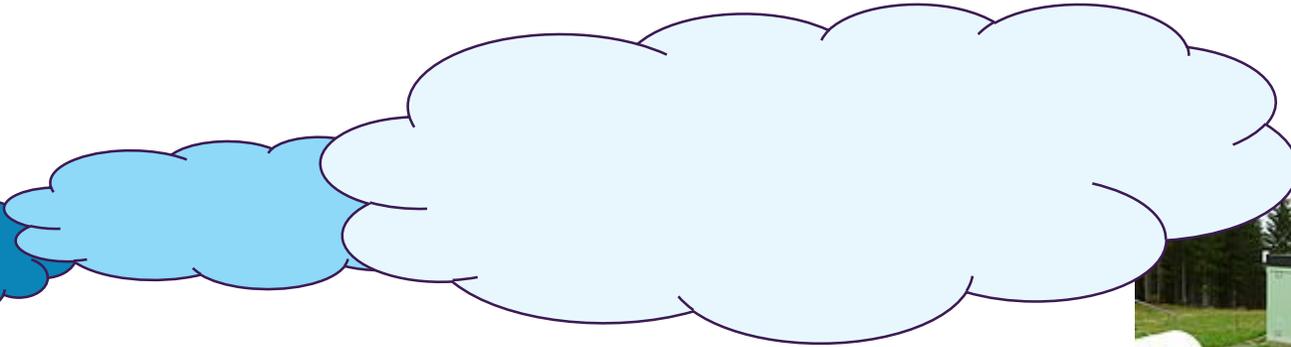


# La modélisation du transport atmosphérique inverse avec « FREAR »

# Introduction



# La modélisation du transport atmosphérique direct



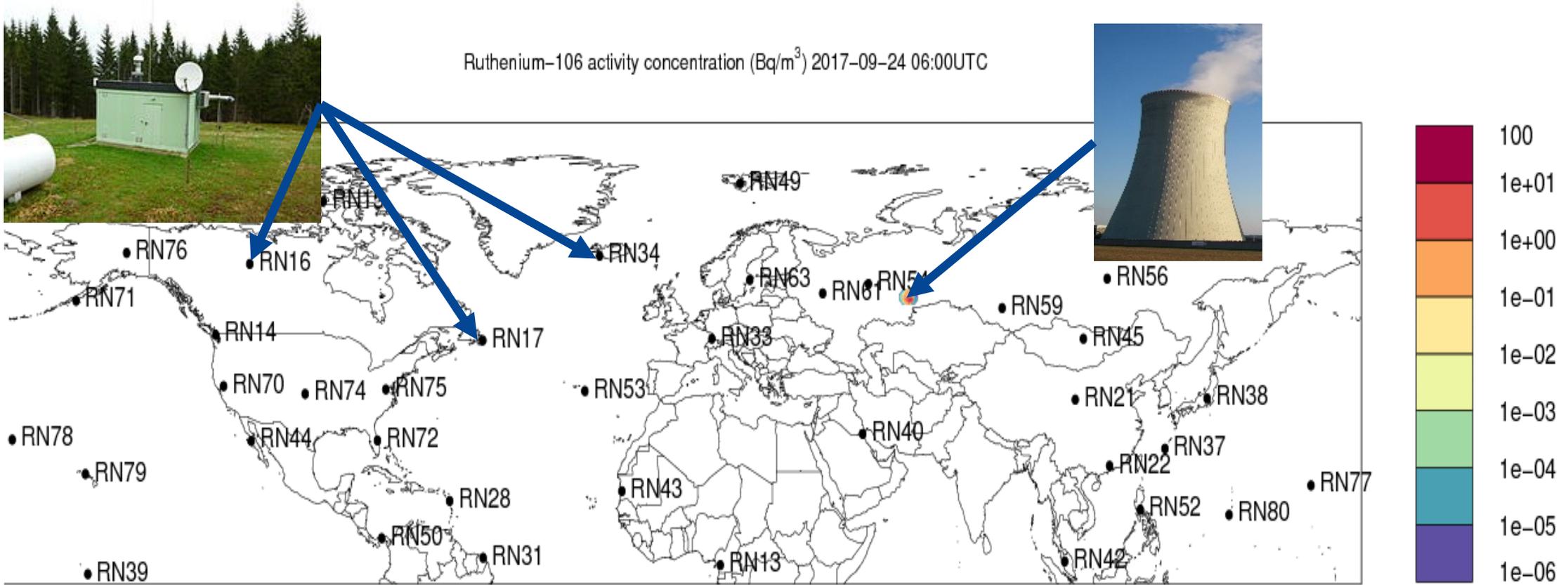
un rejet atmosphérique connu d'une installation nucléaire connue

des particules ou des gaz radioactives

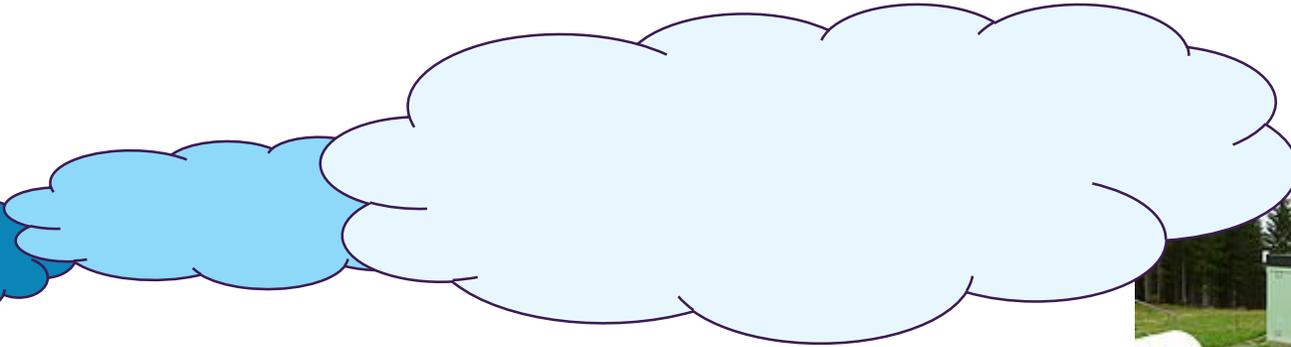
des mesures environnementales (concentration de radionucléides dans l'air)

un modèle de transport atmosphérique calcule le déplacement des particules ou des gaz dans notre atmosphère. Pour cela, ces modèles utilisent des données météorologiques.

# La modélisation du transport atmosphérique direct



# La modélisation du transport atmosphérique inverse



un rejet atmosphérique **inconnu** d'une installation nucléaire connue



exemple: l'accident nucléaire de Fukushima

un rejet atmosphérique **inconnu** d'une installation nucléaire **inconnue**



exemple: détections de ruthénium-106 en Europe en automne 2017

## **modélisation directe**

en utilisant le rejet connu, on peut calculer la concentration

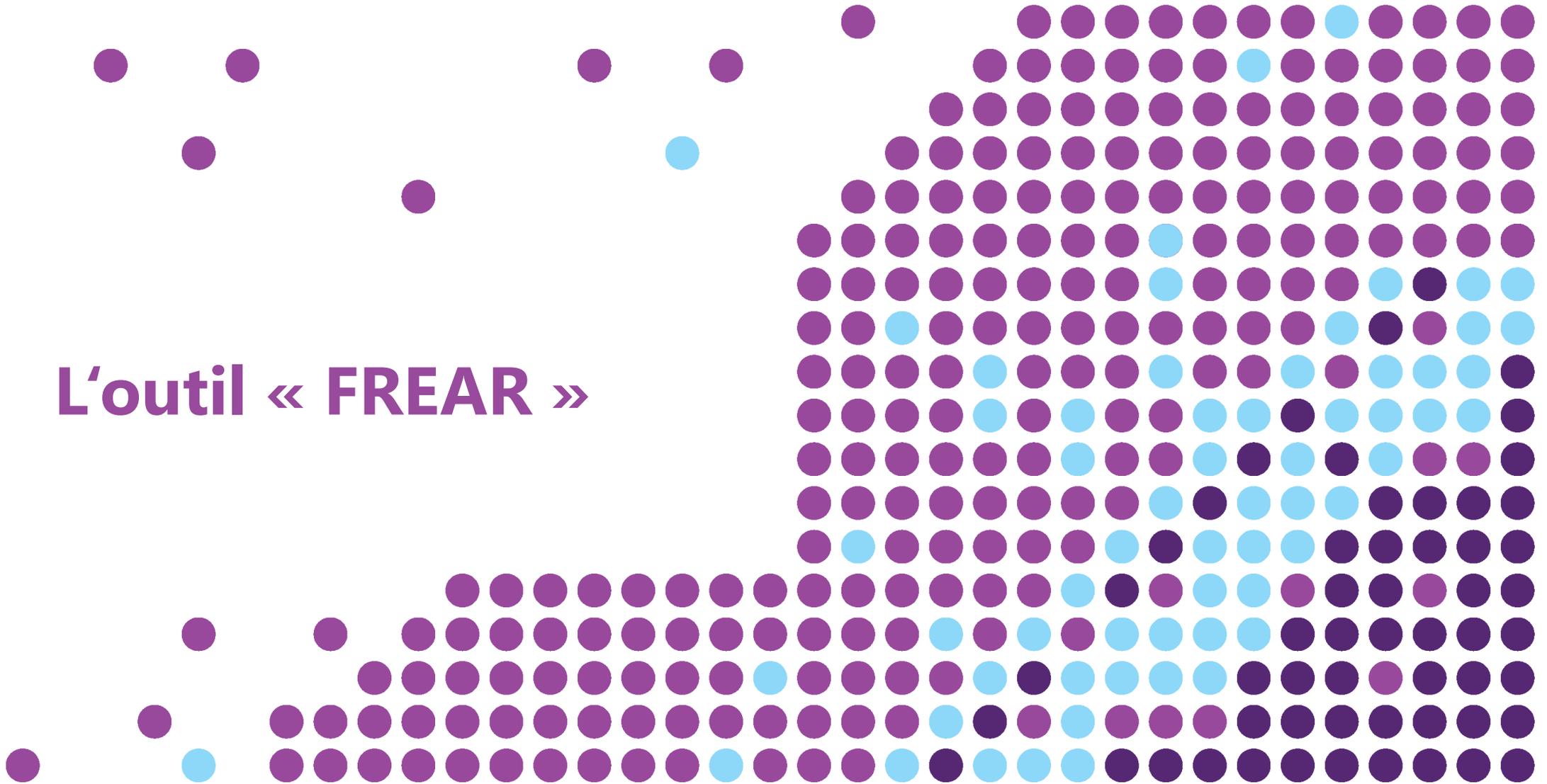
## **modélisation inverse**

en utilisant des mesures de concentration, on peut calculer les paramètres du rejet inconnu

# L'outil « FREAR »

- L'outil FREAR combine les mesures de concentration des radionucléides et la modélisation du transport atmosphérique pour déterminer les paramètres clé d'évènements dans un cadre statistique ou quantitatif
- FREAR est développé conjointement par le Canada et la Belgique pour améliorer la vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaire (TICE) mais peut aussi être utilisé pour des accidents nucléaires
- Deux exemples dans cette présentation:
  1. Le rejet anormal de Se-75 du BR2, SCK CEN, Belgique
  2. La remise en suspension de Cs-137 pendant des incendies de forêt à Tchernobyl

# L'outil « FREAR »



# L'outil « FREAR » (Forensic Radionuclide Event Analysis and Reconstruction)

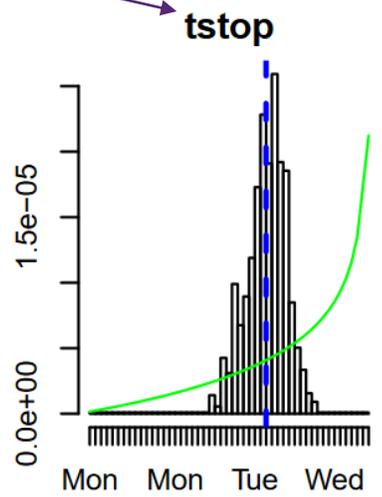
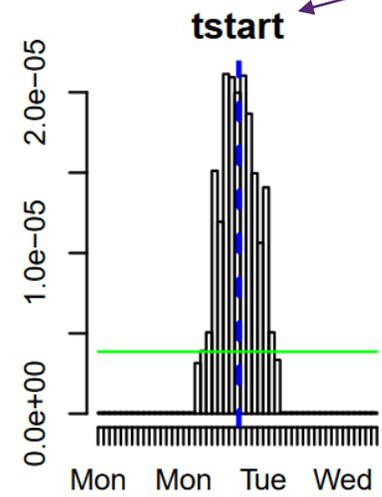
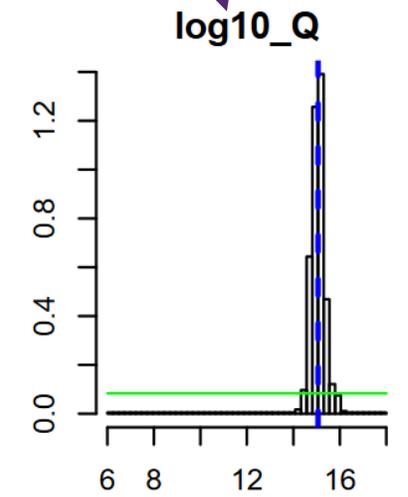
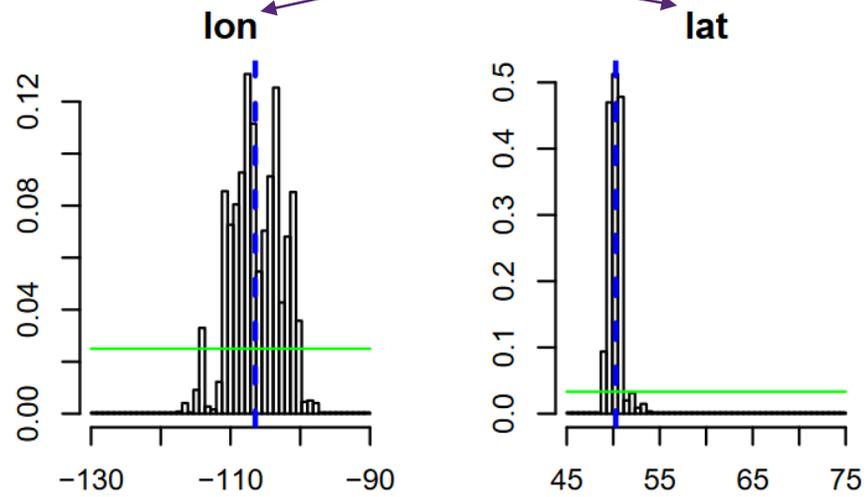
- FREAR peut résoudre le problème mathématique de la modélisation inverse en utilisant deux méthodes indépendantes : une méthode d'optimisation de la fonction de coût et une méthode bayésienne MCMC
- FREAR peut utiliser à la fois des détections et des non-détections instrumentales ; il prend en compte la possibilité de faux négatifs et faux positifs
- Les utilisateurs peuvent sélectionner le paramétrage du rejet selon le problème à résoudre (par exemple: lieu du rejet connu ou inconnu)
- L'approche d'inférence bayésienne fournit une estimation des incertitudes de manière naturelle. De plus, un ensemble de modèles de transport atmosphérique peut être utilisé pour mieux estimer l'incertitude du modèle

# Afin d'expliquer les mesures, FREAR calcule les paramètres du rejet et leur incertitude

Localisation du rejet  
(longitude and latitude)

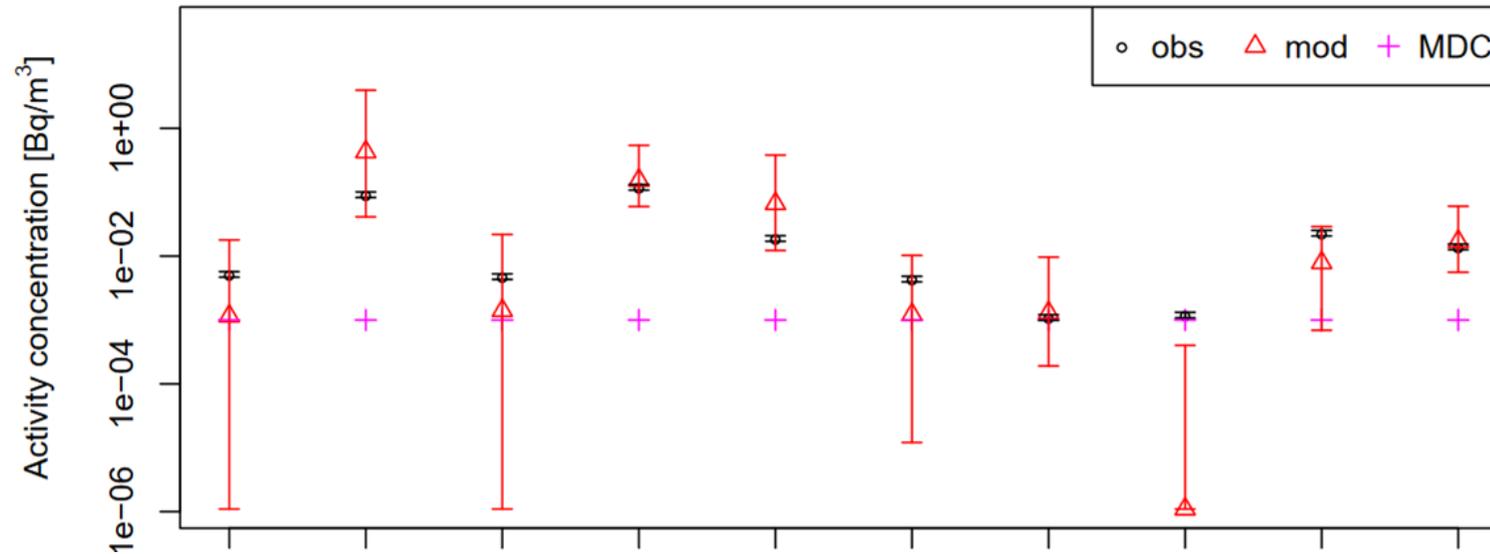
Quantité  
accumulée

Début et fin du rejet



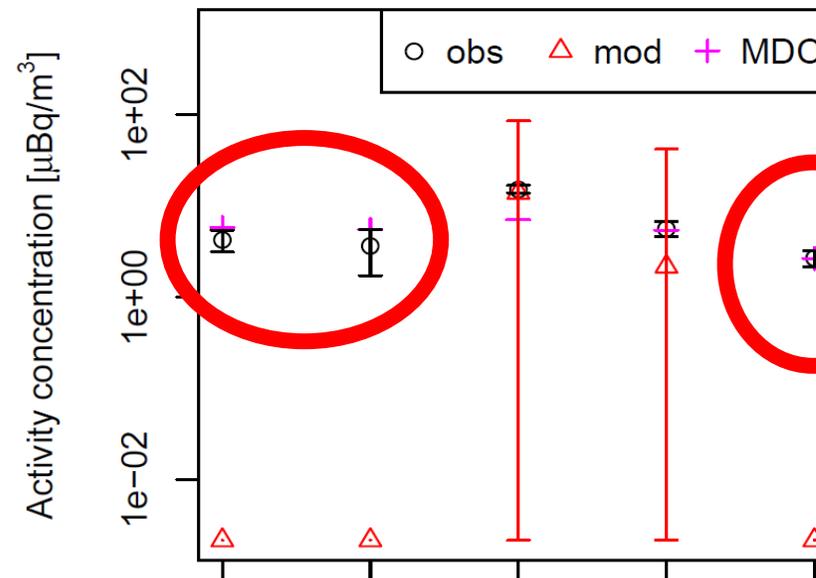
*(exemple fictif; bref rejet)*

# Si l'inférence est réussie : bon accord entre les activités volumiques observées et simulées



**Exemple 1** : toutes les observations peuvent être expliquées par le terme source trouvé par FREAR

**Exemple 2** : trois observations ne sont pas expliquées par le terme source trouvé par FREAR

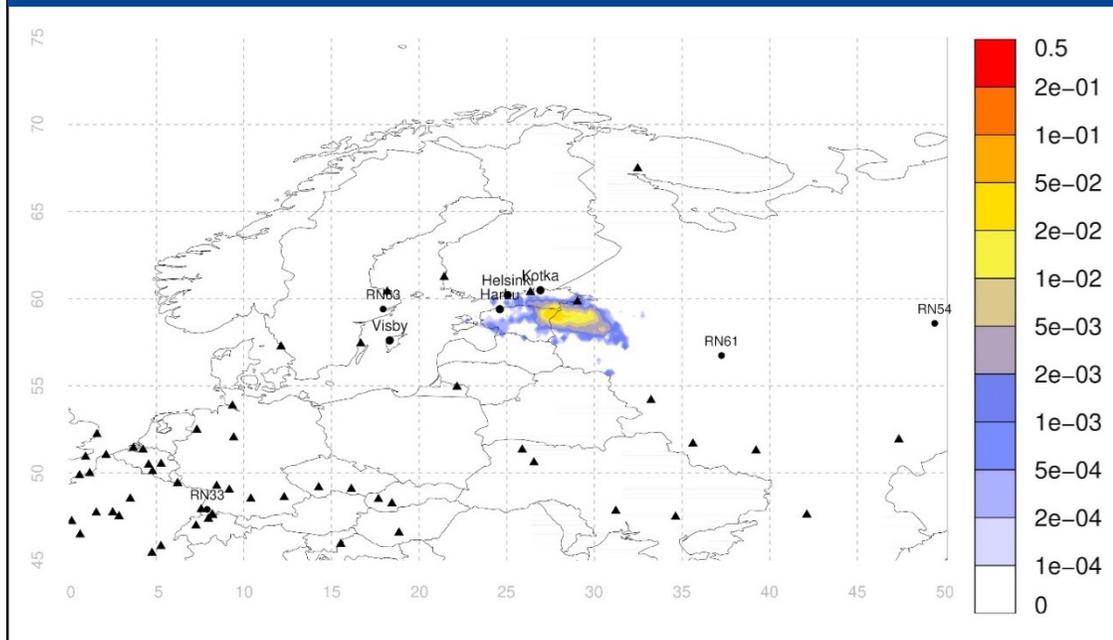


**Pas expliquées**

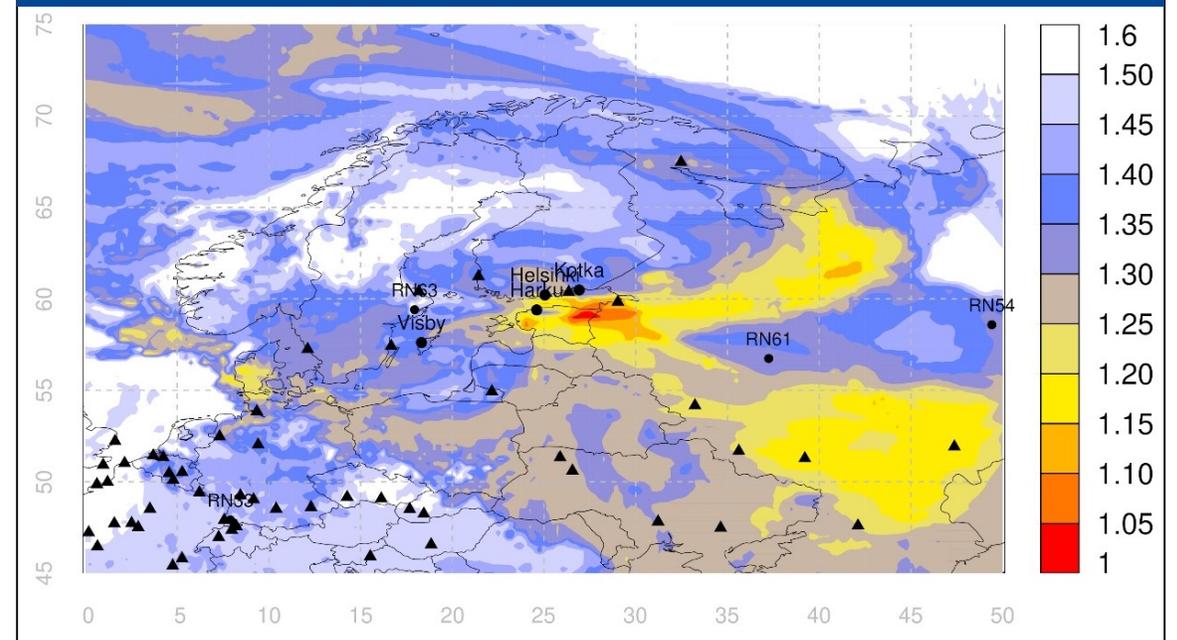
Ces détections pourraient, par exemple, provenir de plusieurs sources

# FREAR propose deux méthodes indépendantes pour la reconstruction du terme source

## méthode bayésienne



## méthode fonction de coût

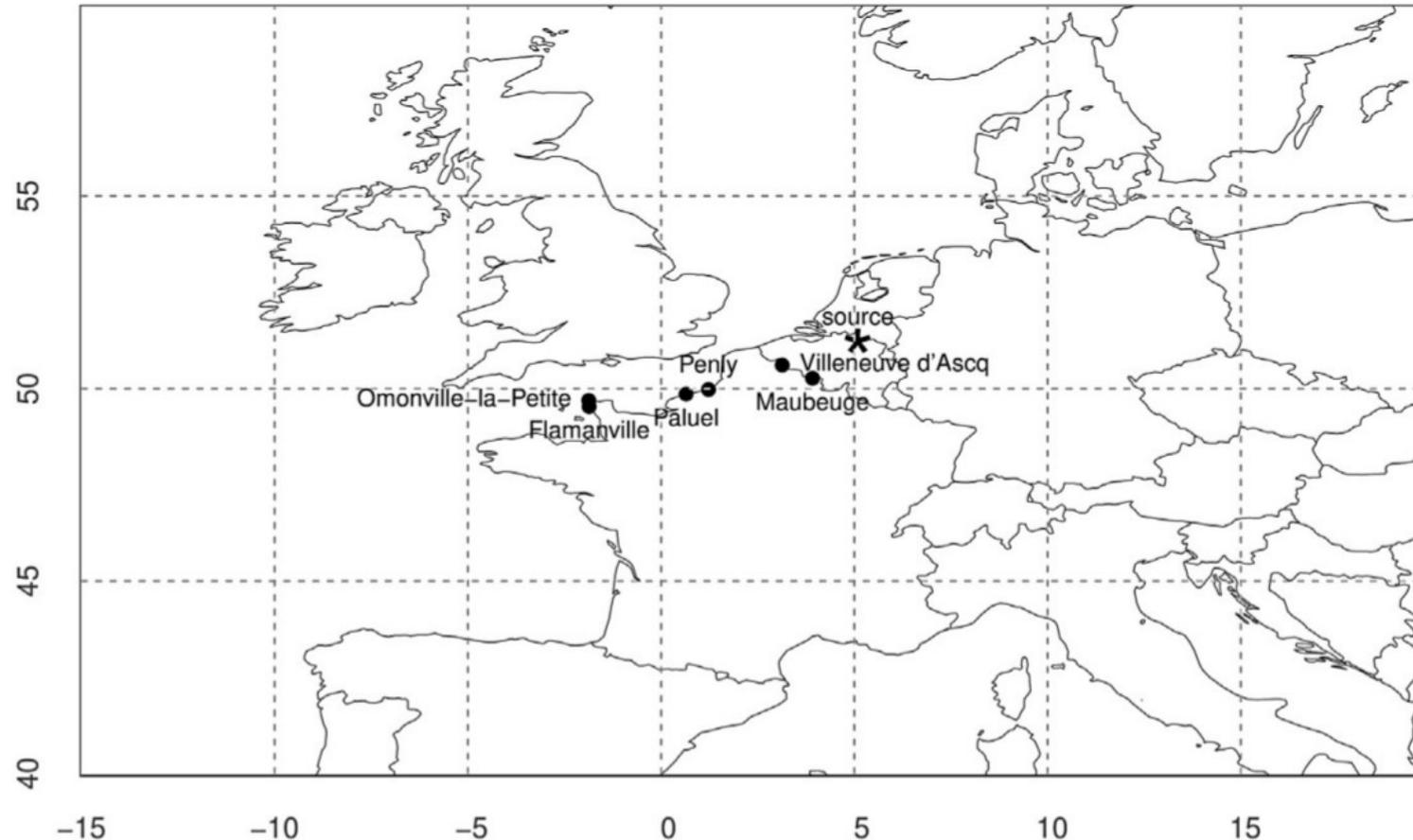


Reconstruction du terme source pour une série de détections de radionucléides artificiels en Europe du Nord à l'aide des deux méthodes de reconstruction de terme source (présenté lors du webinaire NERIS sur les détections de radionucléides artificiels autour de la mer Baltique en 2021).

# Rejet anormal de sélénium-75



# La modélisation inverse est appliquée à l'aide de sept observations de Se-75 en France



**Données d'entrée :** 4 détections et 3 non-détections du réseau de l'IRSN

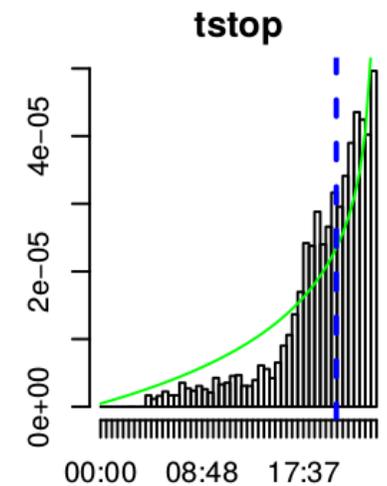
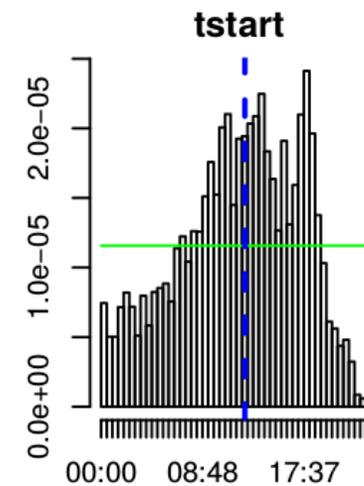
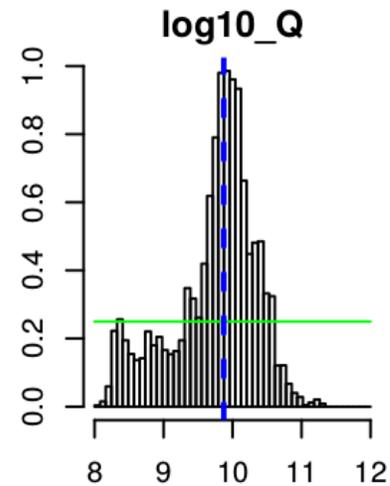
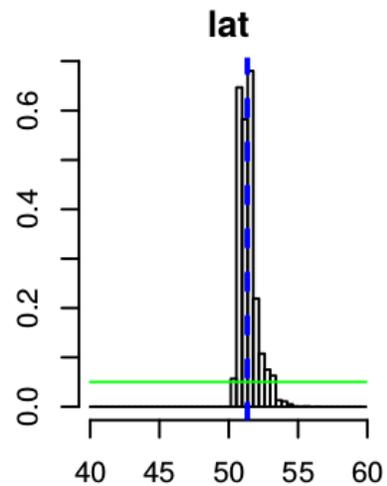
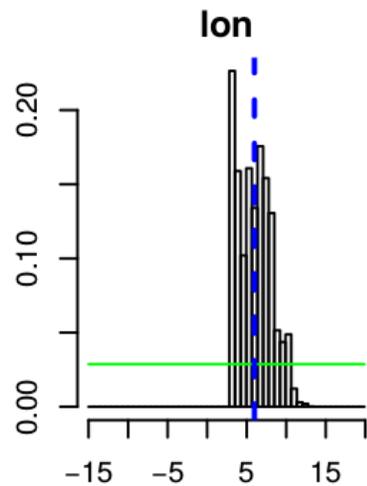
**Question de recherche :** peut-on reconstruire les paramètres de la source associés au rejet anormal de Se-75 au SCK CEN à l'aide de ces sept observations ?

# L'inférence bayésienne fournit les distributions marginales à posteriori pour les cinq paramètres source

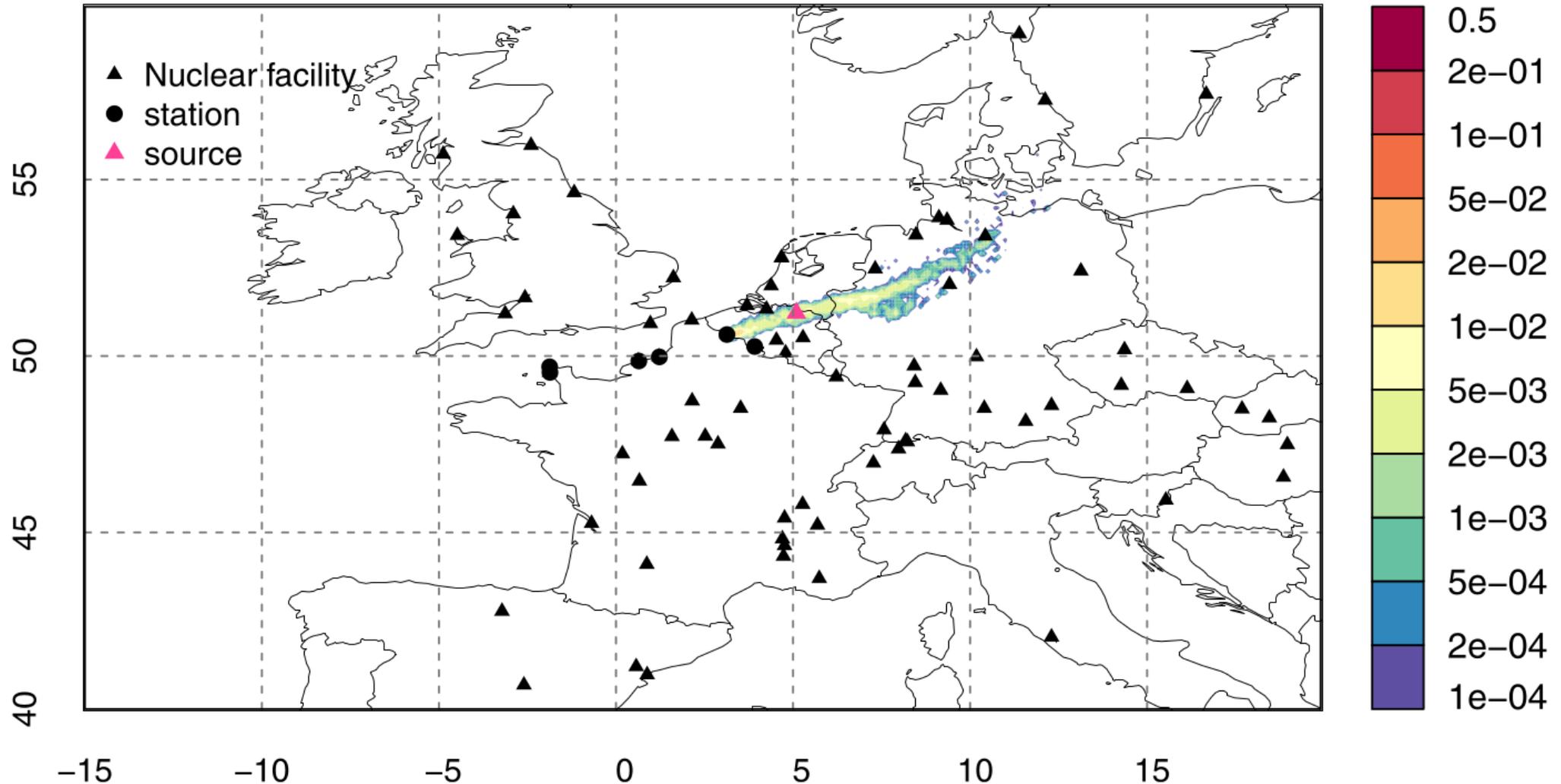
Localisation du rejet  
(longitude and latitude)

Quantité  
accumulée

Début et fin du rejet



# Le SCK CEN est situé dans la zone étroite de forte probabilité pour la localisation de la source



# La qualité de l'inférence est évaluée en comparant les activités volumiques simulées et observées

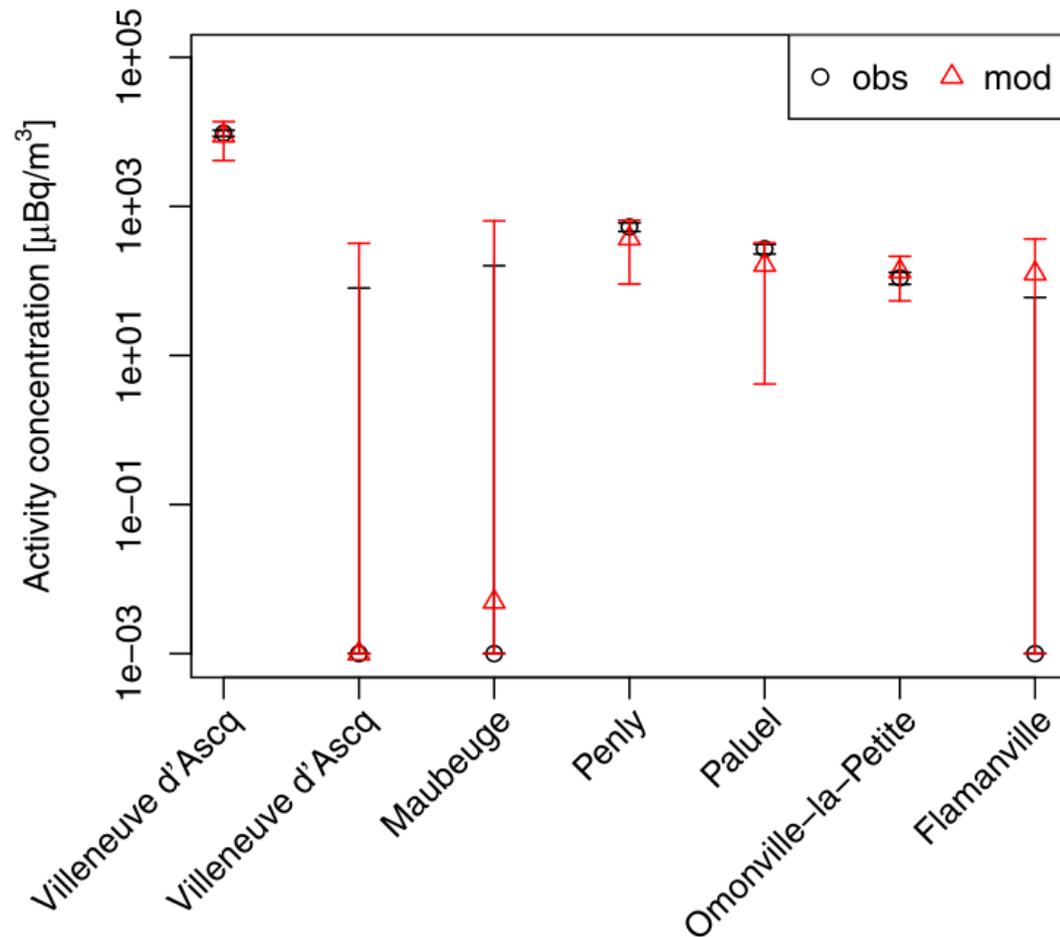
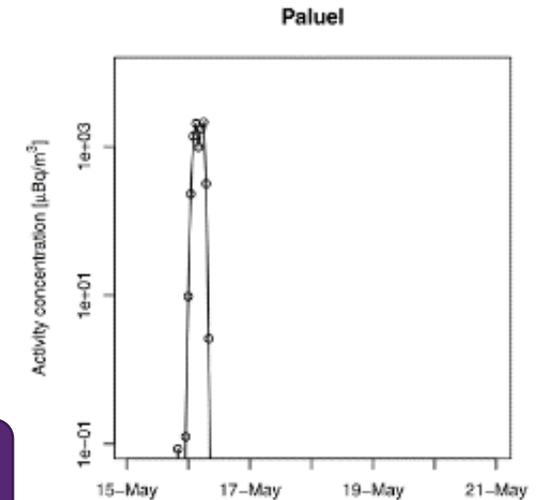


Fig. 7. Comparison between the observed and simulated activity concentrations. Each pair of black dot–red triangle represents a single observation (obs) and its associated model prediction (mod). The labels on the  $x$ -axis denote the station where the observation was made. Because of the logarithmic  $y$ -axis, and for plotting purposes only, non-detections were given an arbitrary activity concentration of  $10^{-3}$   $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

# L'inférence bayésienne a été affinée en fixant le lieu du rejet + en considérant une « fenêtre de détection »

Les observations avaient de longues périodes d'échantillonnage (jusqu'à une semaine)

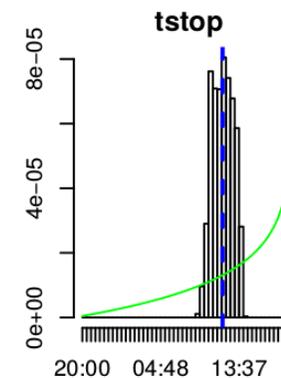
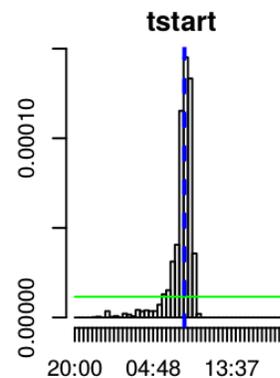
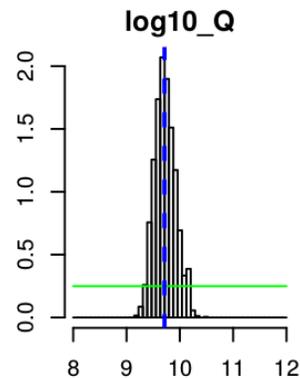
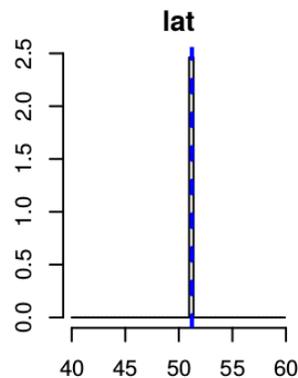
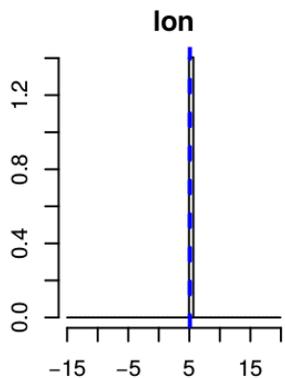
Division de chaque détection en 3 observations hypothétiques : une non-détection, une détection et une non-détection (+ redimensionner la concentration détectée)



Localisation du rejet  
(longitude and latitude)

Quantité  
accumulée

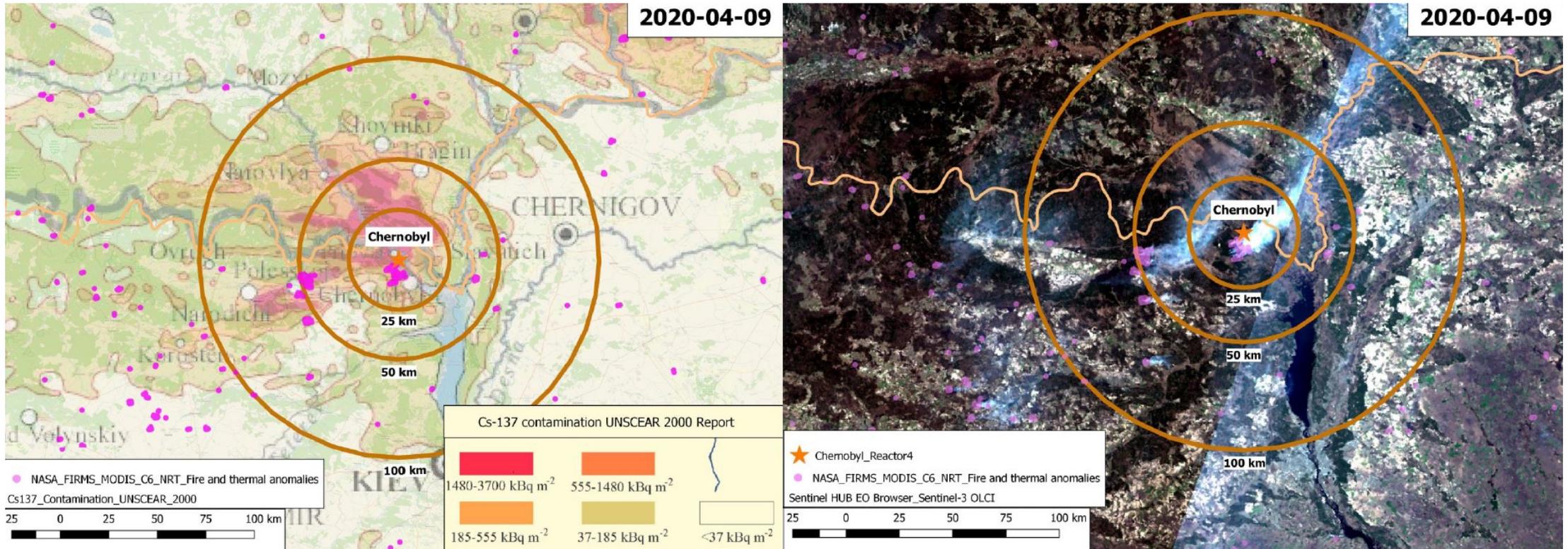
Début et fin du rejet



# Les incendies de forêt à Tchernobyl en avril 2020



# Les incendies de forêt ont remis en suspension des particules radioactives dans l'atmosphère

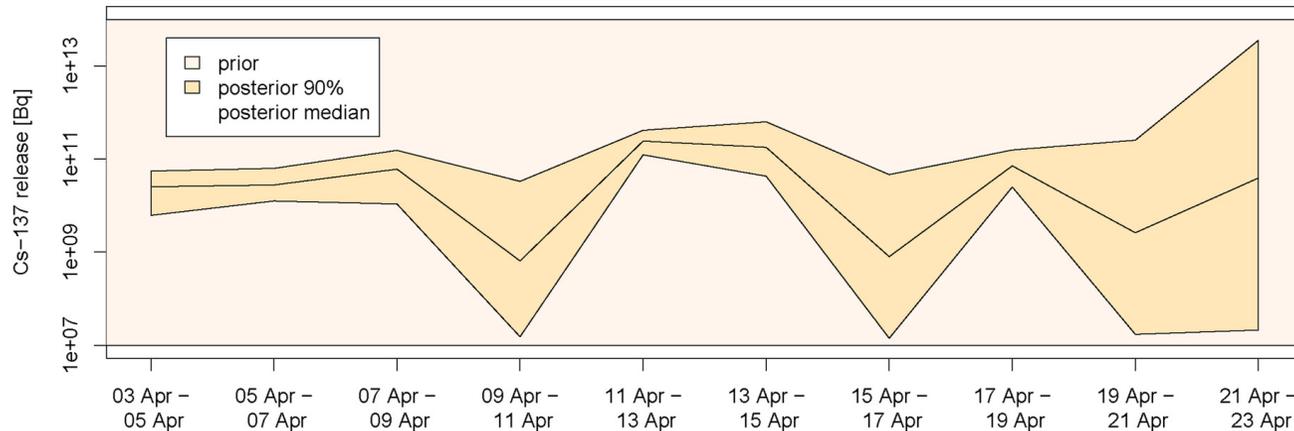


Objectif: déterminer le rejet de Cs-137 à l'aide de mesures régionales d'activité volumique de Cs-137 dans l'air

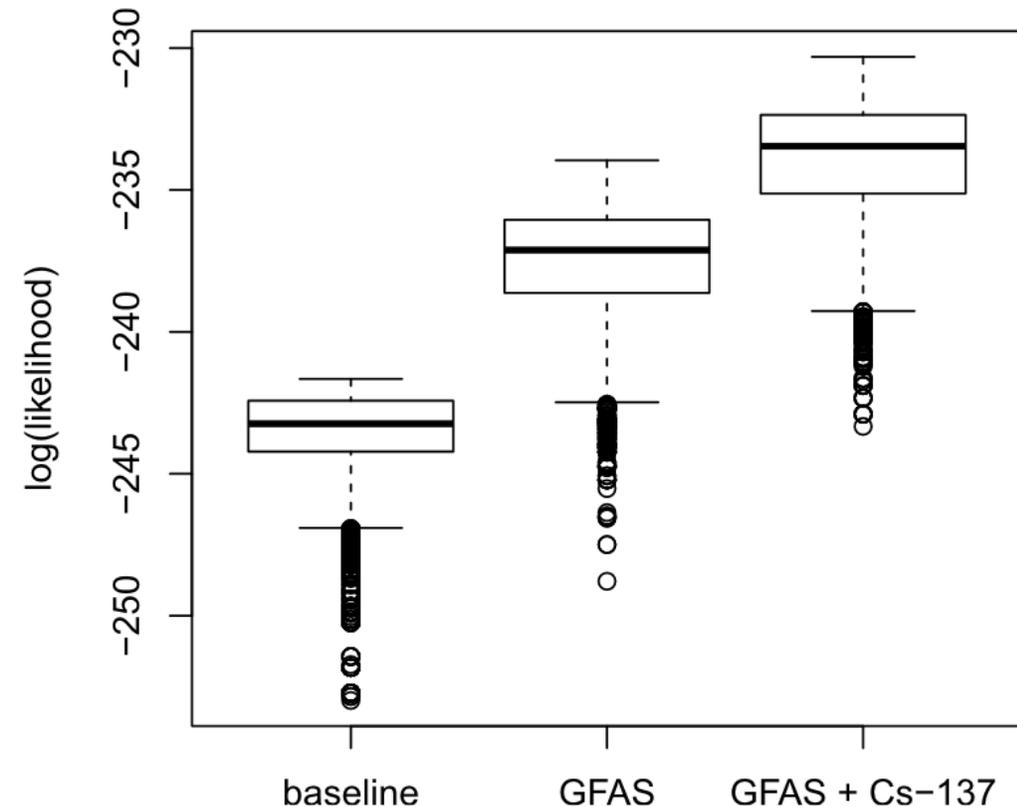
# FREAR propose un paramétrage flexible des sources

Trois expériences ont été menées :

1. **Baseline**: un emplacement fixe pour la source, rejet segmenté
2. **GFAS**: 2985 points d'émission géotemporels avec la hauteur et quantité du rejet relatives à la puissance du feu observée
3. **GFAS + Cs-137**: comme GFAS, mais la quantité du rejet est également relative au dépôt historique en Cs-137



*Estimation de la série chronologique de rejets de Cs-137 pendant les incendies de forêt à Tchernobyl en avril 2020*



Une paramétrisation du rejet plus élaborée conduit à une probabilité plus élevée et donc explique mieux les observations (note : les trois utilisent les mêmes paramètres inférés)

# Conclusions

- « FREAR » combine des mesures de concentration de radionucléides dans l'air et la modélisation du transport dans l'atmosphère pour déterminer les paramètres d'un rejet
- Deux méthodes sont disponibles: une méthode d'optimisation de la fonction de coût en une méthode bayésienne
- L'outil a été appliqué avec succès pour étudier:
  1. Le rejet anormal de sélénium du BR2 au SCK CEN en mai 2019
  2. Le rejet de césium-137 à la suite des incendies de forêt dans la zone d'exclusion de Tchernobyl en avril 2020

FREAR est mis à la disposition de la communauté scientifique sous les termes de la licence publique générale GNU version 3 (<https://gitlab.com/trDMt2er/FREAR>)

# Merci pour votre attention

This work has been partially supported by the PIANOFORTE project that has received funding from the H2020-EURATOM research and innovation program under the 101061037 grant agreement.

## Copyright © SCK CEN

### PLEASE NOTE!

This presentation contains data, information and formats for dedicated use only and may not be communicated, copied, reproduced, distributed or cited without the explicit written permission of SCK CEN.

If this explicit written permission has been obtained, please reference the author, followed by 'by courtesy of SCK CEN'.

Any infringement to this rule is illegal and entitles to claim damages from the infringer, without prejudice to any other right in case of granting a patent or registration in the field of intellectual property.

### **SCK CEN**

Belgian Nuclear Research Centre

Foundation of Public Utility

Registered Office: Avenue Herrmann-Debrouxlaan 40 – BE-1160 BRUSSELS

Operational Office: Boeretang 200 – BE-2400 MOL