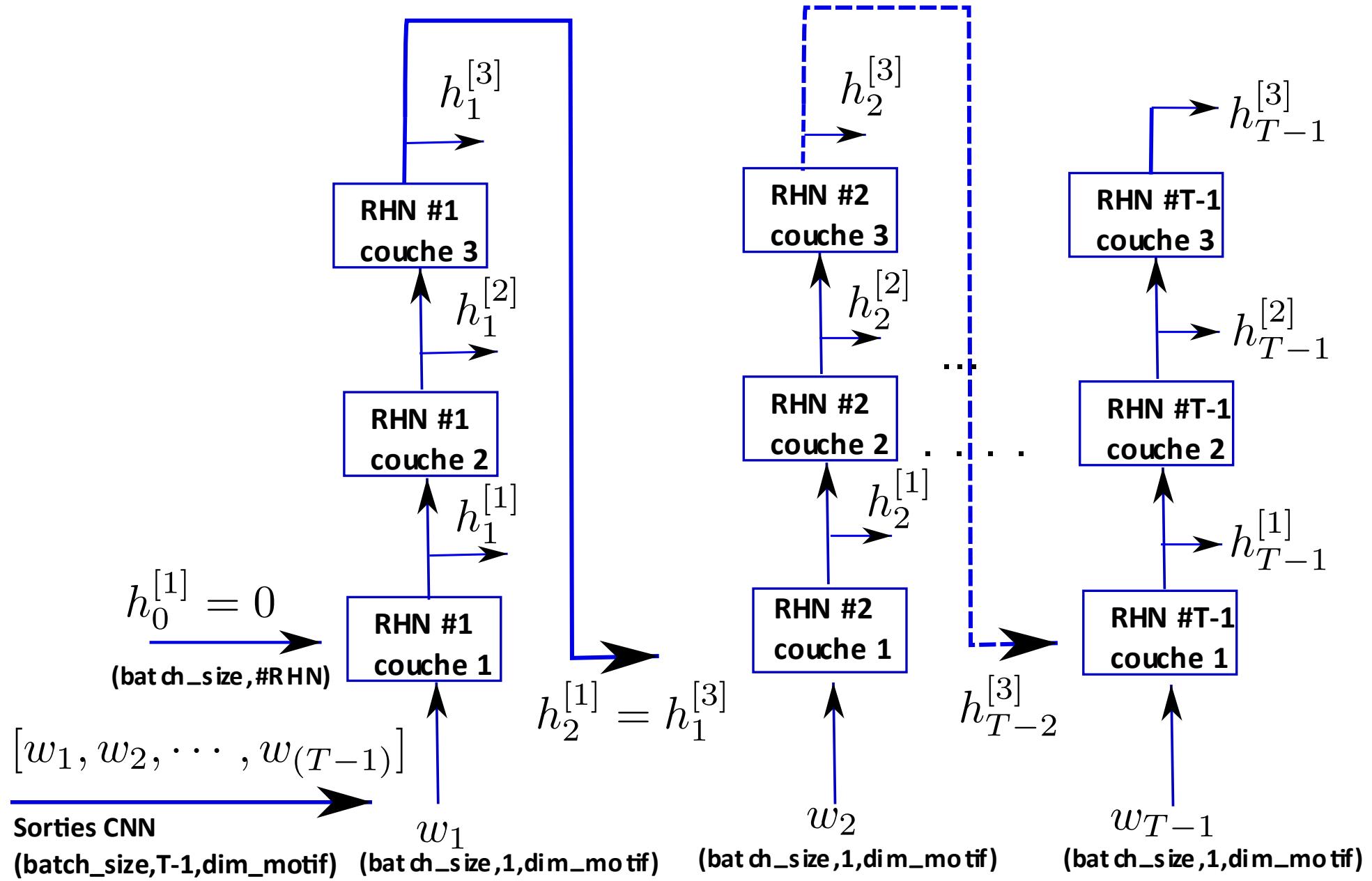
(batch\_size,T-1,dim pooling,64)

T-1 réseaux de convolutions CNN 1D

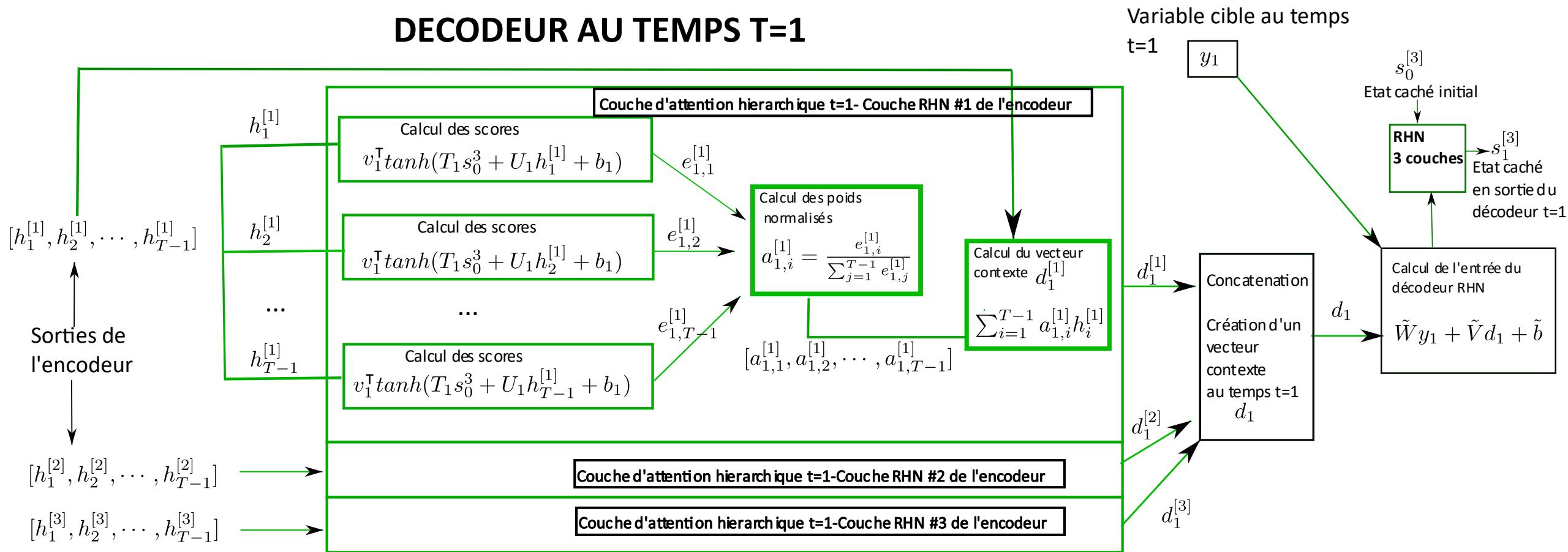
16 filtres (1x3) 32 filtres (1x3) 64 filtres (1x3)

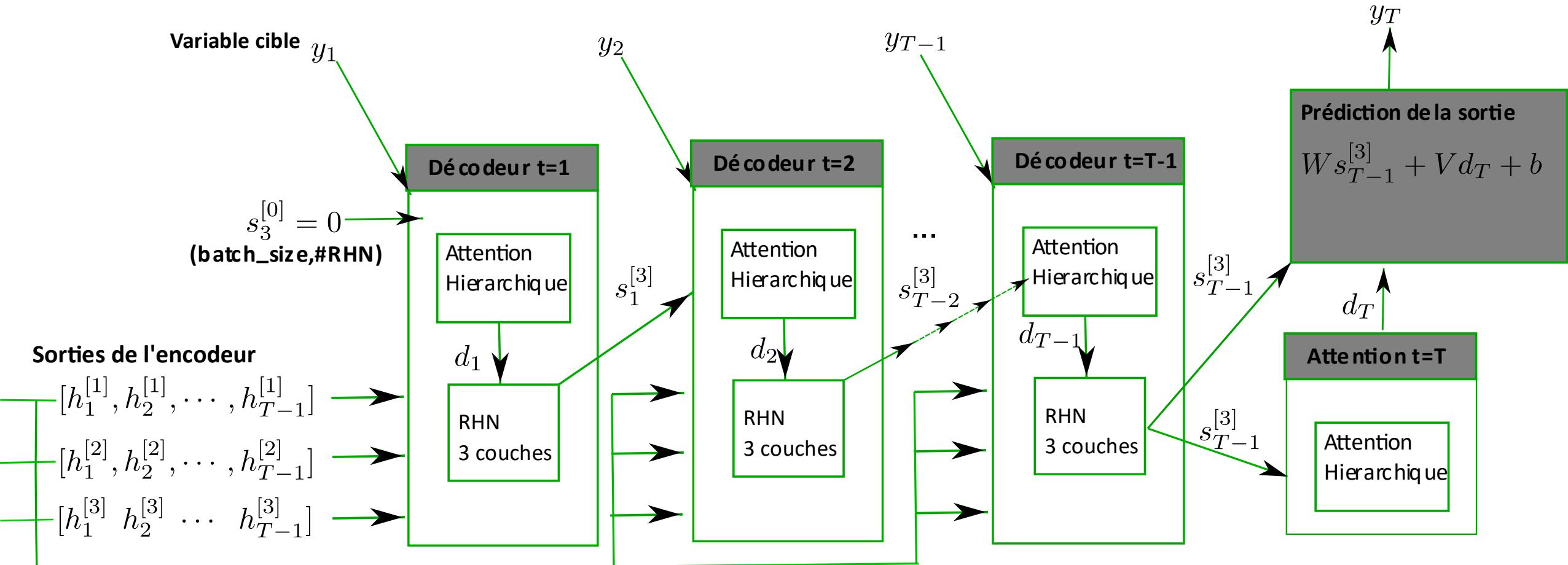
Couche n°1 Couche n°2 Couche n°3

Max-Pooling (1x3) Max-Pooling (1x3) Max-Pooling (1x3)

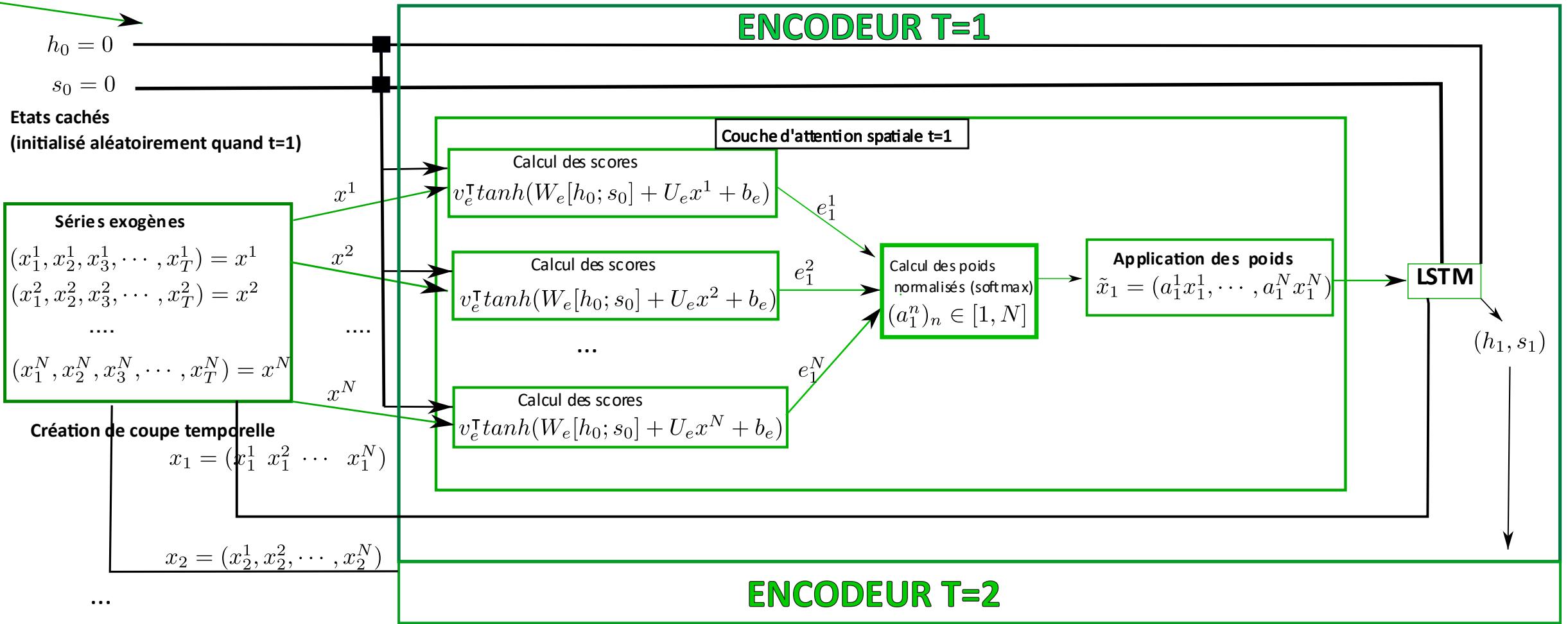


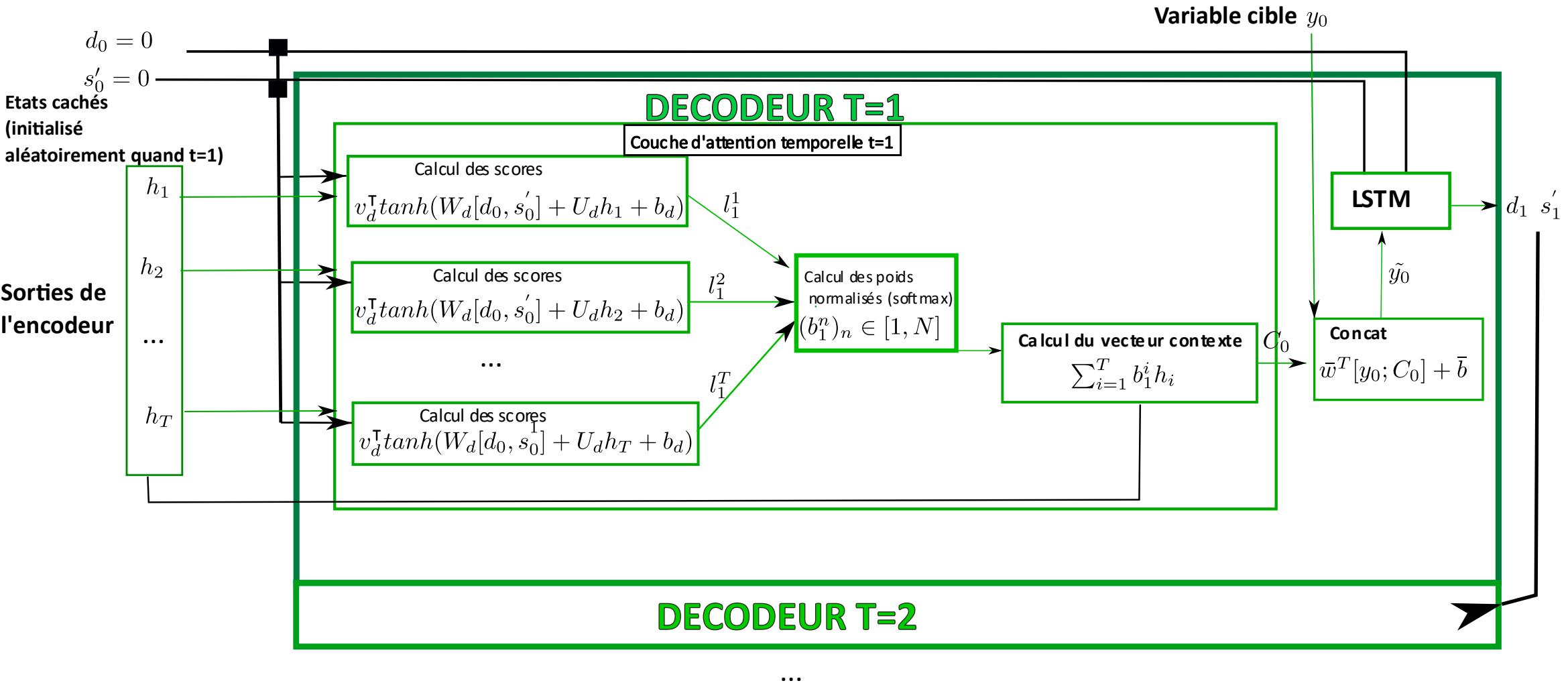
# DECODEUR AU TEMPS T=1



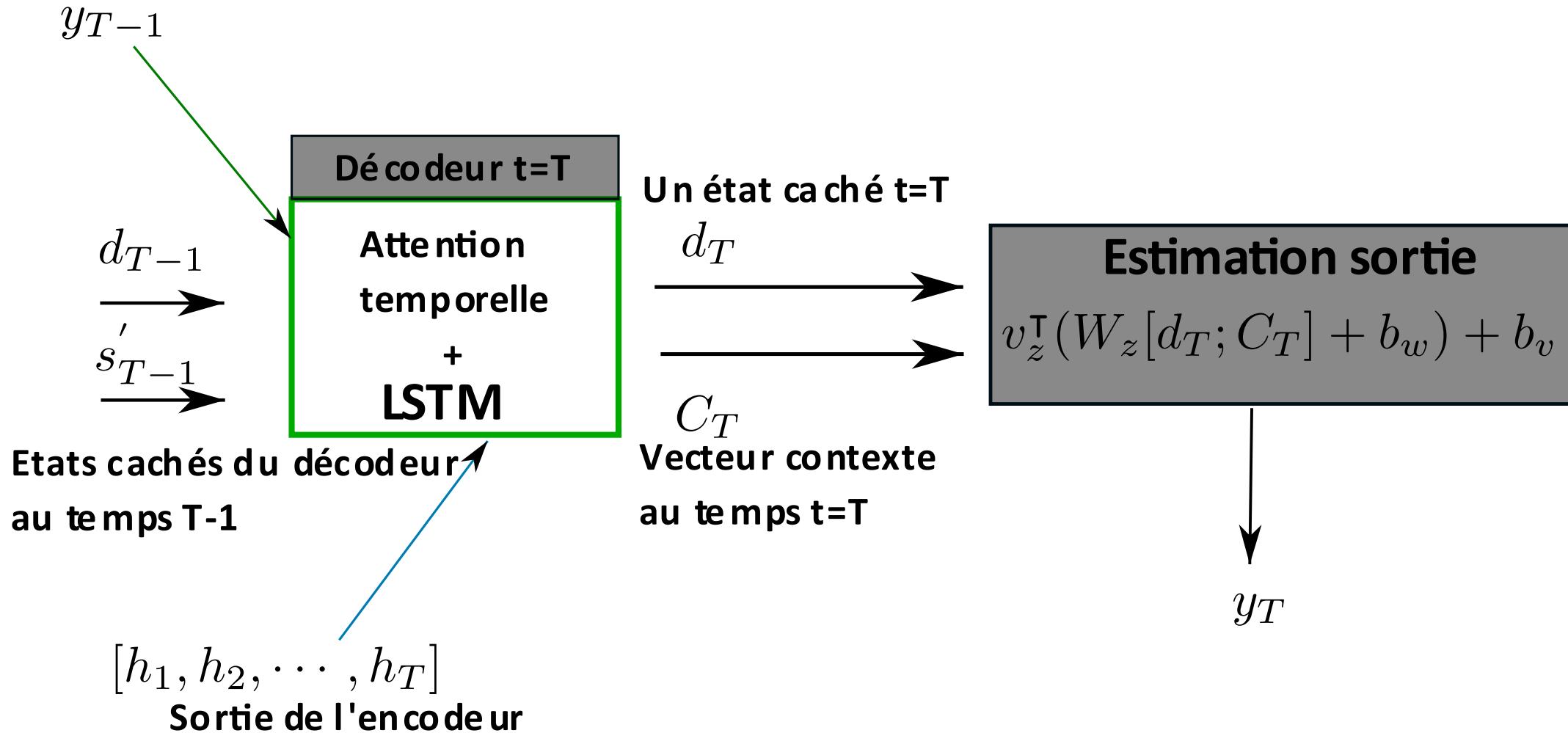


# **ANNEXE DA-RNN**





## Variable cible



# **ANNEXE DONNEES**

# APPORT DES BASSINS VERSANTS

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

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

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

# DONNÉES DES CENTRALES NUCLÉAIRES

