



**PROJET LEGATO (2017-2020) : TRANSFERTS DE TRITIUM DE L'ATMOSPHÈRE
AUX LÉGUMES FEUILLES, FRUITS ET TUBERCULES - EXPÉRIMENTATIONS DE
TERRAIN ET MODÉLISATION OPÉRATIONNELLE**

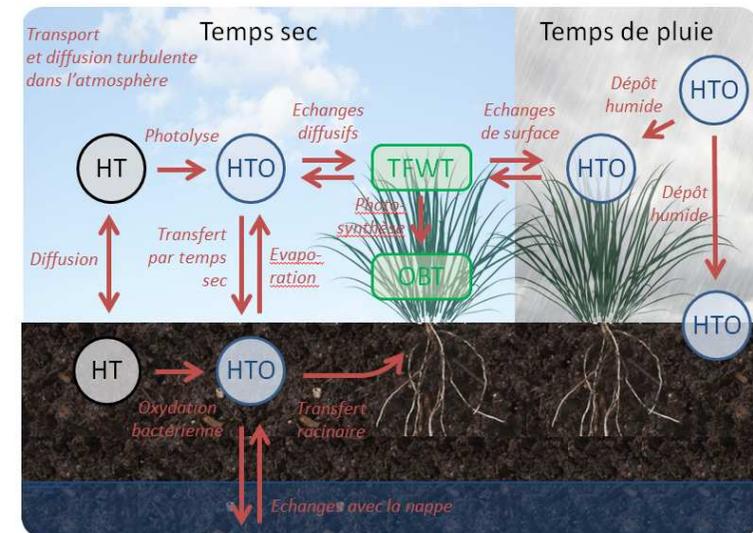
*Philippe LAGUIONIE, Cécile BOYER, Hugo RENARD, Erwann MARTIN, Arnaud MARTIN
GARIN, Marianne ROZET, Didier HEBERT, Luc SOLIER, Marianne LAMOTTE et Denis MARO*

Tritium ^3H dans l'environnement

- **Emetteur** β
- **Demi-vie** $T_{1/2} = 12,3$ ans
- **Origines** Naturelle – haute atmosphère
Anthropique – Orano La Hague, CNPE, ITER, ...
- **Formes** Eau tritiée (HTO) (forme principale)
Hydrogène tritié (HT)
Méthane tritié (CH_3T)
Particules tritiées
Tritium de l'Eau de Déshydratation (TED/TFWT)
Tritium Organiquement Lié (TOL/OBT)
- **HTO** Bruit de fond naturel $\sim 0,1-0,6$ Bq L $^{-1}$
Bruit de fond anthropique $\sim 1-4$ Bq L $^{-1}$
Suit le cycle de l'eau
Seuil d'alerte pour l'eau de boisson : 100 Bq L $^{-1}$



Plateforme Technique IRSN La Hague de l'IRSN (PTILH)



Voies de transferts et formes du tritium

Projet LEGATO (2017-2020)

[ENJEUX

- **Pour la recherche** Identifier et modéliser les transferts du tritium aux produits maraîchers
- **Pour l'expertise** Disposer d'un module opérationnel de transfert du tritium dans l'environnement dans la plateforme SYMBIOSE de calcul d'impact dosimétrique à l'homme
- **Pour la société civile** Savoir expliquer les activités de tritium dans les produits de consommation

[CONTEXTE

- **Partenariat** IRSN et EDF (co-financement sur une une fiche GGP Environnement)
- **Transversalité** interne IRSN : PSE-ENV/SEREN (expertise) et PSE-ENV/SAME (métrologie)
interne EDF : EDF R&D (recherche)

Projet LEGATO (2017-2020)

[OBJECTIFS

■ Etude des transferts du tritium au sein d'un écosystème maraîcher constitué de légumes feuille (salade), fruit (courgette) et tubercule (pomme de terre)

- Identification des voies de transfert et de leur cinétique
- Quantification des transferts
- Paramétrisation des transferts en fonction des conditions environnementales de la croissance végétale
- Construction d'un modèle opérationnel (TOCATTA-2020) validé par des données acquises *in situ*

■ Etude du rabattement du tritium atmosphérique HTO par les gouttes de pluie

- Quantification du taux de rabattement Λ (s^{-1})

■ Etude du fractionnement isotopique du tritium dans une salade

Cap de la Hague & Plateforme Technique IRSN La Hague (PTILH)

- **Superficie** 1 500 m²
- **Localisation** 2 km au nord de l'usine Orano La Hague
30 min de IRSN/LRC
- **Proximité de points de rejetés contrôlés**
Rejets atmosphériques et marins
Flux par rejet quantifiés
- **Caractéristiques des rejets atmosphériques**
Fortement dynamiques
Tout au long de l'année
Présence de ⁸⁵Kr (mesures temps réel)
- **Modularité du site en fonction des besoins**
- **Radionucléides d'origine atmosphérique actuellement mesurables**
⁸⁵Kr, ³H, ¹²⁹I, ¹⁴C et ³⁶Cl



Cap de la Hague



PTILH (vue vers le sud)



PTILH (vue vers le nord)

Cultures maraîchères sur la PTILH

■ Cultures en potager & sous abris : arrosage avec eau non tritiée ($< 1 \text{ Bq L}^{-1}$) et tritiée ($\sim 100 \text{ Bq L}^{-1}$)

■ Mesures météorologiques ($\Delta T = 30 \text{ min}$)

- T° (air et sol), HR , PAR et P_{atm}
- I_{pluie} , V_{vent} et Th_{vent} (culture en potager)

■ Mesures écophysiologicals ($\Delta T = 7 \text{ à } 15 \text{ jours}$)

- m_s (feuilles/fruits/tubercules), θ et LAI
- Flux de CO_2 à l'échelle du plant
- Flux de CO_2 à l'échelle de la feuille
- V_{cmax} , J , TPU , Rd et flux d'adsorption

■ Mesures de radioactivité ($\Delta T = 2 \text{ à } 30 \text{ jours}$)

- 2100 mesures (HTO, TFWT et OBT)
- Plants : distinction feuille, fruit/tubercule



Cultures de salades (2 mai-29 juin et 10 août-10 octobre 2017)



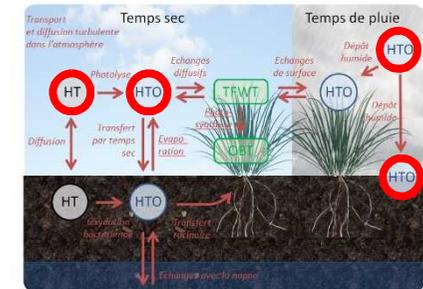
Cultures de courgettes (du 17 mai au 6 septembre 2018)



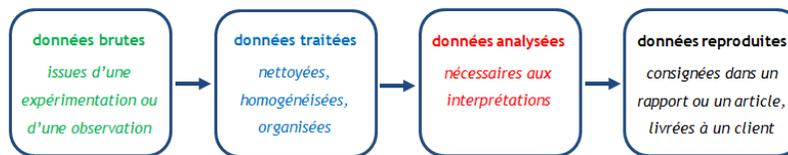
Cultures de pommes de terre (du 25 avril au 2 août 2019)

Focus n°1 : Activités volumiques horaires de HT et HTO à la PTILH

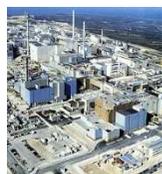
Reconstruction des activités de HT et HTO dans l'air, et de HTO dans la pluie au pas de temps horaire, sur la PTILH (Maro *et al.*, 2017)



Mise en place d'une démarche qualité sur la traçabilité des résultats (MOP LRC-ET-PRO-009)



Automatisation du traitement des données rendu possible par le caractère routinier de ce travail spécifique



Rejets (1 mois)



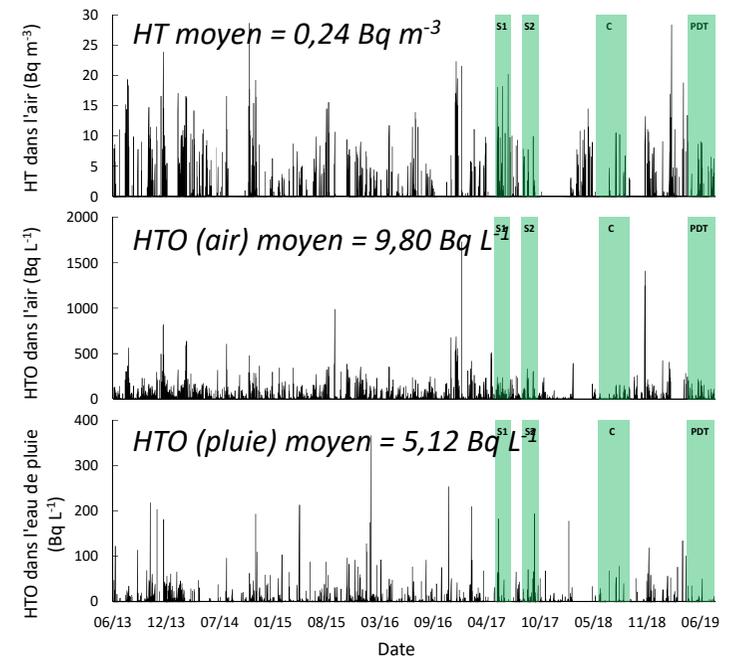
^{85}Kr (1 min)



HT (1 mois)

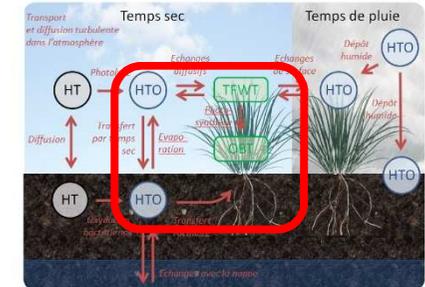
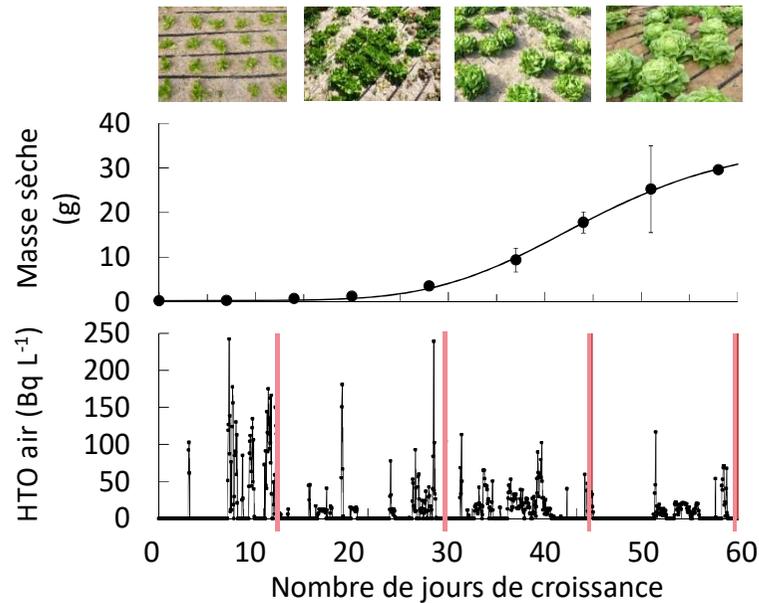


HTO (48 h)



Focus n°2 : Transfert racinaire et échanges diffusifs

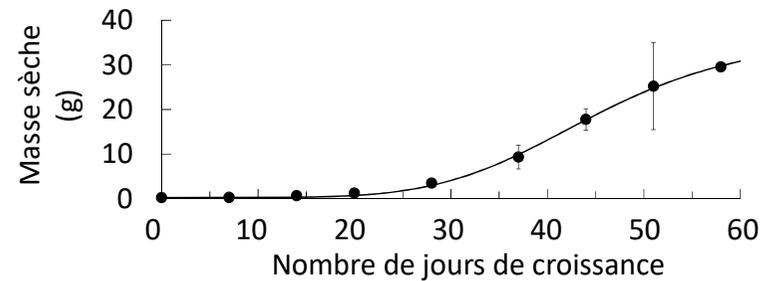
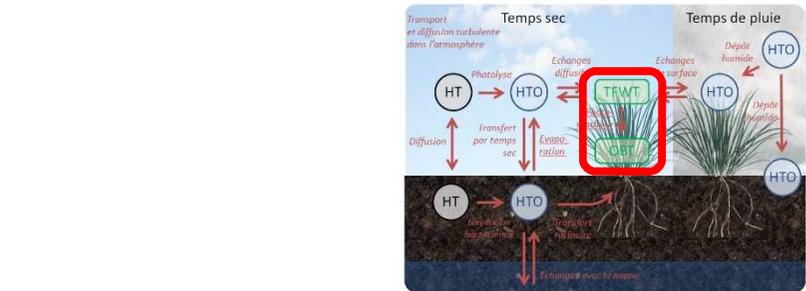
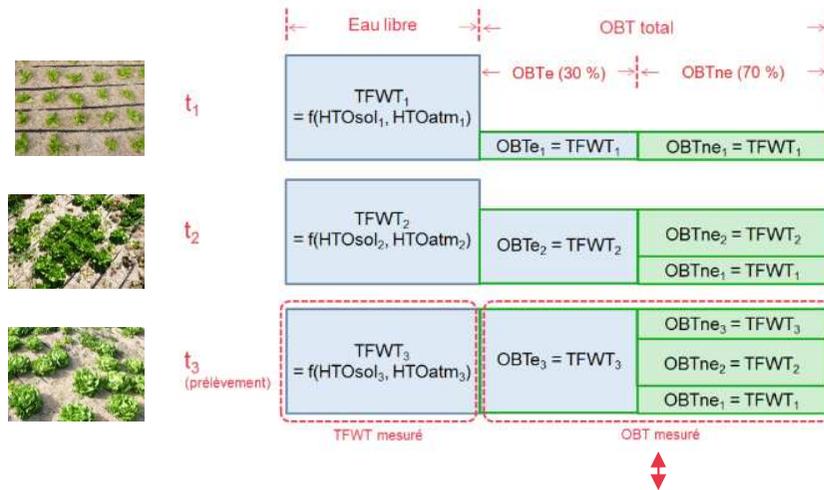
- TFWT \neq OBT au moment du prélèvement (> ou <)
- TFWT fonction de HTO (air et sol) à l'instant t
- OBT intègre les variations d'activités de HTO (air et sol) depuis t_0
- OBT fonction de la croissance (non linéaire) des plantes



Tritium dans l'eau libre de la salade TFWT (Bq L ⁻¹)	38,5 ± 1,7	9,4 ± 1,0	9,7 ± 1,0	7,3 ± 0,9
Tritium dans la matière organique de la salade OBT (Bq L ⁻¹)	23,3 ± 1,4	10,3 ± 0,8	9,5 ± 1,0	7,5 ± 1,7
Tritium dans l'eau du sol HTO sol (Bq L ⁻¹)	8,0 ± 0,9	6,3 ± 0,9	7,1 ± 0,9	6,6 ± 0,9

Focus n°3 : OBt dans la plante

Evolution de l'OBt lors de la croissance de la plante



Précautions prises lors du traitement des échantillons (Maro *et al.*, 2017)

- Suivi de l'activité de HTO dans l'air au cours du traitement de l'échantillon (*in lab*)
- Quantification de la réhydratation de l'échantillon à l'issue de la lyophilisation
- Correction de l'OBT mesuré à partir de l'activité en HTO de l'eau de réhydratation

Modèle opérationnel TOCATT-2020

■ Modèle orienté recherche : **TOCATT-Khi-2020** (pas de temps physiologique horaire)

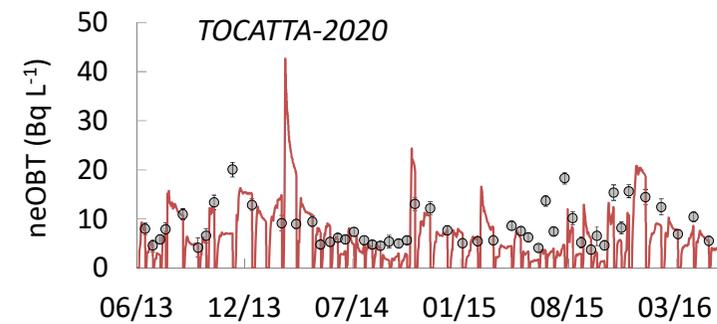
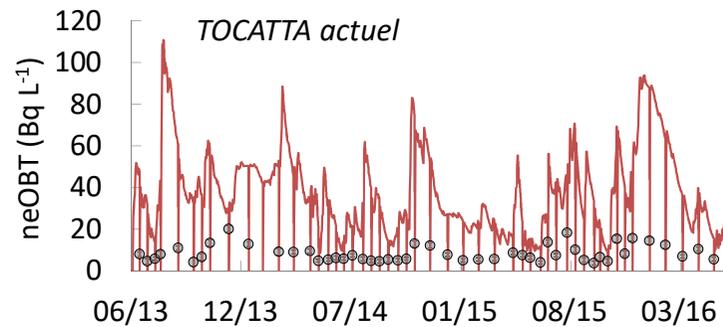


■ Modèle orienté expertise : **TOCATT-2020** qui sera implémenté dans la prochaine version de la plateforme SYMBIOSE de calcul d'impact dosimétrique sur l'homme (pas de temps physiologique journalier)

- Opérationnalité : données d'entrées et temps de calcul limités
- Evapotranspiration fonction du temps (saisonnalité)
- Oxydation bactérienne du HT en HTO dans le sol
- TFWT fonction des variations du stock d'eau dans la plante avec assimilation racinaire calculée sur une base physique
- OBt fonction du TFWT (prise en compte des apports racinaire et foliaire)
- OBt total = %eOBt (=TFWT) + %neOBt
- OBt construit à partir des variations de matière sèche

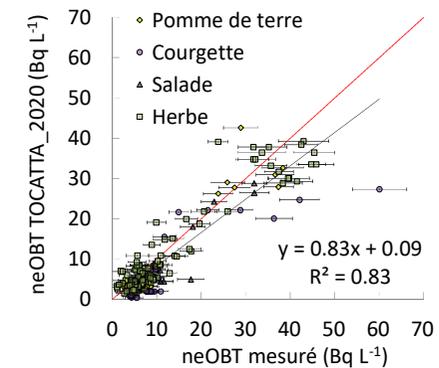
Modèle opérationnel TOCATTa-2020

Scénario réel à partir des données VATO (2013-2016) (herbe de prairie)



Ensemble des données des projets VATO et LEGATO

- Reproduction des mesures avec un ratio modèle/mesure
moyen de 1,1
inférieur à 2,5 dans 95 % des cas

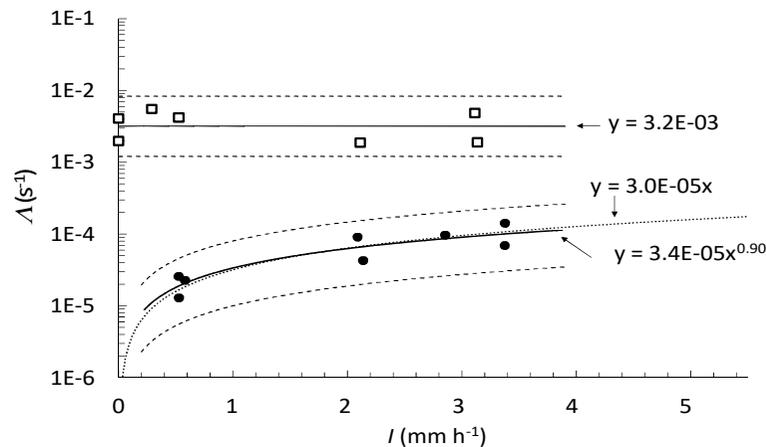


Focus n°4 : Rabattement de HTO par la pluie

$$\frac{C_{HTO}^{eau}}{\int_0^{+\infty} C_{HTO}^{atm,pluie}(z) dz} I = -\Lambda \quad (\bullet)$$

Quantifier les taux de rabattement suivant 2 approches (simultanément) $\frac{dC_{HTO}^{atm,pluie}(t)}{dt} = -\Lambda C_{HTO}^{atm,pluie}(t) \quad (\square)$

- Résolution de l'équation différentielle à partir d'un double traçage de la masse d'air (HTO et ^{85}Kr) autour de l'usine Orano La Hague
- Mesure des paramètres météorologiques et des caractéristiques de la pluie (intensité, distribution granulométrique des tailles de gouttes et vitesses terminales de chute des gouttes)



Dispositifs mobiles pour la mesure du ^{85}Kr dans l'air, et du prélèvement de la vapeur d'eau de l'air et de l'eau de pluie pour la mesure de HTO

Conclusion

Recherche

- **Processus non site-spécifiques**
 - » Cinétiques de formation du TFWT et de l'OBT
 - » Absence de fractionnement isotopique
 - » Contributions relatives des voies racinaire et foliaire au TFWT
 - » Oxydation bactérienne de HT en HTO dans le sol
 - » Processus de rabattement de HTO par la pluie (*publication en cours*)
- **Modèle de recherche TOCATA-Khi-2020** (*publication en cours*)
 - » Validé par des données expérimentales
- **Métrologie de l'OBT (réalisée au IRSN/PSE-ENV/SAME)**
 - » Mesure par combustion des échantillons
 - » Mesure par émanation de l'hélium
- **Traitement des échantillons**
 - » Réhydratation après lyophilisation – exemple : HTO = 1 Bq m⁻³ dans l'air d'un laboratoire → erreur d'un facteur 3 sur l'OBT

Conclusion

Expertise

- **Modèle orienté expertise TOCATA-2020**
 - » Implémentation dans la prochaine version de la plateforme SYMBIOSE de calcul d'impact dosimétrique sur l'homme (réalisée au IRSN/PSE-ENV/SEREN)

Société civile

- **Exemple des végétaux dans la Hague (herbe de prairie & légumes feuille, fruit et tubercule)**
 - » Ratio entre valeurs observées et modélisées
 - 2013 : près d'un ordre de grandeur
 - 2020 : facteur moyen de 1,1 (< 2,5 dans 95 % des cas)

Communauté internationale

- **Base de données unique à disposition** (*publication en cours*)
 - » Mesures météorologiques ($\Delta T = 30$ min), écophysiologicals ($\Delta T = 7$ à 15 jours), et de radioactivité ($\Delta T = 2$ à 30 jours),
 - » Herbe de prairie (2013-2016) et légumes feuille, fruit et tubercule (2017-2020)

Contacts

- Philippe LAGUIONIE
IRSN
Pôle Santé Environnement – Direction Environnement
Service de Recherche sur les Transferts et les Effets des radionucléides sur les écosystèmes
Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-en-Cotentin

50130 Cherbourg-en-Cotentin, France
philippe.laguionie@irsn.fr
- Cécile BOYER
EDF
Direction du Parc Nucléaire et Thermique
Division de l'Ingénierie du Parc et de l'Environnement
Département Etudes Ilot Nucléaire
Service Environnement

69100 Villeurbanne, France
cecile-c.boyer@edf.fr