



**IMT Atlantique**

Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom



# L'IODE DANS L'ENVIRONNEMENT

Abdesslam ABDELOUAS & Christoph HARTNACK

SUBATECH

abdesselam.abdelouas@subatech.in2p3.fr

**L'IODE DANS TOUS SES ETATS 26 Mars, 2024**

## ➤ Iodes radioactifs

- Production

## ➤ Iodes dans l'environnement

- Cycle dans l'environnement

# L'iode radioactif

Isotope	120	123	124	125	126	127	128
Demi vie	1,35h	13,2h	4,18j	60,1j	13j	stable	25m
Mode de desintégr.	CE, $\beta^-$	CE	CE, $\beta^+$	CE	CE, $\beta^-$ , $\beta^+$		$\beta^-$ , $\beta^+$ , CE
Gamma majeur (keV)	560	159	603	27,5	389, 666, 754		443

Isotope	129	130	131	132	133	134	135
Demi vie	1,5E7 a	12,4h	8,02j	2,3h	20,8h	52,6m	6,61h
Mode de desintégr.	$\beta^-$	$\beta^-$	$\beta^-$	$\beta^-$	$\beta^-$	$\beta^-$	$\beta^-$
Gamma majeur (keV)	29,8	418, 536, 740	364,5	668	530	884	1132, 1260

Production par réaction nucl.

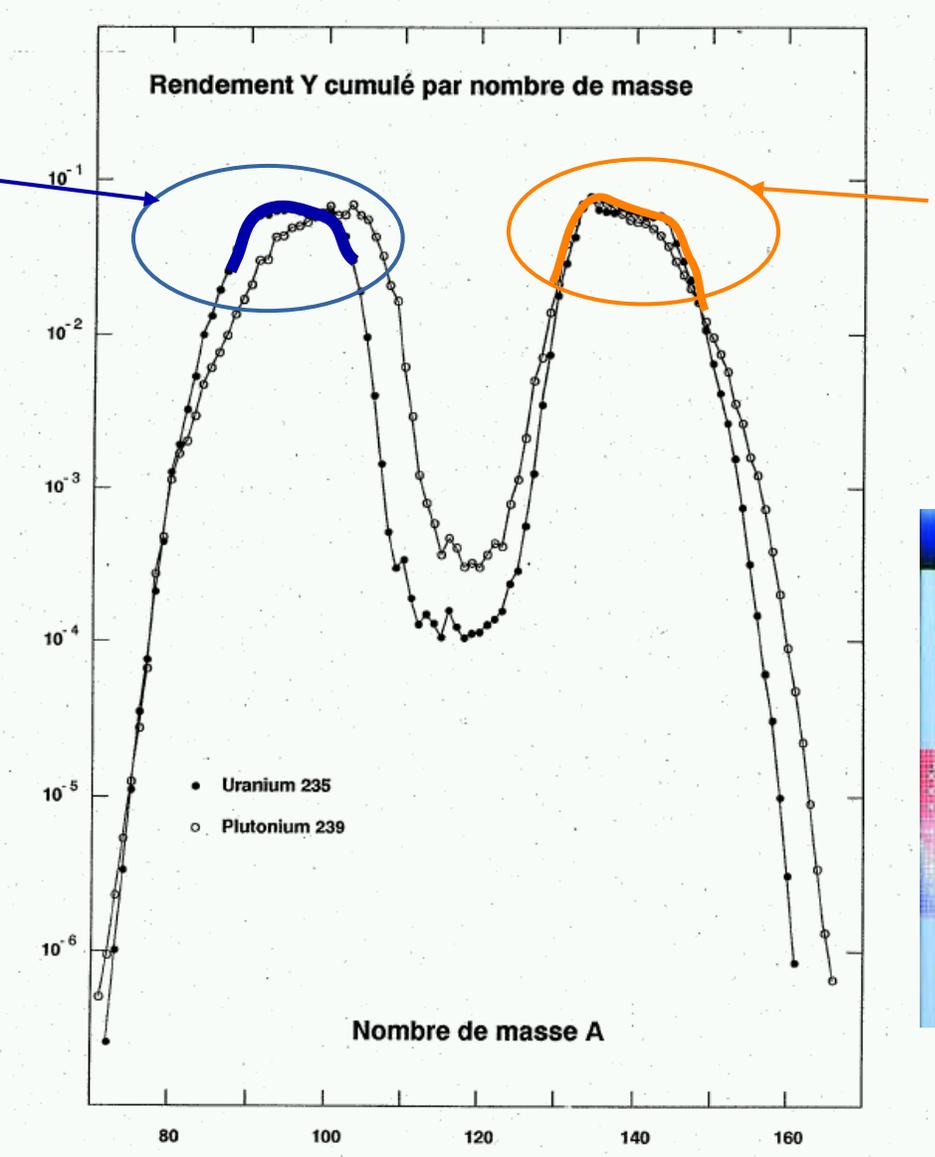
Production par fission

Sélection des isotopes les plus utilisés parmi 37 isotopes connus.  
Tous les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques !

# La fission nucléaire

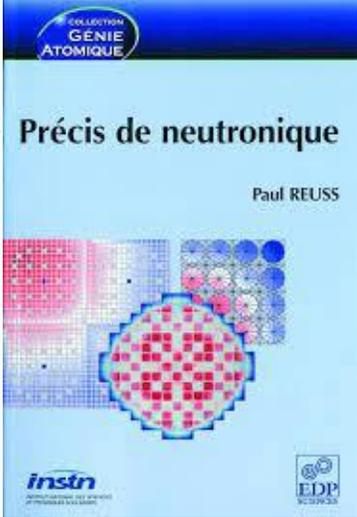
Zone autour de  
 $A=90-100$   
Kr, Sr, Nb, Tc, Mo, Ru

Production de Tc-99



Zone autour de  
 $A=130-140$   
Te, I, Xe, Cs  
Lanthanides

Production de I-131

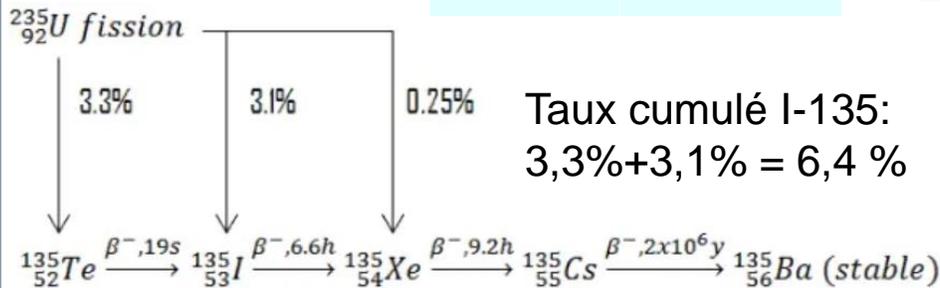


# Les produits de fission

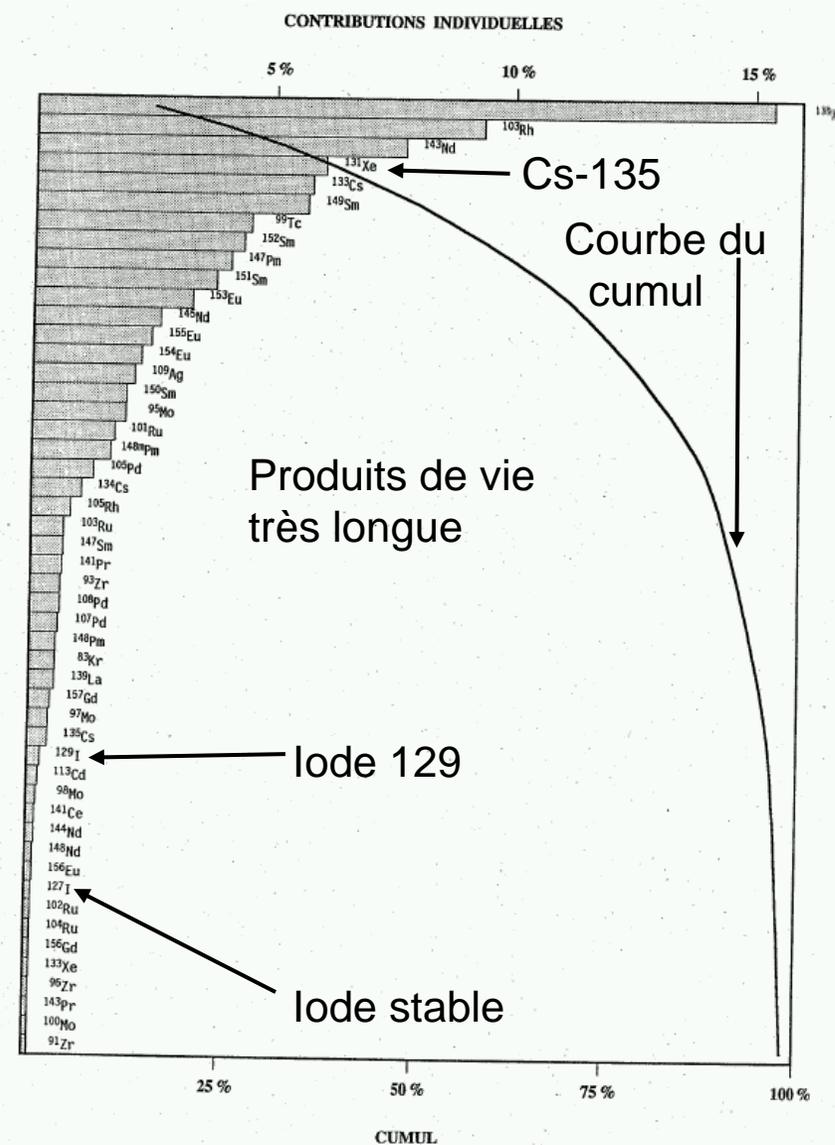
Les produits de fission sont trop riches en neutrons et se désintègrent en  $\beta^-$

Taux cumulé (%)

I-129	0,706
I-131	2,878
I-133	6,59
I-135	6,39



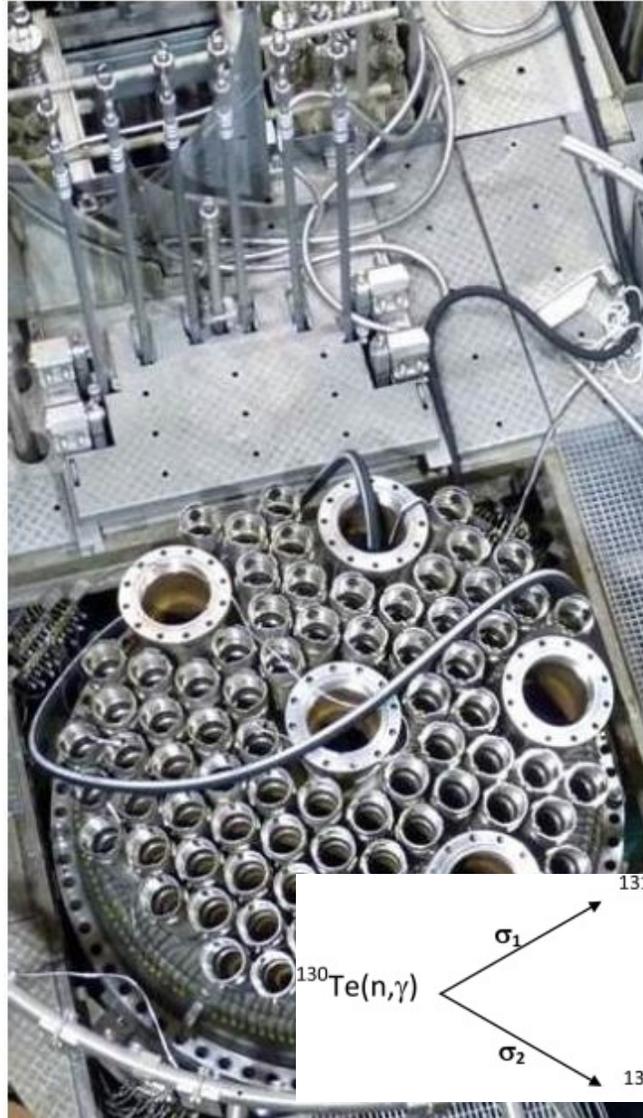
Produit de vie très longue: Cs-135



# Production de I-131 dans le réacteur

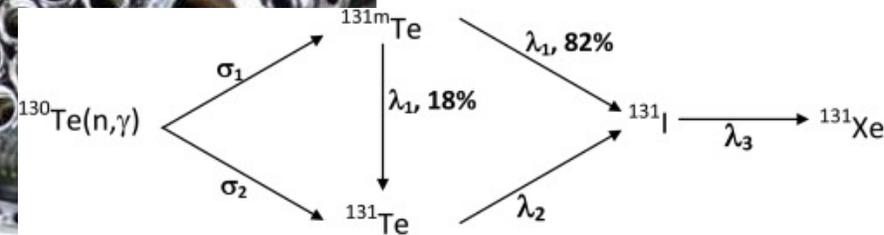
## Production par fission

- On expose une cible d'uranium enrichi au flux neutronique du réacteur pour produire les isotopes d'iode par la réaction de fission.
- Exclusion des isotopes I-133 et I-135 via un stockage de 24h avant le traitement avec de l'hydroxyde de sodium.
- Ensuite on pourra extraire de Mo-99 pour obtenir Tc-99m.



## Production par activation neutronique

- On expose une cible de tellure ( $\text{TeO}_2$  ou métal) enrichi en Te-130 au flux neutronique.
- La réaction de Te-130 avec le neutron crée l'isotope Te-131, qui se désintègre en I-131 via désintégration  $\beta$ .



Réacteur BR2 à Mol, Belgique

# Production de l'iode dans un cyclotron

- Production des isotopes d'iode en utilisant un faisceau de protons (ou d'autres noyaux légers) sur une cible de tellure:
  - Production de I-123, cet isotope émet un gamma d'énergie plus basse ( $E=159$  keV) que I-131 ( $E=364$  keV) sans émission  $\beta$ . Son utilisation est donc intéressante pour la scintigraphie SPECT.
    - ✓ Réaction  $\text{Te-123} + \text{p} \rightarrow \text{I-123} + \text{n}$
    - ✓ Réaction  $\text{Te-124} + \text{p} \rightarrow \text{I-123} + 2\text{n}$
    - ✓ Réaction avec précurseur Xe-123 (gazeux et donc facilement séparable)
      - ❖  $\text{Te-123} + \text{He-3} \rightarrow \text{Xe-123} + 3\text{n}$  ; Xe-123 se désintègre vers I-123 par CE et  $\beta^+$
  - Production de I-124, cet isotope peut émettre des  $\beta^+$  et est donc susceptible d'être utilisé pour la TEP. Application plutôt en recherche.
    - ✓ Réaction  $\text{Te-124} + \text{p} \rightarrow \text{I-124} + \text{n}$ 
      - ❖ Cette réaction est en compétition avec la réaction  $\text{Te-124} + \text{p} \rightarrow \text{I-123} + 2\text{n}$

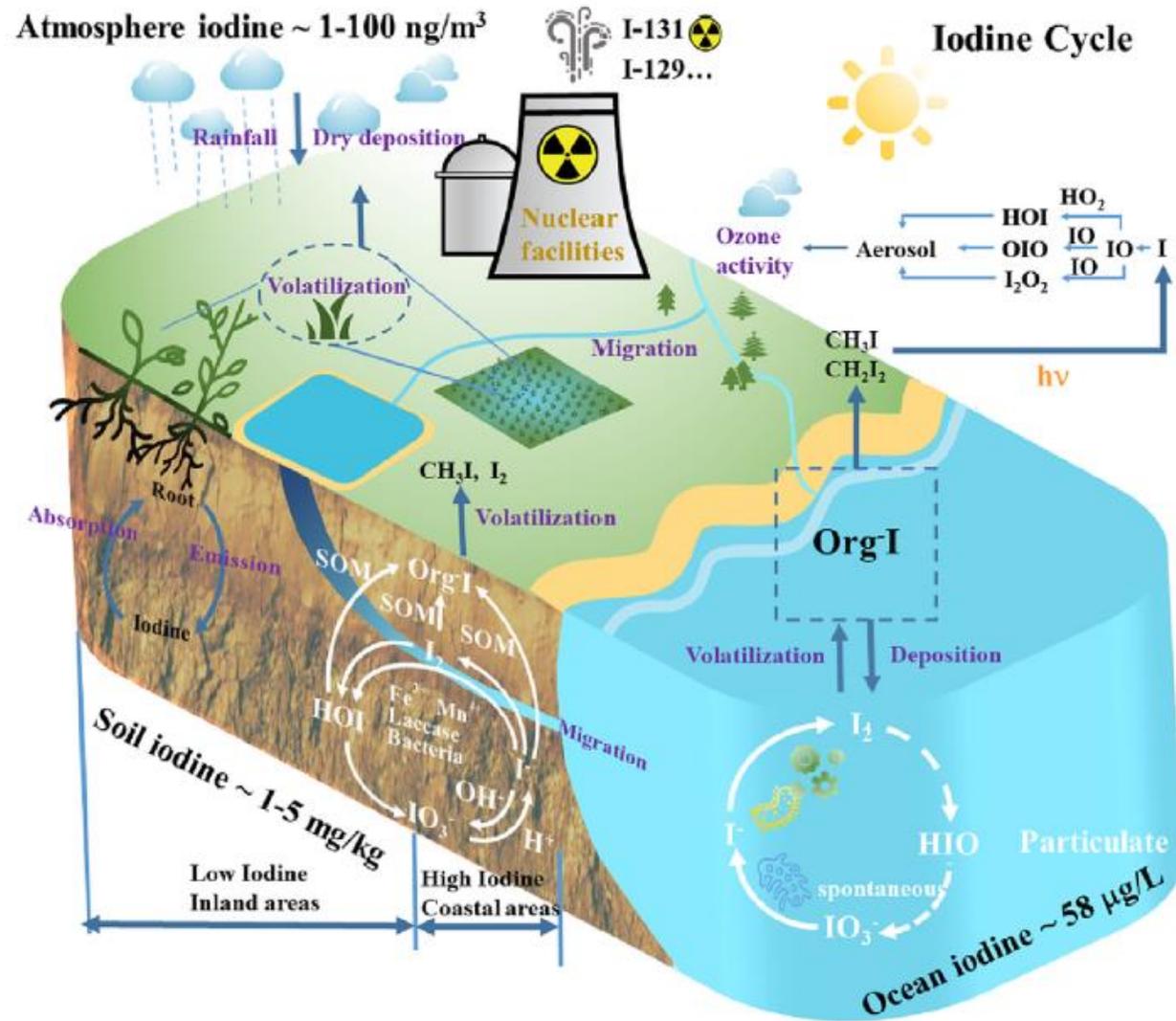


# Isotopes de l'iode radioactifs et leur implications

Isotope	Demi vie	Commentaires
129	1,5E7 a	Résidu essais nucléaires
125	60,1 j	Brachythérapie
126	13 j	Produit en analyse par activation neutr.
131	8,02 j	Thérapie thyroïde
124	4,18 j	TEP? Théragnostique?
133	20,8 h	Production dans le réacteur
123	13,2 h	Diagnostic SPECT
130	12,4 h	Produit en analyse par activation neutr.
135	6,61 h	Participe à l'effet Xenon dans le réacteur
132	2,3 h	Production dans le réacteur
120	1,35 h	Production par cyclotron
134	52,6 m	Production dans le réacteur
128	25 m	Produit en analyse par activation neutr.

Tous les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques et leur interaction avec l'environnement dépend de ces propriétés

# Cycle de l'iode



# Distribution de l'iode dans la croûte terrestre

Ensemble	Iode Abondance (tonnes)	Proportion (%)
Eaux marines	$7,00 \times 10^{10}$	0,81
Sédiments marins	$5,90 \times 10^{12}$	<b>68,2</b>
Croûte océanique	$5,40 \times 10^{10}$	0,62
Roches sédimentaires continentales	$2,40 \times 10^{12}$	<b>27,7</b>
Roches métamorphiques et magmatiques	$2,30 \times 10^{11}$	2,7
<b>Total</b>	$8,65 \times 10^{12}$	100

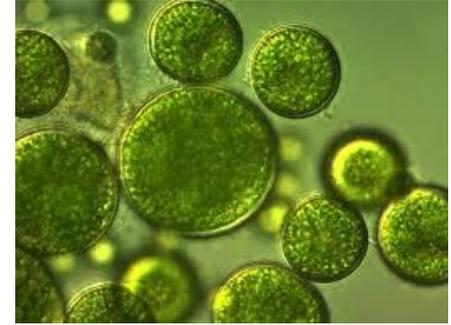
# L'iode dans le milieu marin

- L'iode est un élément très sensible au redox et existe principalement sous forme de  $\text{IO}_3^-$ ,  $\text{I}^-$  et d'iode organique dans l'environnement. Cette spéciation dépend largement des propriétés:
  - Physico-chimiques (pH et redox)
  - Biologiques (ex. littoral, océan de surface, océan profond)
- Le cycle de l'iode dépend donc de processus géologiques, chimiques et biologiques multiples comme par exemple:
  - Les embruns marins (aérosols),
  - Les dépôts secs et humides,
  - L'adsorption et la désorption,
  - La complexation, la volatilisation,
  - . . . .



# Transfert atmosphérique de l'iode

- Les transformations biologiques et photochimiques régulent les émissions d'iode organique volatile et d'iode moléculaire ( $I_2$ ):
  - Emission de l'iode organique est majoritairement dû aux micro-algues notamment en haute mer,
  - Les macro-algues sont les producteurs primaires dans les zones côtières
- L'iode enrichi dans les algues peut entrer dans l'atmosphère sous forme de composés organiques halogénés volatils (COHV):
  - $CH_3I$  sous l'action des méthyltransférases



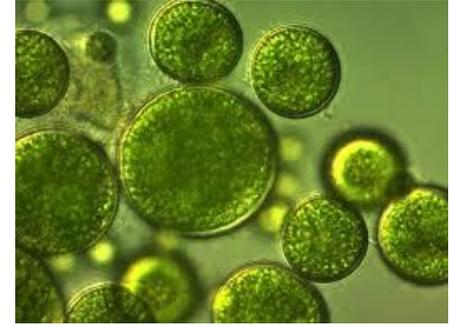
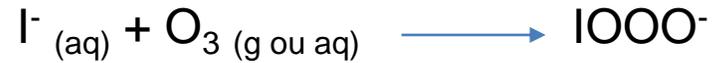
**Micro-algues**



**Macro-algues**

# Transformations chimiques de l'iode dans l'atmosphère

- Les émissions marines de l'iode se déclinent comme suivant:
- 20% d'iode organique (Carpenter *et al.*, 2013)
  - 80% I<sub>2</sub> et HIO (via l'action de O<sub>3</sub> sur I<sup>-</sup> à la surface des océans)



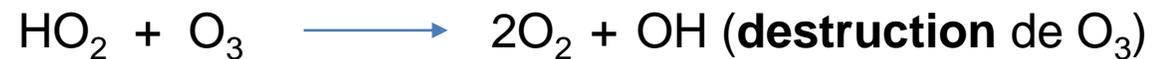
**Micro-algues**



**Macro-algues**

# L'iode dans l'atmosphère: destruction de l'ozone

➤ La réaction de I avec l'ozone contribue à sa destruction



Les produits de réaction de l'IO (OIO, I<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et HOI) peuvent participer à la formation d'**aérosols** qui peuvent contribuer à la destruction de la couche d'ozone.

# L'iode dans les sols

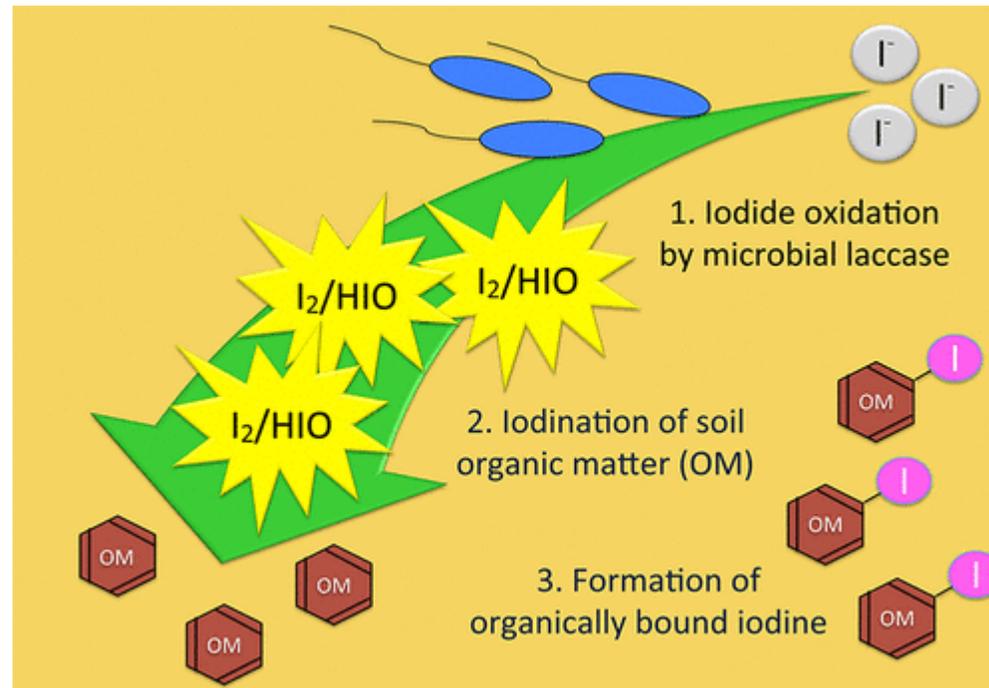
- L'iode dans les sols est considéré d'origine océanique plutôt que lithosphérique, ce qui entraîne une répartition inégale des stocks d'iode:
  - Les terres proches de l'océan (50-80 km du littoral) peuvent obtenir directement de l'iode à partir des embruns marins et de l'iode marin volatil (Smyth et Johnson, 2011)
  - Le stock d'iode de la plupart des sols « intérieurs » est principalement apporté par les dépôts secs et humides (eau de pluie 1-6 µg/L).
  - La concentration d'iode varie considérablement d'un sol à l'autre, principalement entre **1** et **5** mg/kg. Les fortes valeurs se trouvent dans les sols riches en **matières organiques**.

Smyth, D., Johnson, C.C., 2011. Distribution of iodine in soils of Northern Ireland. *Geochem.: Explor. Environ. Anal.* 11, 25–39. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-015>.

Yeager, C.M., Amachi, S., Grandbois, R., Kaplan, D.I., Xu, C., Schwehr, K.A., Santschi, P.H., 2017. Microbial transformation of iodine: from radioisotopes to iodine deficiency. *Adv. Appl. Microbiol.* 101, 83–136. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2017.07.002>.

# L'iode dans les sols

- Le cycle biogéochimique de I est contrôlé par les caractéristiques du sol qui influencent sa rétention (matière organique, oxydes métalliques, pH)
- Seki *et al.* ont proposé un mécanisme de formation de l'iode organique dans les sols. .

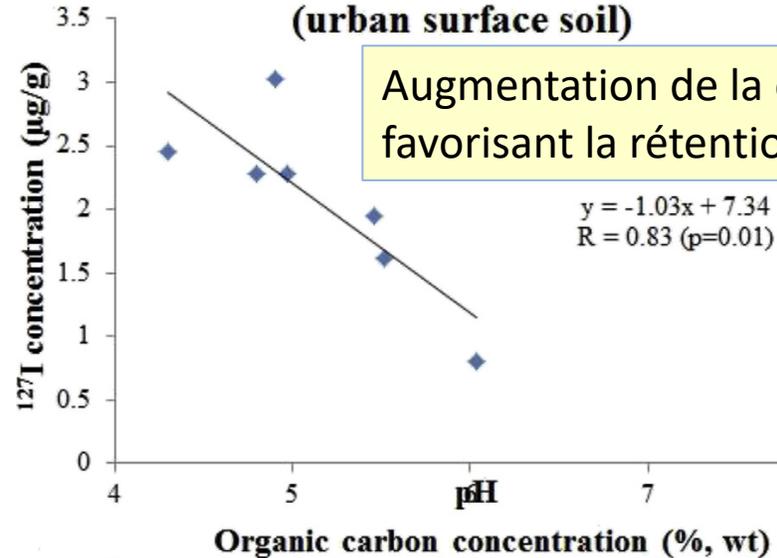


# L'iode dans les sols

- Xu *et al.* ont exploré la distribution de I dans des sols du nord-ouest de la préfecture de la préfecture de Fukushima (53-63 km au nord-ouest de la centrale nucléaire).



**pH vs. total iodine concentration  
(urban surface soil)**

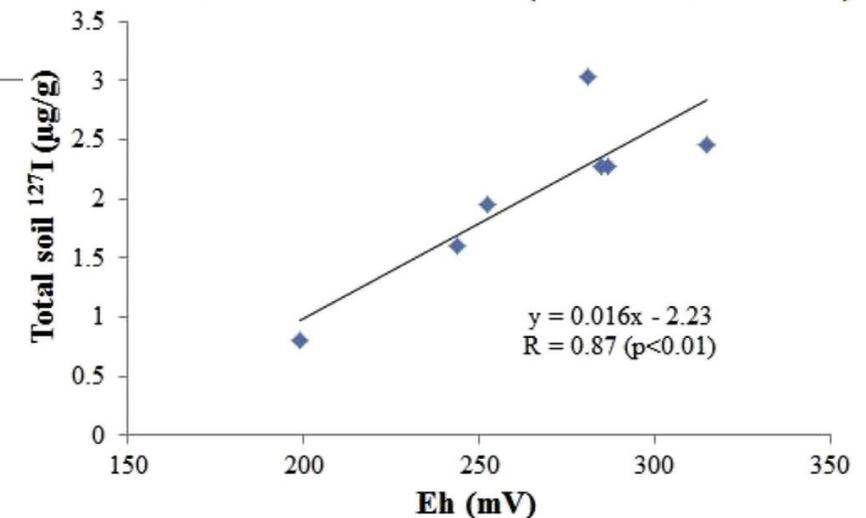


Augmentation de la capacité d'échange anionique du sol favorisant la rétention de I

Désorption de I due à la réduction de  $\text{IO}_3^-$  en  $\text{I}^-$ , faiblement sorbé sur les composants du sol

Dans la majorité des sols la fraction de I soluble demeure  $< 10\%$ , ce qui limite son accès aux plantes via le système racinaire

**Eh vs. total iodine (urban surface soil)**



# Distribution de l'iode dans les eaux de surface

➤ La concentration de I ( $I^-$ ,  $IO_3^-$  et I organique) dans les eaux de surface est faible ( $\sim 2-10 \mu\text{g/L}$ ) et dépend de:

- La proximité du littoral
- La nature des roches traversées (granite, roches sédimentaires)

Origine de l'eau	Gamme ( $\mu\text{g/L}$ )	Moyenne ( $\mu\text{g/L}$ )
Lacs, Argentine	1,12–10,4	2,82
Lacs, Plaine de Russie centrale	0,40–11,4	5,88
Lacs, Royaume Uni	1,47–12,6	4,77
Rivières, Kaboul, Afghanistan	7,90–22,7	15,4
Rivières, Nangarhar, Afghanistan	5,40–9,4	7,6
Rivières, Argentine	3,49–28	11,9
Ruisseaux et rivières, Royaume Uni	0,40–15,6	2,78
Rivières de la côte ouest, États-Unis	0,50–66	14,1

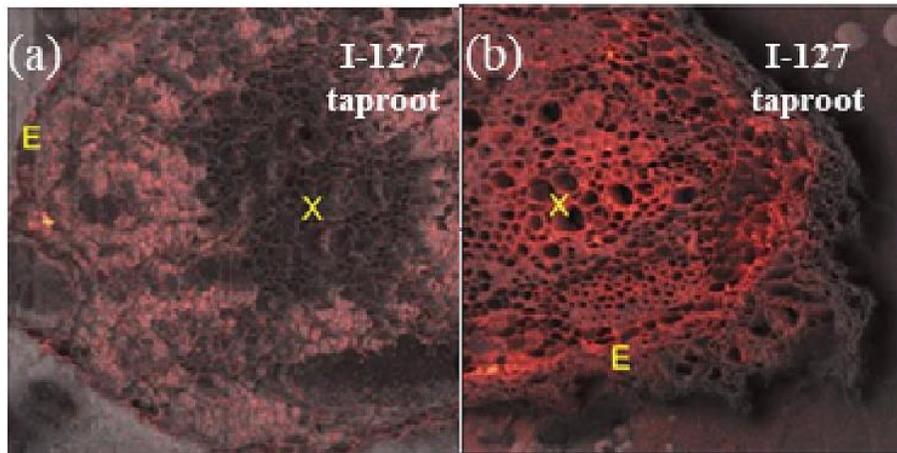
# Distribution de l'iode dans les eaux souterraines

- La concentration de I dans les eaux souterraines peut être très élevée ( $> 100 \mu\text{g/L}$ ) et pourrait être attribuée à:
- L'évapotranspiration
  - La déhalogénéation des roches et minéraux environnants

Origine de l'eau	Gamme ( $\mu\text{g/L}$ )	Moyenne ( $\mu\text{g/L}$ )
Eaux de source et de puits, Pays de Galles, Royaume Uni	1,18–7,30	4,17
Eaux de source et de puits, Angleterre, Royaume Uni	1,66–14,0	4,10
Plaine de Russie centrale	0,30–21,0	3,78
La Palma, Argentine	63–316	184
Danemark	0,4–1220	13,8
Bassin de Taiyuan, province de Shanxi, Chine	0,02–4117	963
Plaine de Chine du Nord, peu profonde	$<1$ –1901	159
Plaine de Chine du Nord, profonde	$<1$ –1360	137

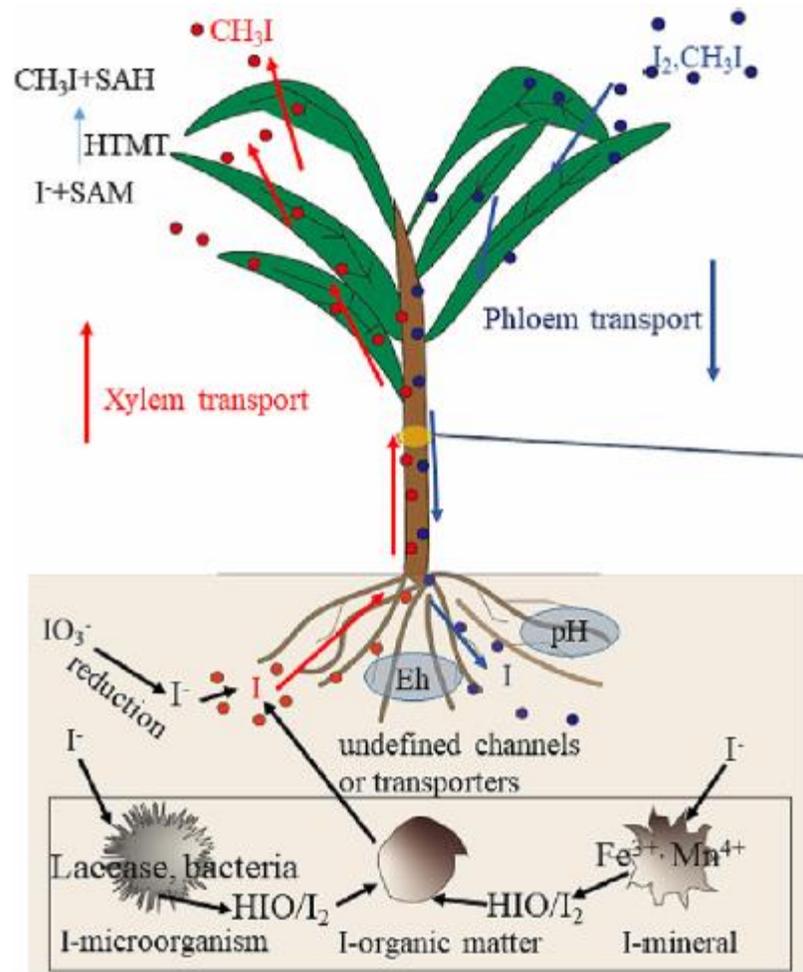
# L'iode dans les plantes

- La concentration de I dans les plantes est en général inférieure à celle des sols.
- Les algues marines peuvent accumuler des concentrations élevées en I (695  $\mu\text{g/g}$  MS)
- Un xylème bien développé est une condition préalable au transport efficace de l'iode dans les plantes (laitue vs. poivron)
- L'iode se concentre généralement dans les racines comparé aux autres organes
- L'iode inorganique  $\text{I}^-$  semble être la principale forme d'iode dans les plantes.



Vue en coupe de petit pois montrant le xylème et l'épiderme riche en I-127

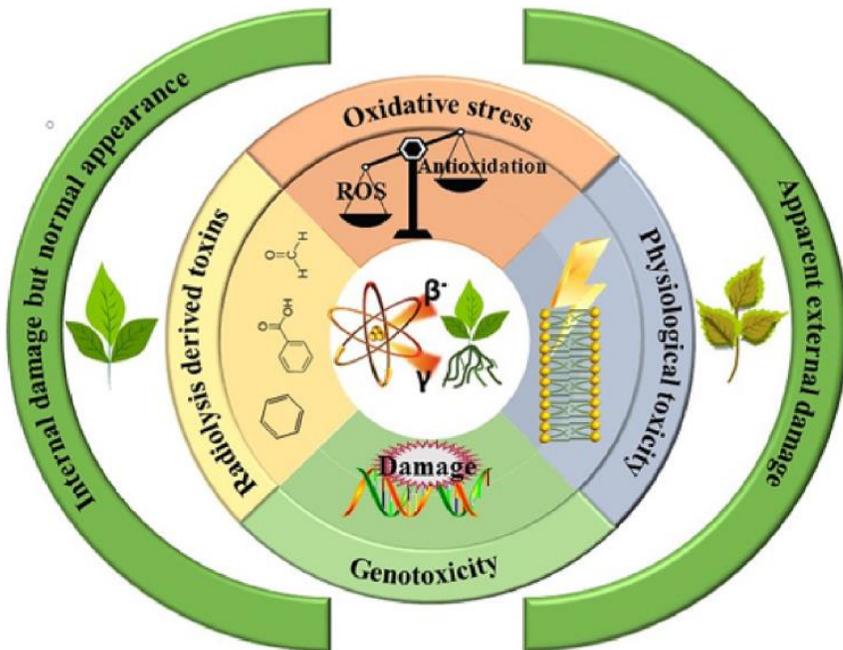
# Transfert de l'iode dans les plantes



SAM: S-adénylméthionine  
SAH: S-adenosyl-L-homocystéine  
HTMT: thiol méthyltransférase

# L'iode radioactif dans les plantes

- L'I-131 peut être très toxique pour les plantes:
  - La formation de produits de radiolyse très toxiques pour les êtres vivants (ex. benzène, formaldéhyde, acide formique, etc.)
  - La formation de radicaux comme  $\text{OH}\cdot$  qui peut détruire les vitamines, les acides aminés, etc.
  - Les mutations génétiques et des dommages pour l'ADN

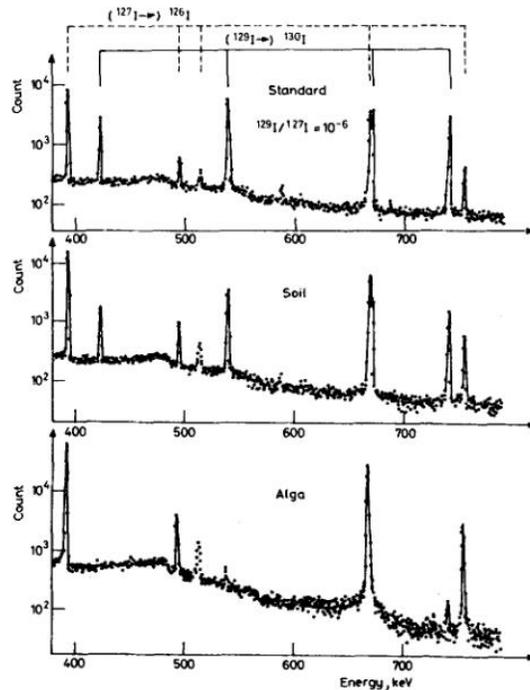


Dommages causés aux plantes par l'iode radioactif.

Zhang *et al.* A review of iodine in plants with biofortification: Uptake, accumulation, transportation, function, and toxicity. STOTEN 878 (2023).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163203>

# Autres exemples de production par activation neutronique



Production de I-125 via activation de Xe-124 en Xe-125 suivi de désintégration de Xe-125 en I-125.

I-125 se désintègre via capture électronique en émettant des gammas de 27,5 keV.

Utilisation en brachythérapie pour traitement de cancer

Utilisation pour tracer la présence de Iode stable (I-127) ou de Iode-129 (émetteur bêta, donc difficile à mesurer) par analyse d'activation neutronique.

Les spectres gamma permettent l'identification

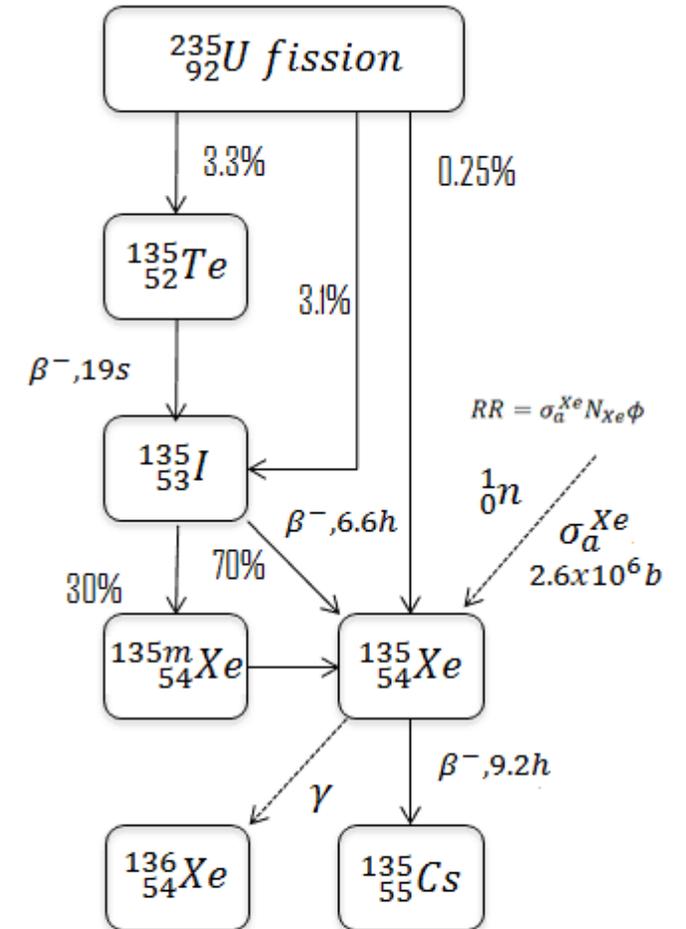
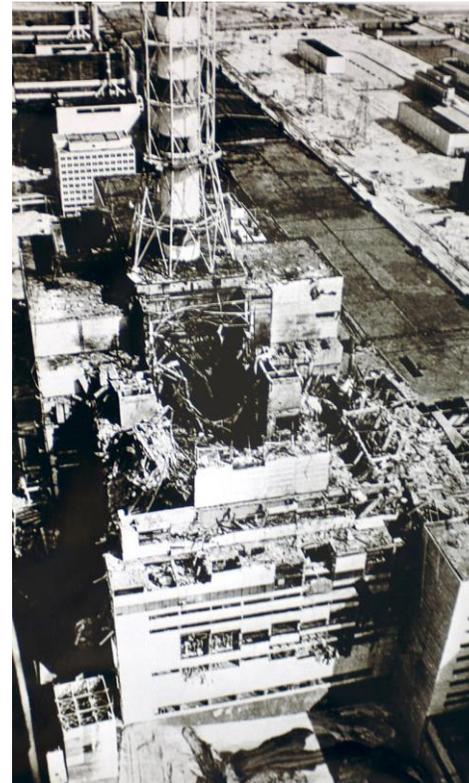
- Réaction  $I-127+n \rightarrow I-128+\gamma$   
I128 se désintègre avec émission de gamma 443 keV
- Réaction  $I-127+n \rightarrow I-126+2n$
- I-126 se désintègre avec  $\gamma$  de 389, 666, 754 keV
- Réaction  $I-129+n \rightarrow I-130+\gamma$   
I-130 se désintègre avec émission de gamma avec des énergies de 418 keV, 536 keV et 740 keV



**IMT Atlantique**  
Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

# Effet court terme : I-135

- I-135 a une demi-vie de 6,6h avant de se désintégrer en Xe-135, qui est un absorbeur fort des neutrons avec une demi-vie de 9,2h
- Ceci cause un effet retardé avec mémorisation de l'historique de la conduite et de flux neutronique dans le réacteur
- En cas des transitions fortes de pilotage des réacteurs, ceci pourra impacter sa criticité et gêner son pilotage
- La mauvaise maîtrise de cet effet a bien contribué à la catastrophe de Tchernobyl



Source: [www.nuclear-power.net](http://www.nuclear-power.net)  
Data: JANIS 4.0 / NEA