



énergie atomique • énergies alternatives

# L' accident de Fukushima

Philippe GUETAT



énergie atomique • énergies alternatives

**Quelques données scientifiques**

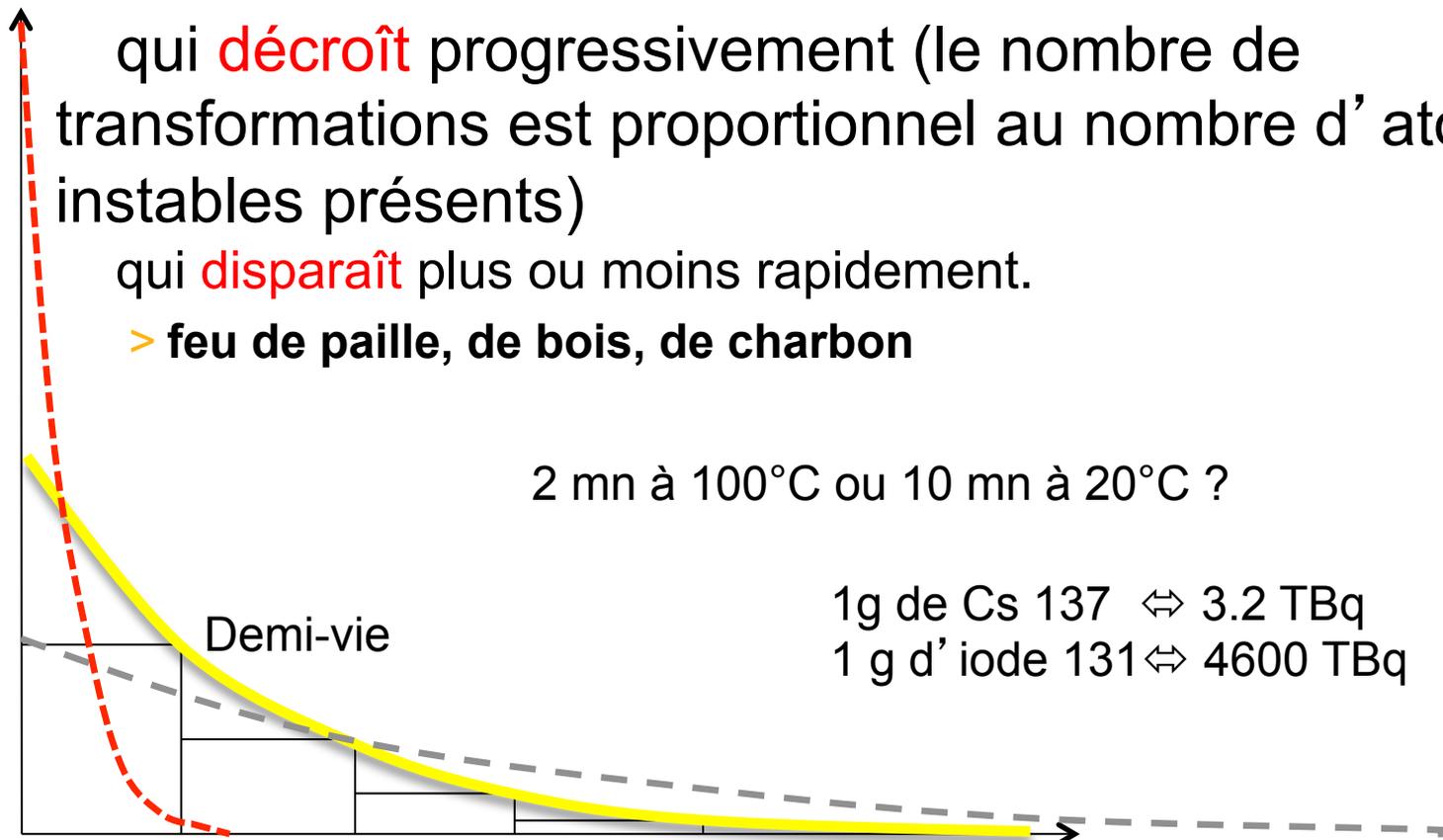
# LA RADIOACTIVITÉ ET SES EFFETS

Une émission d'énergie et de particules à partir d'atomes instables qui se stabilisent

qui **décroît** progressivement (le nombre de transformations est proportionnel au nombre d'atomes instables présents)

qui **disparaît** plus ou moins rapidement.

> feu de paille, de bois, de charbon

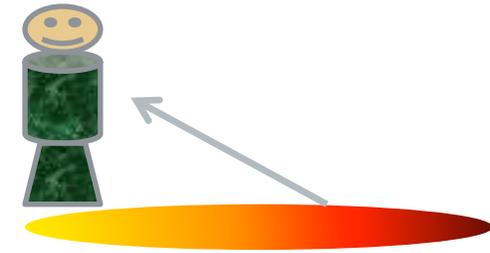


# Action des rayonnements émis

---



- **Pour se chauffer, il faut :**
  - **Une source de chaleur,**
    - > **Température, puissance énergétique**
  - **Transfert** de la chaleur de la source à l'individu, et **diffusion** dans le corps.
  - **Un temps d'exposition.**
  - ❖ *Le soleil, de l'air chaud, une boisson chaude*
- **Pour ne pas se brûler, il faut :**
  - Éviter les sources intenses,
  - S'éloigner ou mettre des écrans entre la source et les individus
  - réduire les temps d'exposition
  - Ne pas boire ou manger chaud



## 3 types d'éléments pour les accidents de réacteurs

---



energie atomique - energies alternatives

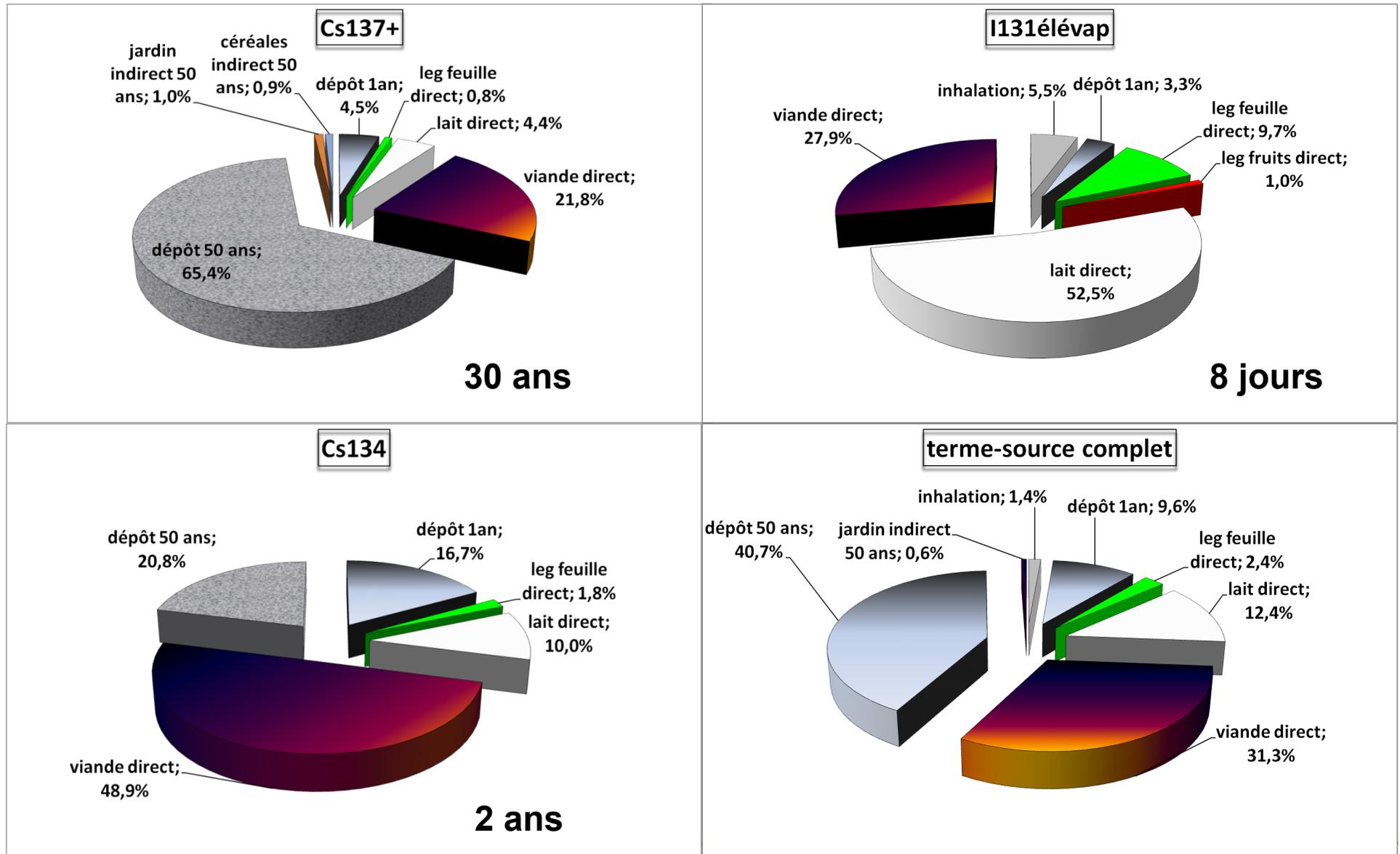
- **Les éléments volatiles** : Les iodes et Tellures (j)  
les césium (an)

*Les plus gênants car principaux responsables des dépôts et contamination des produits alimentaires*

- **Les aérosols peu volatiles, à vie très courte**  
*Une grosse différence entre Tchernobyl et Fukushima*

- **Les autres à faible intérêt**

# Voie d'atteinte par radionucléide, (hors interventions)



# Les effets des rayonnements

---



energie atomique • energies alternatives

- L'exposition aux rayonnements ionisants à dose importante conduit à :

- **des effets cliniques, précoces** : manifestations visibles rapidement, à différents seuils d'expositions (cf degré de brûlure)



Dose organe,  
Gray

**Gy** = énergie/kg

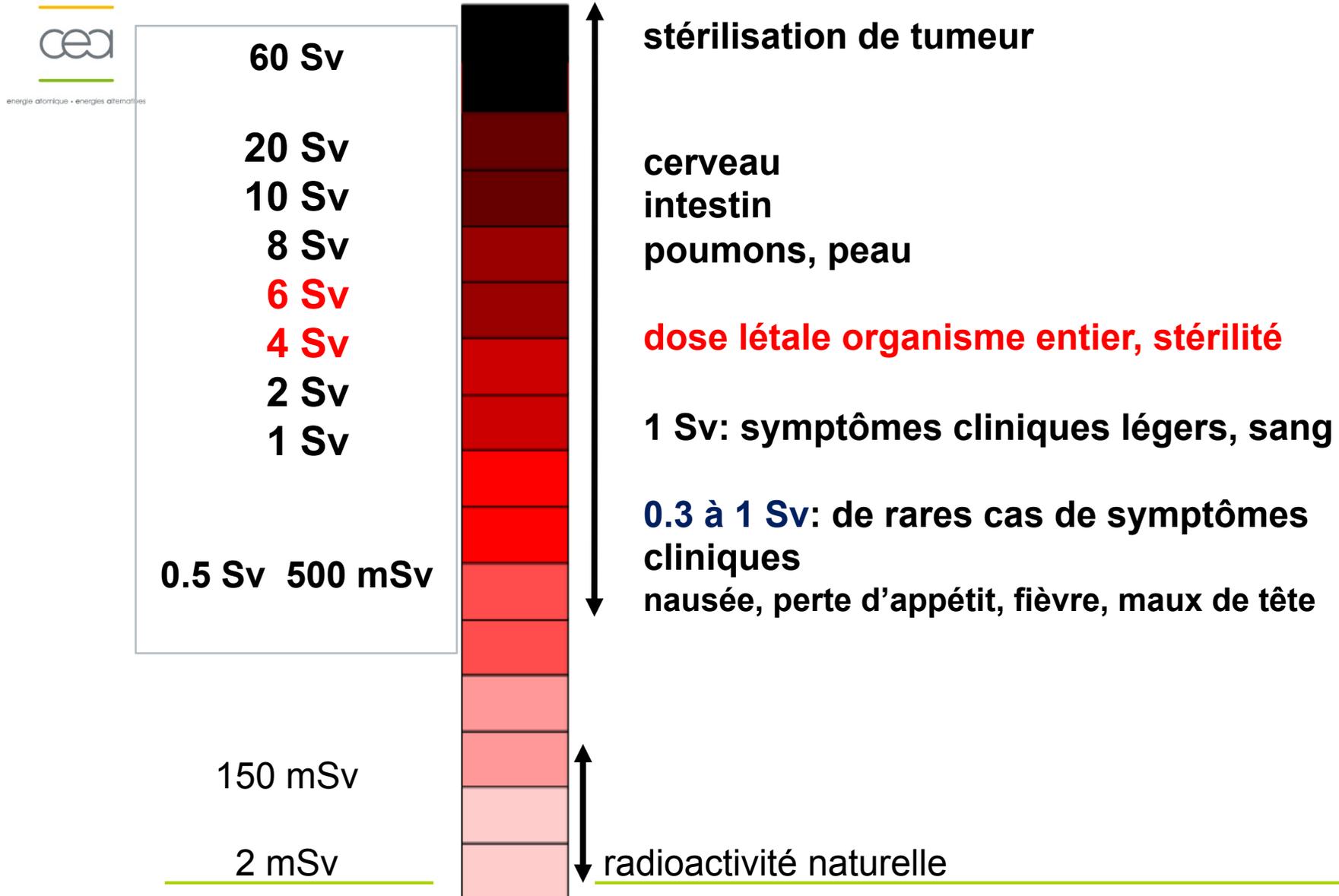
effet sur embryon (taux naturel de malformation = 4%)

- **des effets aléatoires, tardifs**  
cancers (taux naturel fatal:  $\frac{1}{3}$  à  $\frac{1}{4}$  )  
héréditaires ( # effet sur embryon)

Dose efficace,  
Sievert ou  
milliSievert

**Sv** = unité pour le  
risque aléatoire

# Effets précoces, Réactions tissulaires.





énergie atomique • énergies alternatives

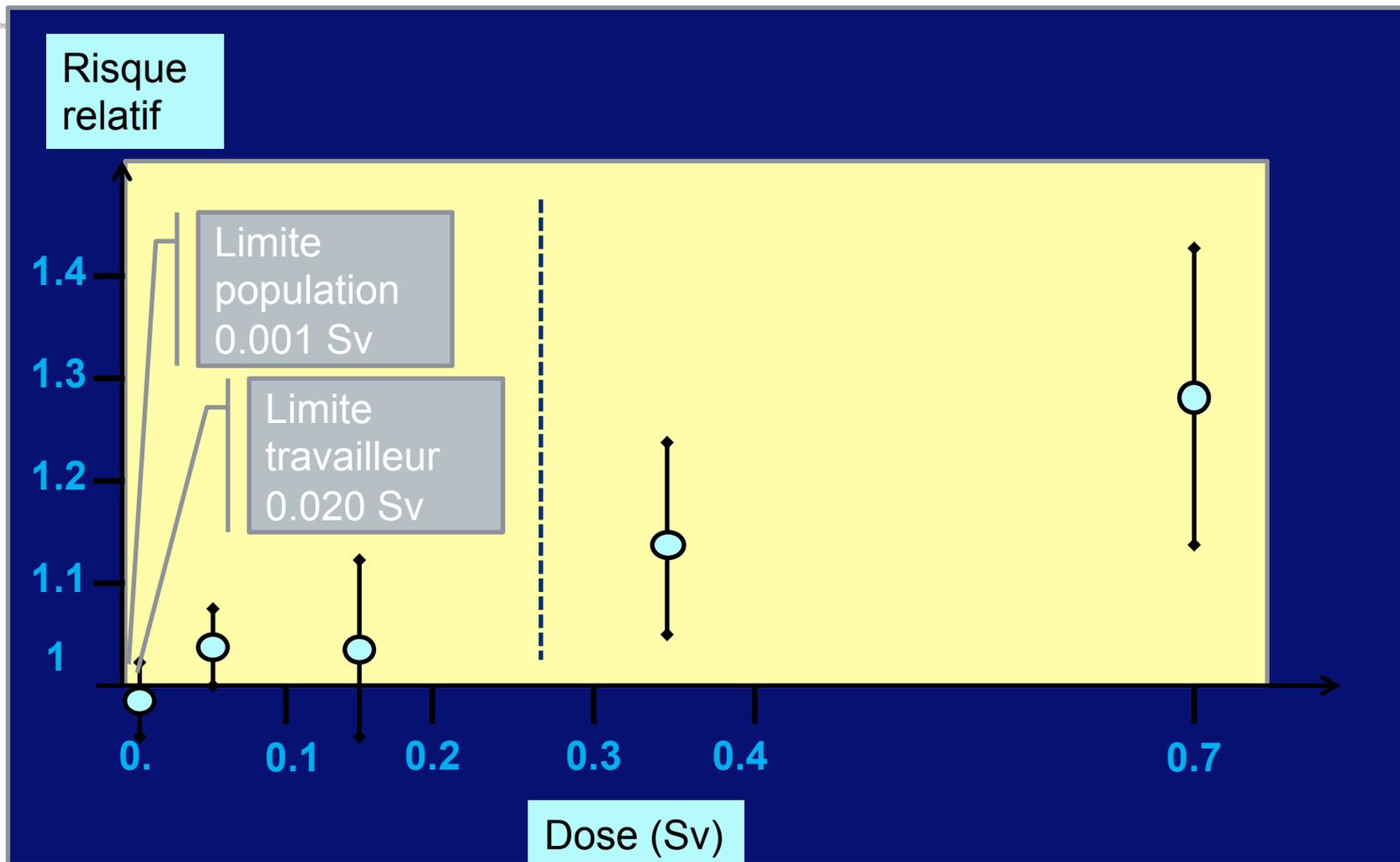
**Observations à HIROSHIMA NAGAZAKI sur une cinquantaine d'années.**

# **LES DONNÉES RELATIVES AUX EFFETS TARDIFS - CANCERS**

# Relation entre dose et fréquence de cancers solides : Hiroshima Nagasaki



energie atomique - energies alternatives



# Principes de radioprotection



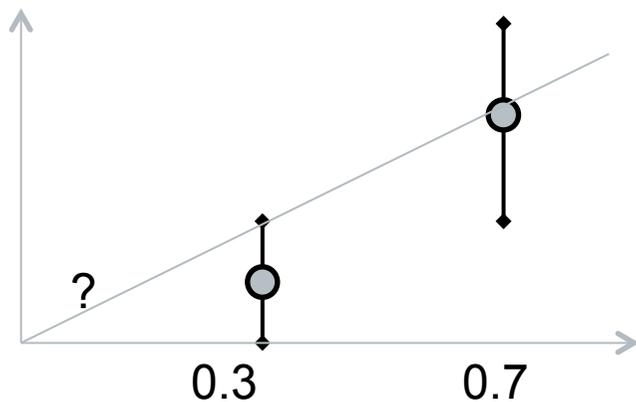
energie atomique - energies alternatives

**En situation normale :**

**Relation dose-effet linéaire et sans seuil. (?)**

- **Effet cumulatif dans le temps. (faux)**

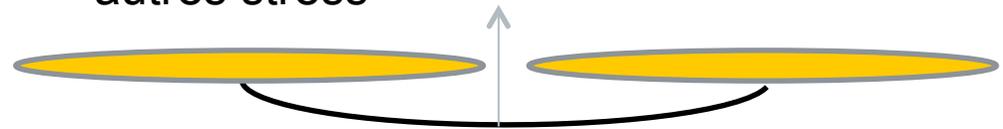
**(mais pratique et raisonnable)**



**En situation accidentelle, minimisation des détriments**

- Déplacement des malades.
- Accidents de la route.
- autres stress

Augmentation hypothétique d'un risque de cancer



# Linéarité des effets ?



energie atomique - energies alternatives

Réalité connue

Réglementation pour fonctionnement normal

• <b>5 Sv</b> <b>dose létale</b>	• <b>5000 km/h</b>
• <b>1 Sv</b> <b>+5% cancer</b>	• <b>1000 km/h</b>
• <b>0.3 Sv</b> <b>entre connu et inconnu</b>	• <b>300 km/h</b> En TGV
• <b>0,150 Sv/an</b> <b>___ max naturel</b>	• <b>150 km/h</b>
• <b>20 mSv/an</b> <b>limite travail</b>	• <b>20 km/h</b> à vélo
• <b>3 mSv/an</b> <b>naturel (Fr)</b>	• <b>3 km/h</b> à pied
• <b>1 mSv/an</b> <b>limite public</b>	• <b>1 km/h</b>
• <b>&lt;0,1 mSv/an</b> <b>impacts nucl</b>	• <b>100 m/h</b>
• <b>0,01 mSv/an</b> <b>négligeable</b>	• <b>10 m/h</b>



énergie atomique • énergies alternatives

**Les observations pour les travailleurs et les populations**

# **TCHERNOBYL, RUPTURE DE CONFINEMENT SUR RÉACTEUR EN MARCHE**

# Doses délivrées à Tchernobyl aux travailleurs



energie atomique - energies alternatives

populations	nombre	Dose thyroïde 1986	Dose efficace 1986-2005 mSv
Travailleurs : Syndrome d'irradiation aigu	134	La plupart <1Gy 3 ind : >20Gy	<b>0.8 à 16 Sv</b>
Travailleurs, autres intervenants d'urgence	600 -134		<b>0.8 à 1,6 Sv</b>
Liquidateurs	530 000	Du 30/04 au 7/05 $\mu=0.21$ Gy (600 ind ) Max 3 Gy	120 (10 à 500)

**134 personnes sur le site ont été victime d' un Syndrome d' irradiation aigu**  
**91 inférieure à 4,1 Gy , 22 de 4,2 à 6,4 Gy et 21 de 6,5 à 16 Gy.**

**28 sont décédés dans les semaines ou les mois suivants.**

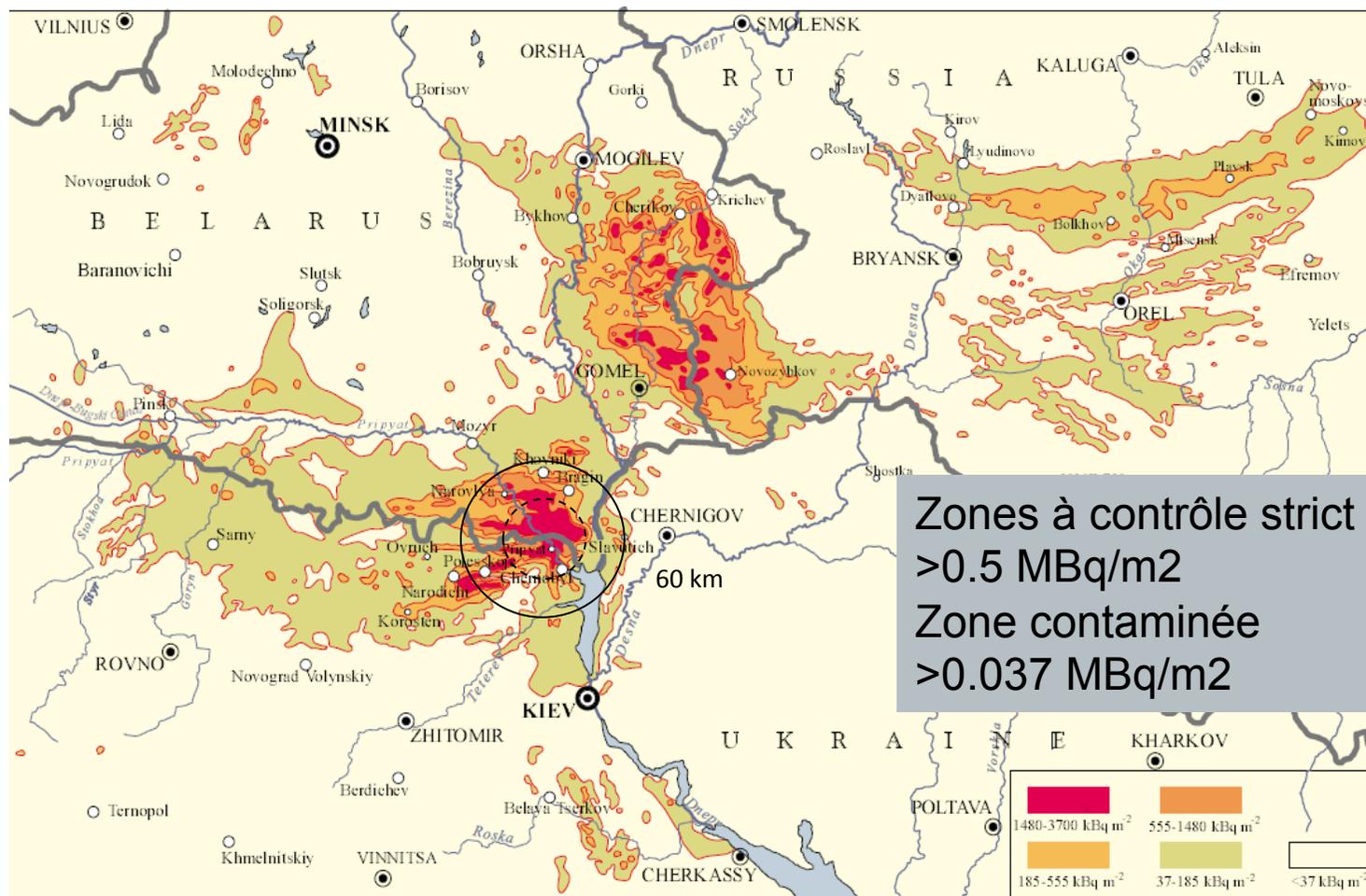
**19 sont décédés entre 1987 et 2006 de pathologies non liées à l' irradiation.**

**Des dose à la peau allant de 400 à 500 Gy, brûlures graves et profondes.**

**Très nette augmentation des cataractes pour des doses supérieures à 0.5 Gy**

# Les Zones d'intervention

## Carte Cs 137



**Evacuation réalisée entre 1 jour et 6 mois**  
**Interdiction de consommation mal appliquée**

# Doses délivrées à Tchernobyl aux populations

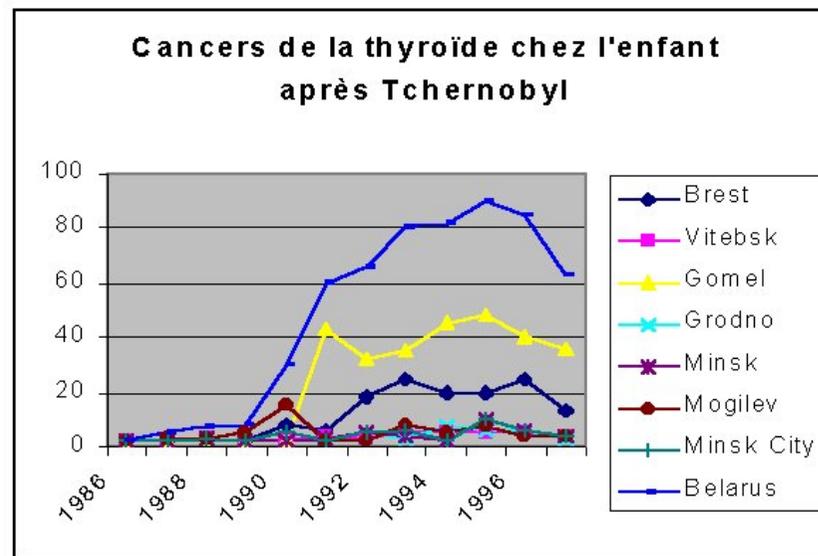


populations	nombre	Dose thyroïde 1986	Dose efficace 1986-2005 mSv
Évacués, dont jeunes	115 000	0.49 Gy <b>1 à 10 Gy</b>	<b>31 (max 380)</b>
Habitants des zones contaminées	6,4 millions	102 mGy	9
Habitant des 3 républiques	98 millions	16 mGy	1.3
Habitant de l'Europe	500 millions	1.3 mGy	0.3

➤ **5127 cas de cancer pour la fourchette 0-14 ans,**

➤ **6848 pour la fourchette 0-18 ans**

● **15 sont décédés**



## Conclusions de l' UNSCEAR rapport 2011

---



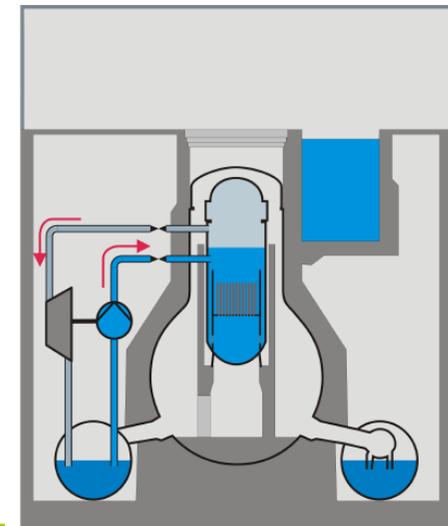
- **Hormis la hausse sensible de l'incidence des cancers de la thyroïde** parmi les personnes exposées à un jeune âge,
- **et certains éléments indiquant l'augmentation de l'incidence des leucémies et des cataractes** parmi les travailleurs,
- **il n'existe pas de preuve tangible de la hausse de l'incidence des cancers solides ou des leucémies** dans les populations exposées.
- **Il n'existe pas non plus de preuve d'autres troubles bénins associés à une radio-exposition.**
  - **Par contre, l'accident a entraîné des réactions psychologiques nombreuses, qui étaient dues à la peur des rayonnements, et non aux rayonnements eux-mêmes**



énergie atomique • énergies alternatives

# FUKUSHIMA

- Arrêter la fission en cas de problème: **fait**
- disposer de moyen de défense en profondeur en cas de problème de refroidissement +/-
- Maintenir le refroidissement du combustible, +/-
- Prévenir avant rejet, **oui**
- Limiter les rejets **oui**, puis
- Limitation des conséquences **oui**



## Les faits en chiffres

---



- **Après séisme, 94% de la population a été sauvée par l'alerte au tsunami. 6% ont péri.**

Les réacteurs ont été arrêtés lors du séisme.

4 réacteurs sur 14 ont été atteints par le tsunami.

*Les moyens de secours pour le refroidissement ont été également touchés par le tsunami.*

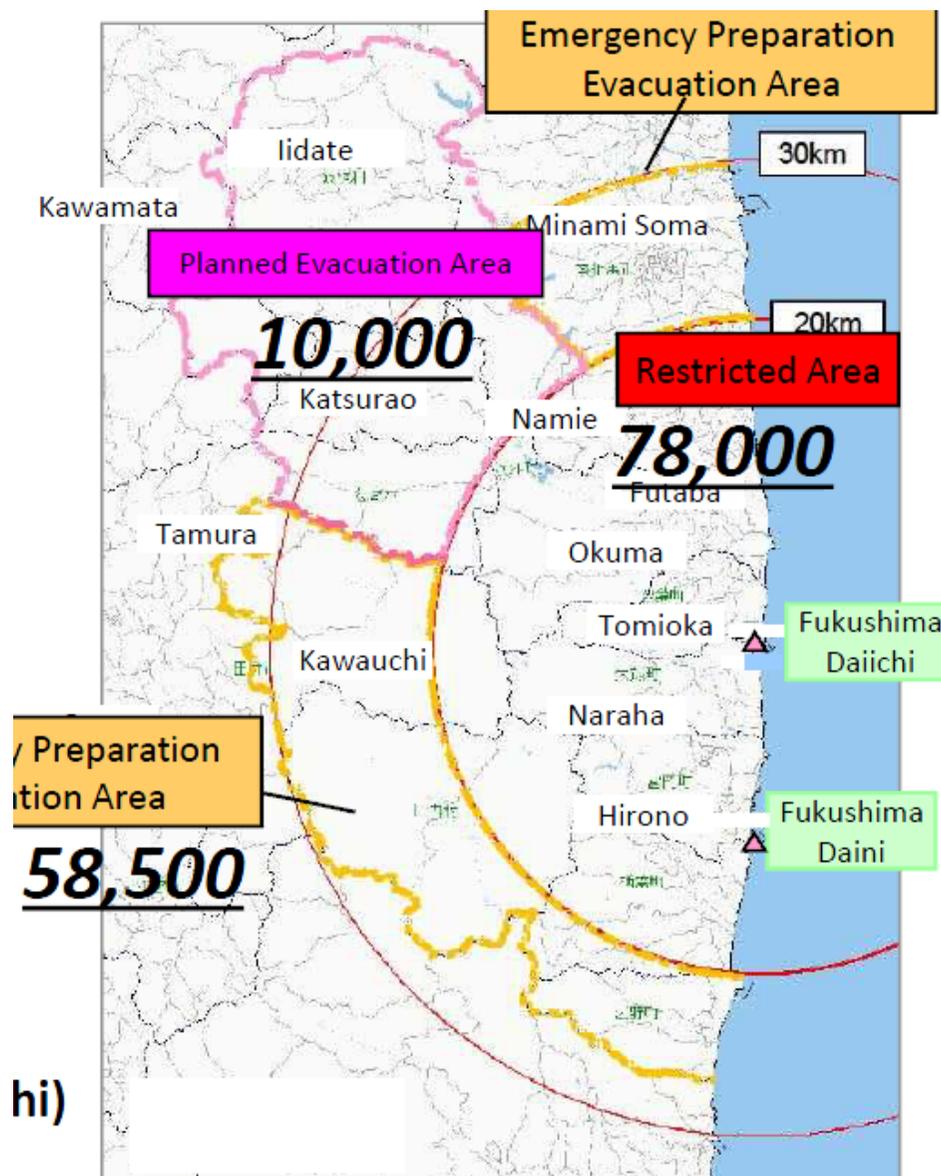
- **3 fusions de combustibles (2 partielles)**  
Rétention des nucléides volatiles dans le tor, (rejets <10%)
- **1/14 (7%)** perte d'étanchéité d'enceinte de confinement
- **Maintien possible des équipes pour reprendre le contrôle**
- **Nécessité de décompresser les enceintes, => source de rejets.**
- **100% de la population et des travailleurs ont été protégés**

# Zone d'intervention pour Fukushima



energie atomique - energies alternatives

- Zones d'évacuation
- Rayon des 20 km avant rejet
- + Zone d'évacuation planifiée si dose 1an > 20 mSv



hi)

Source: NISA website

# Doses délivrées aux travailleurs à Fukushima



energie atomique - energies alternatives

populations	nombre	Dose interne mSv	Dose efficace 2011-2012 mSv
<b>Travailleurs Intervenants d'urgence</b>	400	12 i entre 100 et 590 mSv interne 2 contaminations iode	160 i : > 100 6 i : > 250 Max : < 590
<b>Intervenants post accident</b>	20 000 (au 31/1/ 2012)	550 i : >20 mSv 3000 i : < 20 mSv	12 (max 200)

**aucun effet sur la santé lié à l'exposition aux rayonnements ionisants n'a été observé.  
Sauf 2 contaminations cutanées bénignes.**

\* i signifie individus

# Les quantités rejetées

---



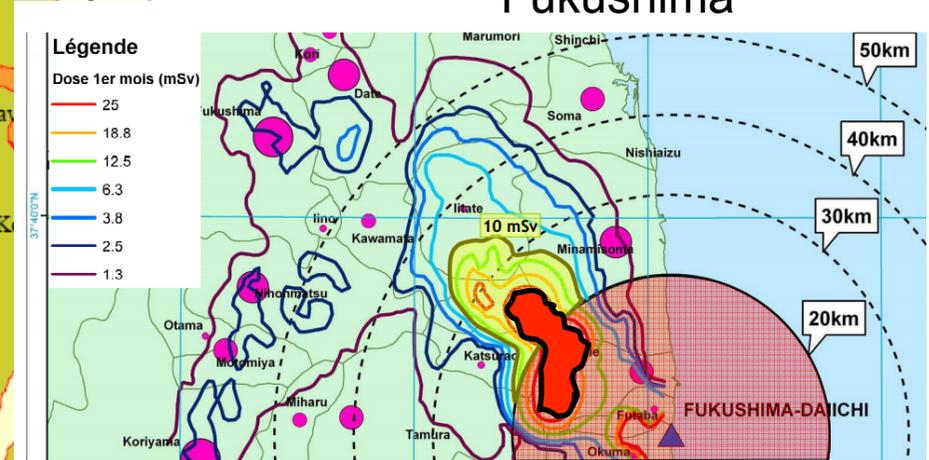
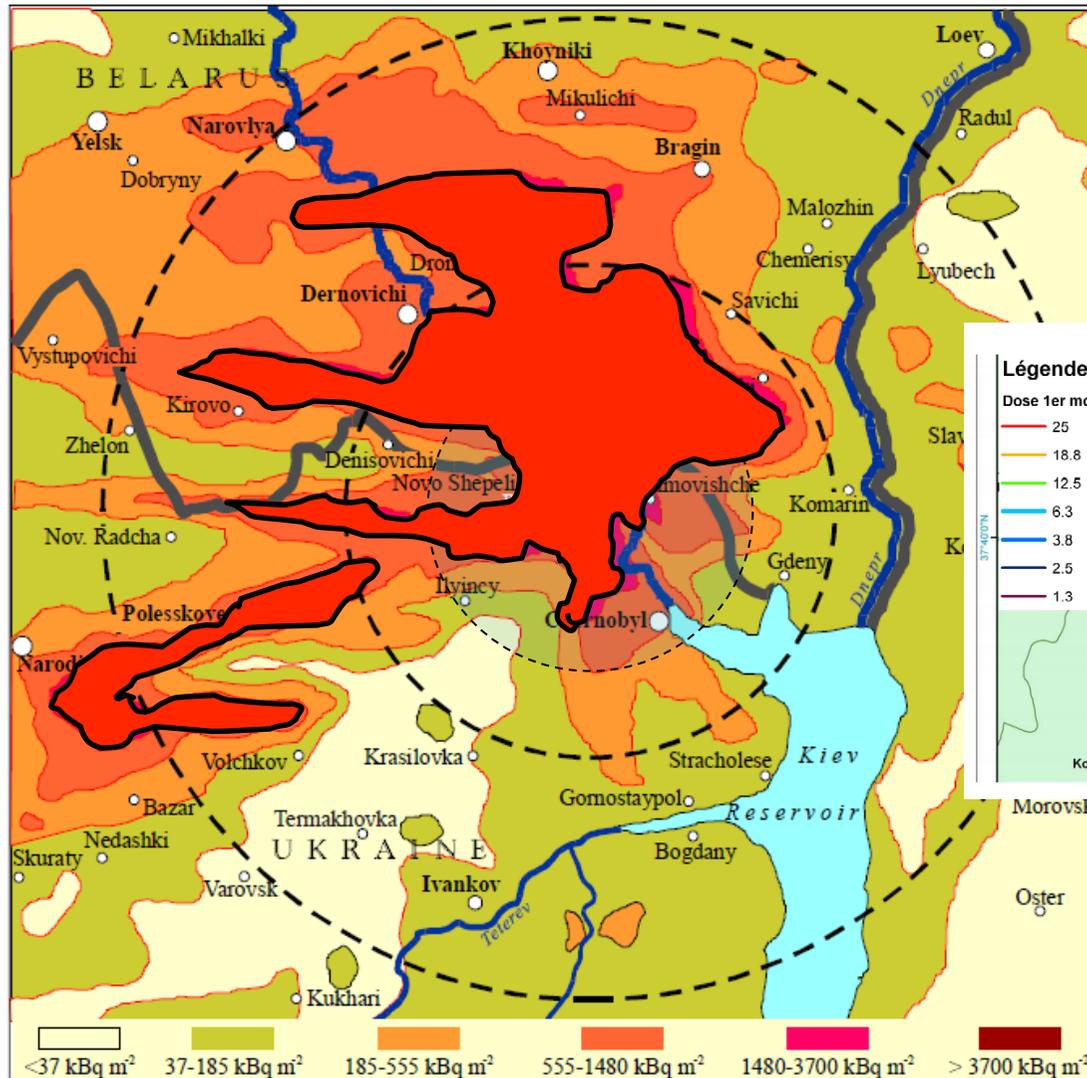
energie atomique - energies alternatives

- **2 approches complémentaires:**  
Connaissance de l'inventaire + évaluation de la rétention  
Evaluer les activités déposées et surfaces correspondantes
- **Cas du césium :**

MBq/m <sup>2</sup>	Tchernobyl	Fukushima
>0.18	19 000	2 000 km <sup>2</sup>
>0.55	7 200	625 km <sup>2</sup>
>1.5	3 100	300 km <sup>2</sup>

**Soit un rejet à Fukushima, sur terre, égal à 10% de celui de Tchernobyl**  
*NB. Il est probable que le principal rejet ait été celui-ci.*

# Comparaison des surfaces (césium)



- **Comparaison des surfaces entre Tchernobyl et Fukushima**

Surface ground deposition of caesium-137 in the immediate vicinity of the Chernobyl reactor. The distances of 30 km and 60 km from the nuclear power plant are indicated.

## Les quantités rejetées (2)

---



energie atomique • energies alternatives

- **Cas de l' iode :**

- Pas de cartographie spécifique aux dépôts d' iode.

- Le rapport Iode/Césium est de 20 pour le combustible, à Fukushima comme à Tchernobyl, mais il n' est pas du tout constant. (de 5 à 60).

À **Tchernobyl**,  $>40$  MBq dans les 30 km.  
10 et 20 MBq/m<sup>2</sup> à 120 km du réacteur.

A **Fukushima**, les valeurs les plus fortes, hors zone des 20 km, se situent entre 1 et 10 MBq/m<sup>2</sup>

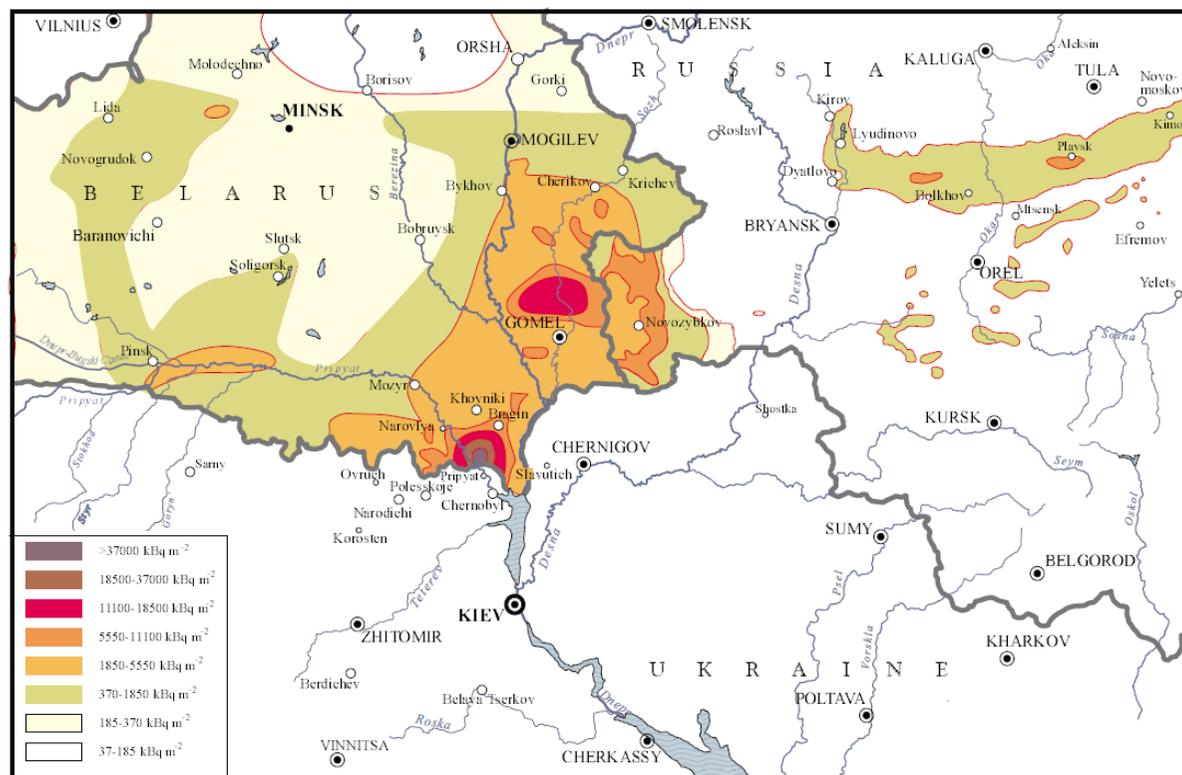
- On retrouve un facteur **>10** dans les évaluations des quantités rejetées. Les surfaces et le niveau d' activité déposée sont plus faibles qu' à Tchernobyl.

# Dépôt d'Iode et effet de la pluie à Tchernobyl



energie atomique • énergies alternatives

## Dépôt d'iode 131



- une zone très affectée par les dépôts à plus de 120 km.

## Les quantités rejetées (3)

---



- **Cas des autres radionucléides :**
- **À Fukushima**
- Pratiquement ***pas de radionucléide à vie très courte***. Car cœurs arrêtés.
  - Pas de forêt rousse.
- Pratiquement ***pas de radionucléide peu volatils***. Car milieu est resté, grâce aux dispositifs de sûreté et au personnel de la centrale, dans des conditions de température et humidité suffisantes pour limiter une émission d'aérosols.

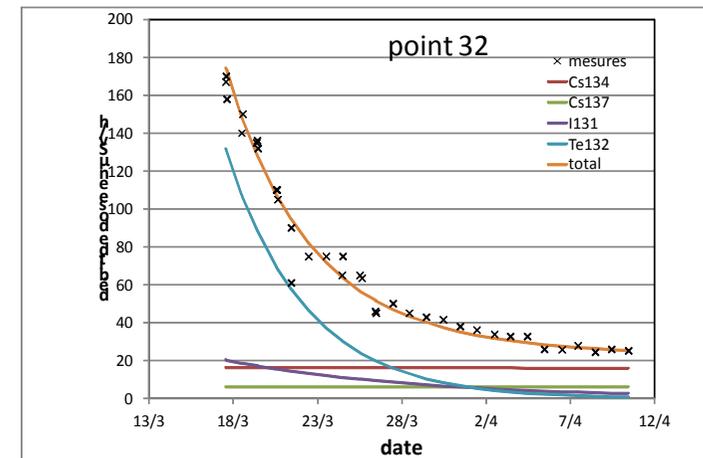
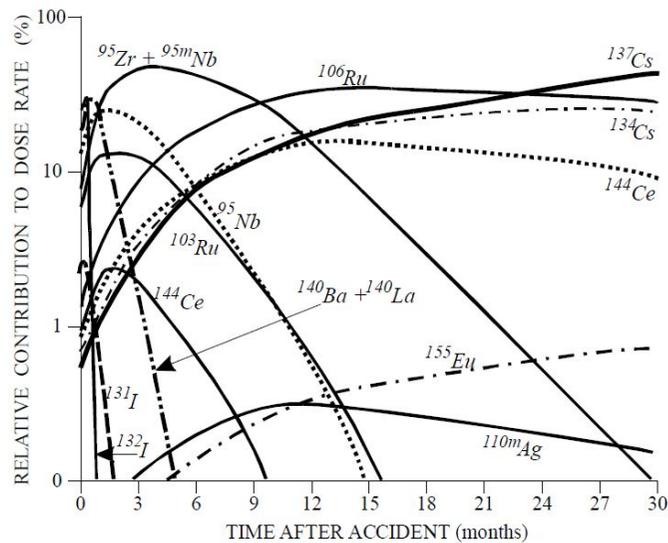
Le fait que l'exposition externe soit gouvernée par les césium 137 et 134, qui s'expriment sur le long terme, peut expliquer que la mise en place de l'évacuation planifiée n'ait pas été très rapide, mais fondée sur une cartographie précise.

# L'exposition externe par les radionucléides à vie courte



energie atomique • energies alternatives

Une évolution pendant 2 ans très différentes



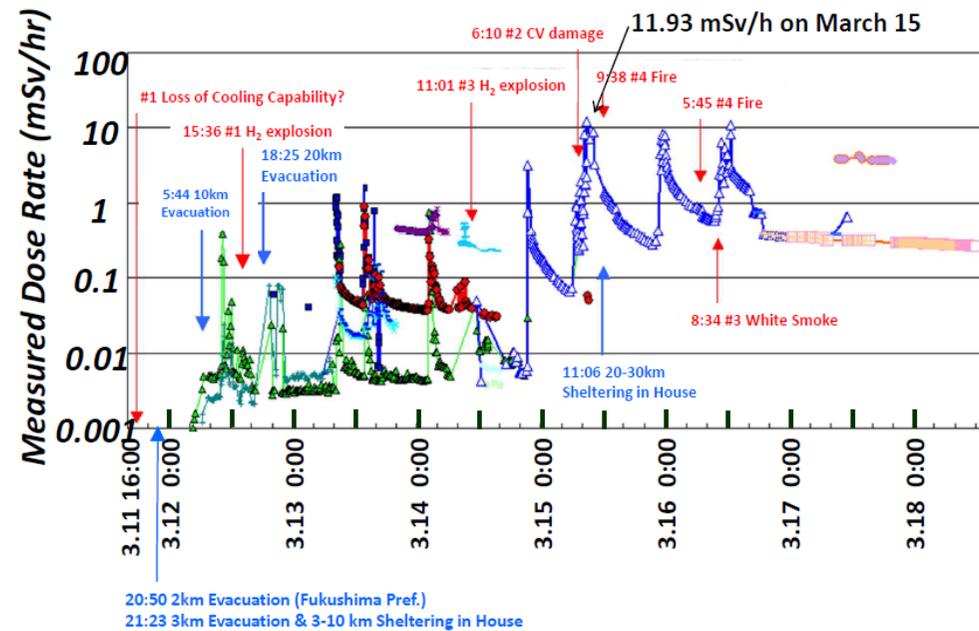
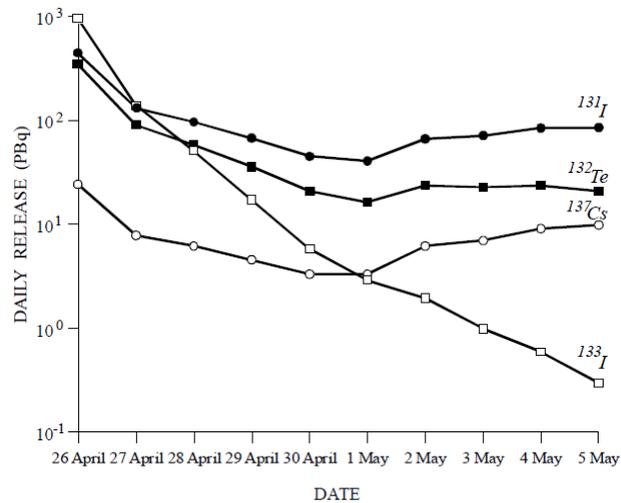
- Tchernobyl, les césium deviennent prépondérant au bout de 2 ans

- Fukushima, les césium deviennent prépondérants au bout de 1 mois

# Les caractéristiques et la dynamique des rejets: le terme-source



energie atomique • energies alternatives



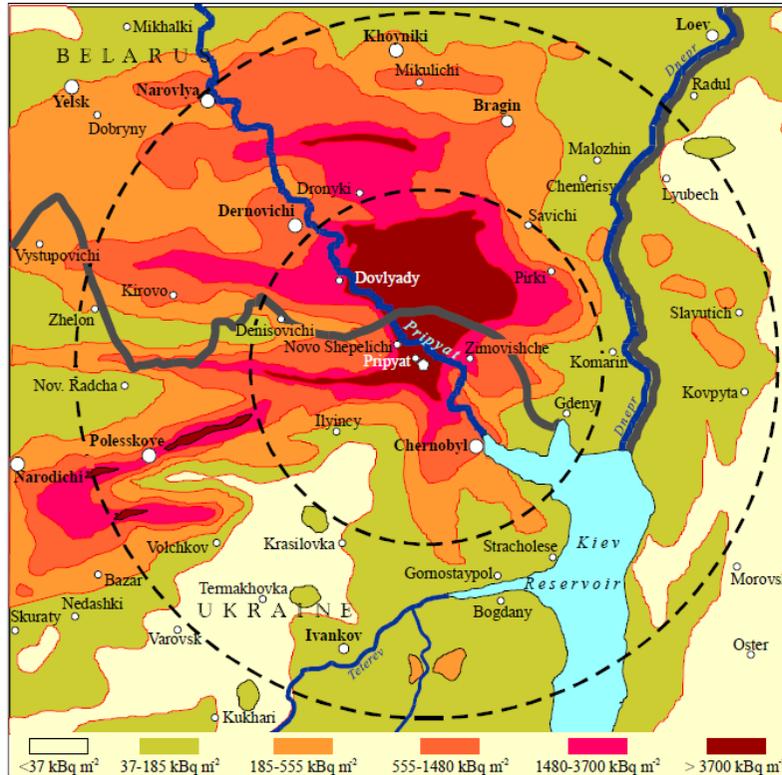
- Tchernobyl
- Rejet continu pdt 10 j

- Fukushima
- Par bouffée

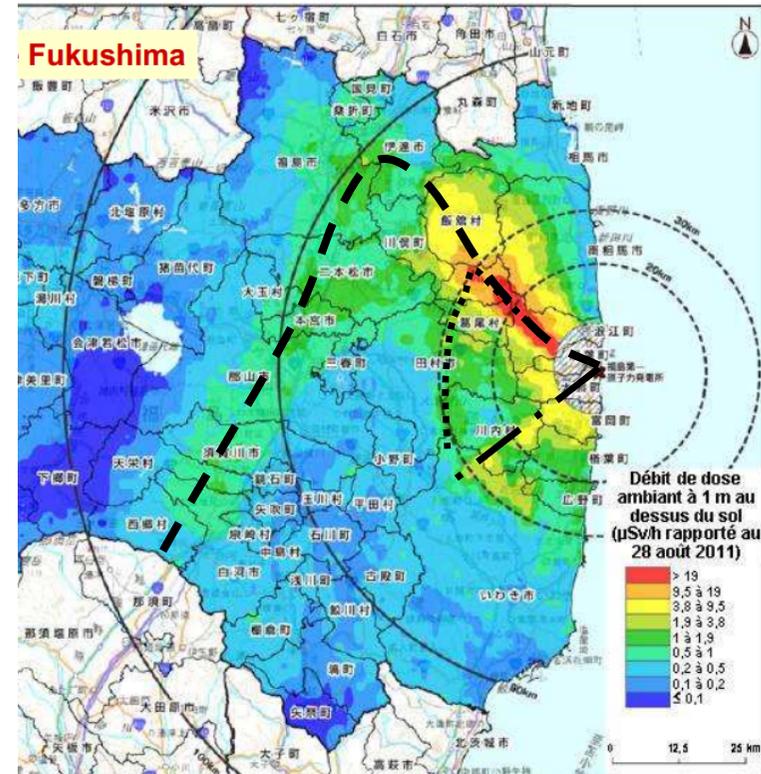
# Conséquences pour les dépôts



energie atomique • energies atomics



Surface ground deposition of caesium-137 in the immediate vicinity of the Chernobyl reactor  
The distances of 30 km and 60 km from the nuclear power plant are indicated.



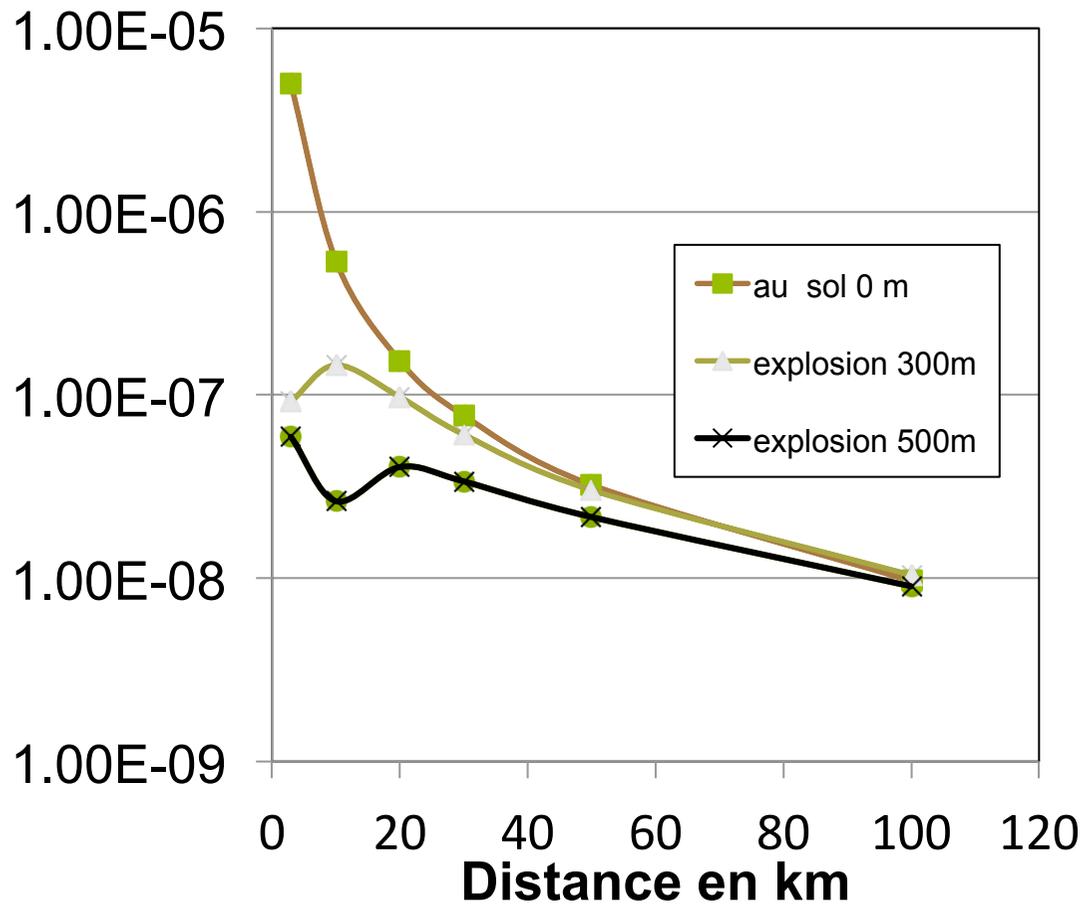
- Des géométries très différentes
- Cercle de 30km = une bonne approche mais à adapter ultérieurement

# Effet protecteur de la surélévation



energie atomique - energies alternatives

Un phénomène heureusement non négligeable.



# Expositions des populations



energie atomique - energies alternatives

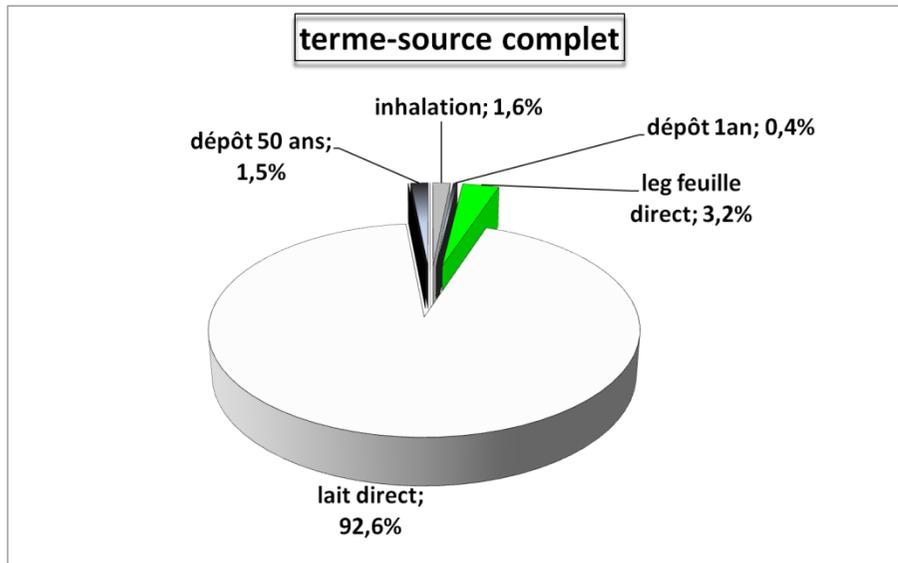
populations	nombre	Dose interne mSv	Dose efficace 2011-2012 mSv
<b>Évacués 20 km</b>	78 000	Avant rejets	Avant rejets
<b>zones évacuées ultérieurement</b>	10 000	Sur 1200 Enfants 1 à 2 mGy thy max 35 mSv	< 10 mSv

- **En pratique pas d'exposition par ingestion de produits alimentaires :**
  - ✓ Peu de végétaux en culture à cette date,
  - ✓ Animaux en stabulation, avec alimentation stockée.
  - ✓ Mise en place des interdictions de consommation et contrôles des produits dans les zones concernées.
  - ✓ Pas ou très peu de contamination des animaux
  - ✓ Contamination sol-plante très faible

# Dose Thyroïde enfant – calcul théorique et réalité



energie atomique - energies alternatives



Exposition thyroïde pour un enfant de 1 an.

La dose à la thyroïde d'un enfant de 1 an dépend considérablement de la **consommation de lait**.

A Litane, en absence d'intervention sur la consommation des animaux et des hommes, en pleine saison, l'exposition d'un enfant d'un an aurait pu atteindre plusieurs Sievert.

**L'interdiction de consommation**, facilitée par le type d'élevage et la date de l'accident a permis de réduire l'exposition d'un facteur théorique de 50.

**C'est la différence majeure avec Tchernobyl.**

## Les interventions et Conclusions

---



energie atomique • énergies alternatives

- Les interventions pour reprendre le **contrôle des réacteurs** ont permis de limiter les rejets (<1/10), ce qui a considérablement réduit les surfaces significativement contaminées.
- Les **évacuations** ont été conduites très efficacement, et avant rejets,
- Les mesures de **restrictions alimentaires** ont été certes facilitées par les techniques de conduite d'élevage des animaux et par la date de l'accident, mais elles ont été appliquées avec efficacité.
- Elles ont permis en particulier d'avoir des niveaux d'exposition à la **thyroïde des enfants environ 100 fois en dessous** de ceux de Tchernobyl, pour les enfants les plus exposés, voire plus d'après les mesures disponibles.
- Les connaissances actuelles permettent de penser qu'il sera impossible de mettre en évidence un effet quelconque à long terme.

# Le retour à la normale et conclusions

---



energie atomique • energies alternatives

**reste pour le futur la question de l'irradiation externe par les dépôts.**

Le niveau d'exposition est comparable :

- ✓ à celui de contrées à exposition naturelle élevée,
- ✓ à certains examens médicaux,
- ✓ à celui de zones à Tchernobyl non évacuées,

**pour lesquels aucun effet n'a été observé.**

- La simple décroissance va réduire d'un facteur 2 l'exposition en 6 ans.
- Le labour des terres et décapage urbains permettront de réduire d'un facteur 4.

**Le choix d'un objectif d'exposition à long terme doit rester pragmatique.**

- En terme de détriment, 1 mSv équivaut à un paquet de cigarettes.  
*(40% des japonais sont des fumeurs)*

## Catastrophes naturelles et industrielles -



energie atomique - energies alternatives

Année	lieu	morts	blessés	dégâts matériels	sources
10/07/1976	Seveso	0	193		dioxine
1984	Bhopal Union Carbide	3 500 immédiats 25 000 ?	250 000	470 M\$	Explosion et rejet de 40t d'isocyanate de méthyle
1986	Tchernobyl	<b>43</b>	>12 000 (thyroïde)	quelques 100 000 M€ <sup>α</sup>	Accident nucléaire
1989	Guadeloupe	5		600 M€	Cyclone
1999	Inde	10 000	1.7 millions sans abris	5 000 M <sup>α</sup>	Cyclone orissa
2001	Toulouse AZF	30	>3000	2 000 M€	explosion
2002	Gard France	21		960 M€	inondations
26 Dc 2004	Indonésie Sri lanka Inde ...	230 000	125 000 1.7 million déplacés	4 000 M€	Séisme de sumatra magnitude 9.2 + tsunami
Fv 2010	Vendée Charente	47	79	1 200 M€	Tempête Xanthia
Avril 2010	Golfe du mexique Deepwater Horizon	11	17	14 000 M\$	Plateforme de forage pétrolier détruite Marée noire
2011	<b>Japon</b>	<b>21 000</b>	2600 550 000 évacués	100 000 à 300 000 M\$	<b>Séisme du Tohoku magnitude 9 + tsunami</b>
2011	<b>Japon</b>	<b>0</b>	33 150 000 évacués	17 000 à 86 000 M€	<b>Accident nucléaire</b>

- **Je vous remercie pour votre attention**



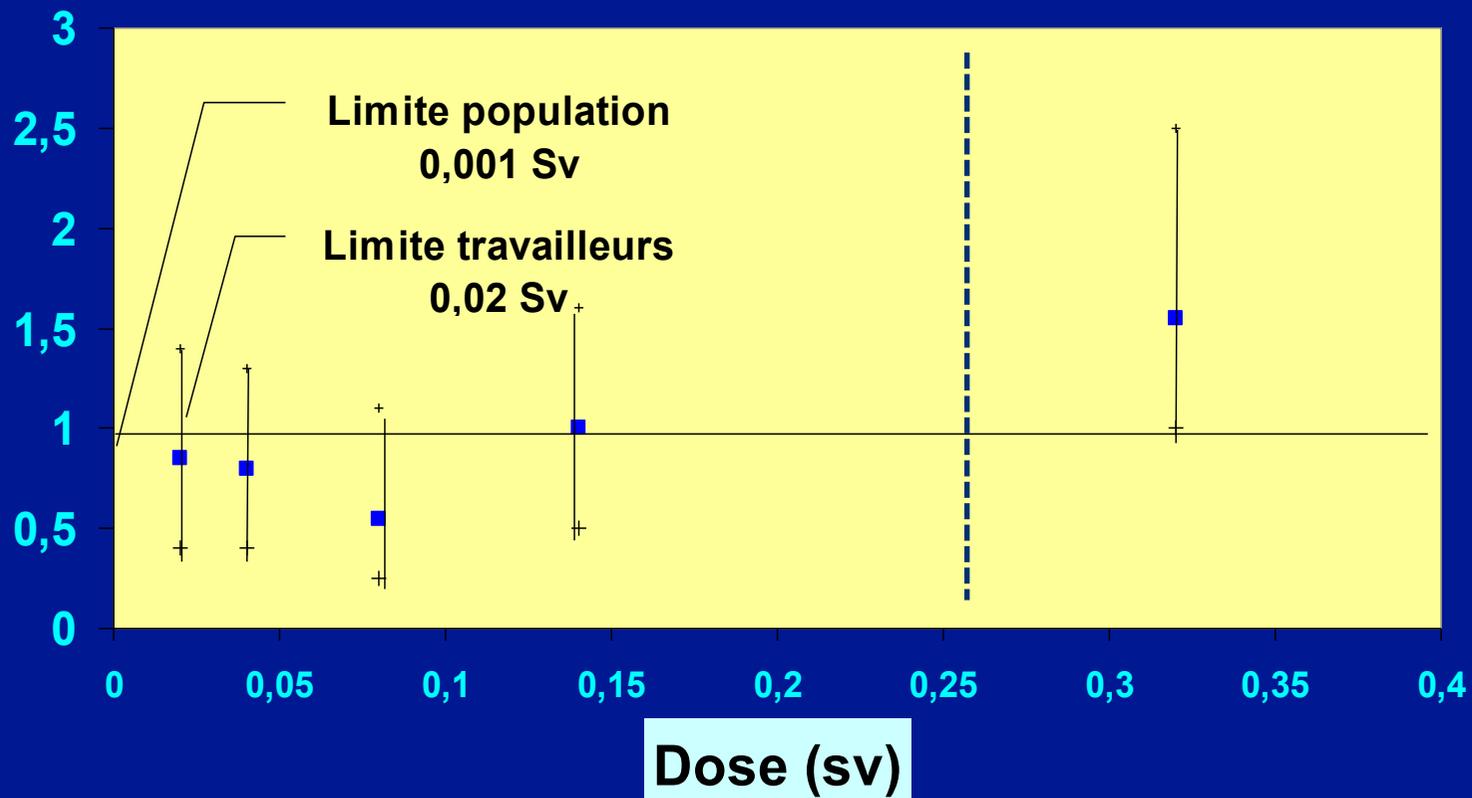
Sources : UNSCEAR – IAEA – IRSN - Japon : MEXT – NISA – TEPCO.

# Relation entre dose et fréquence de leucémie : Hiroshima et Nagasaki



energie atomique - energies alternatives

risque  
relatif



- **Importance des radionucléides à demi-vie très courte**

*Particulièrement pour les intervenants d'urgence*

*Effet de brûlure sur la forêt : forêt rousse*

- **Importance des iodes radioactifs dans l'impact sanitaire sur les enfants de la population, par incorporation.**

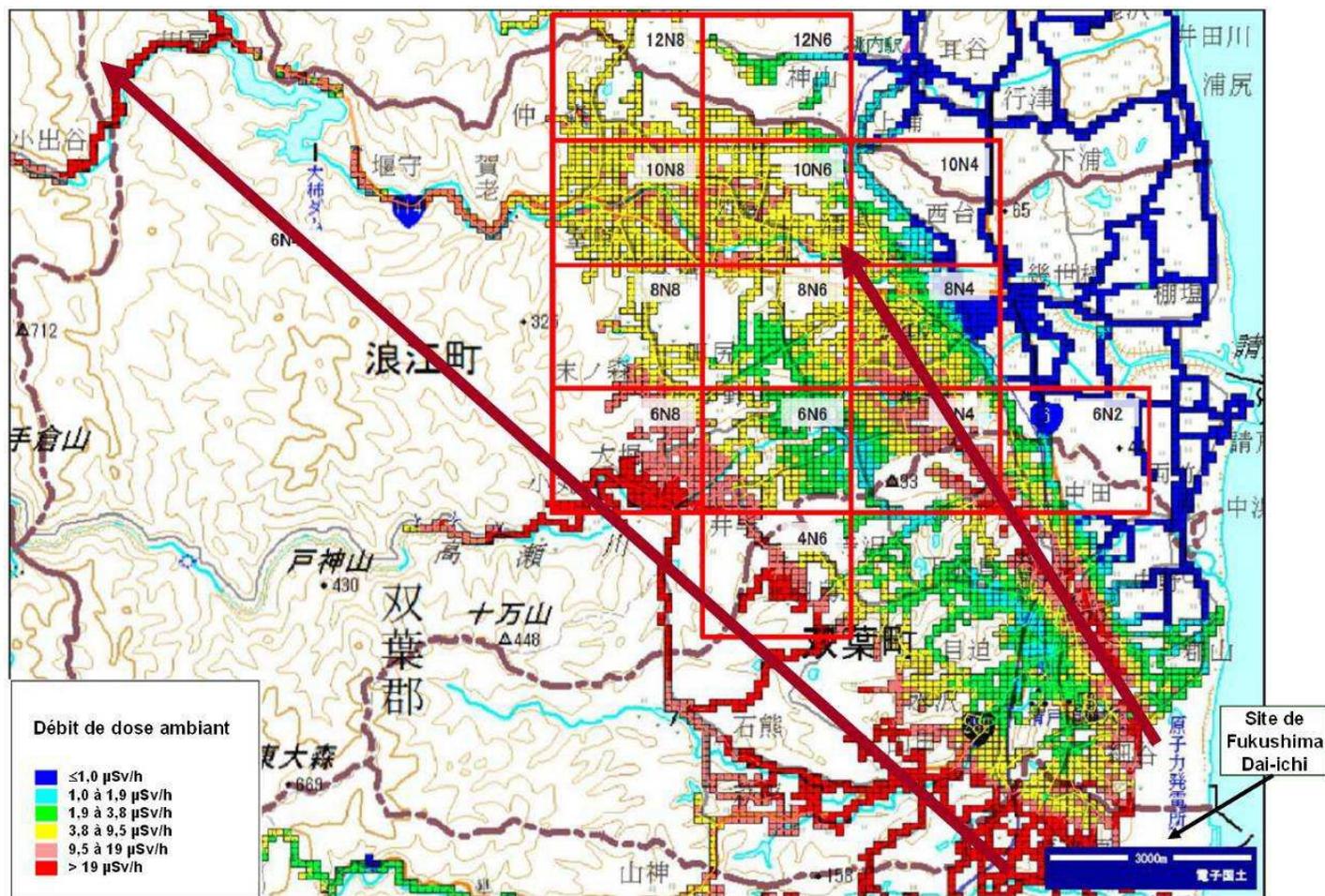
*Tout particulièrement pour les plus jeunes.*

*Phénomène très amplifié par l'alimentation en lait et dans une moindre mesure les légumes verts.*

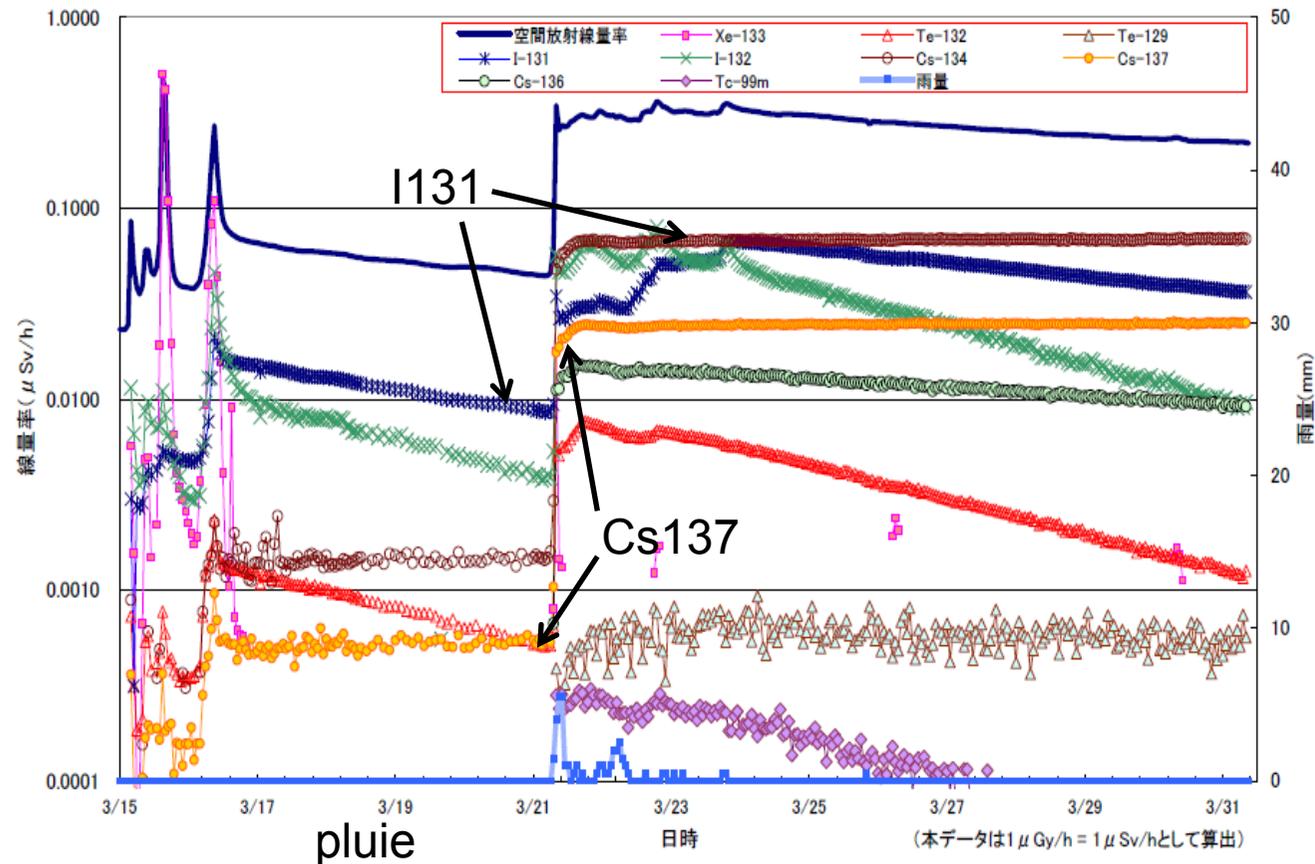
- **Pas d'effet de l'exposition externe du césium à long terme sur population**

---

# À courte distance des réacteurs de Fukushima



# Effet de la pluie. (peu de pluie au Japon)

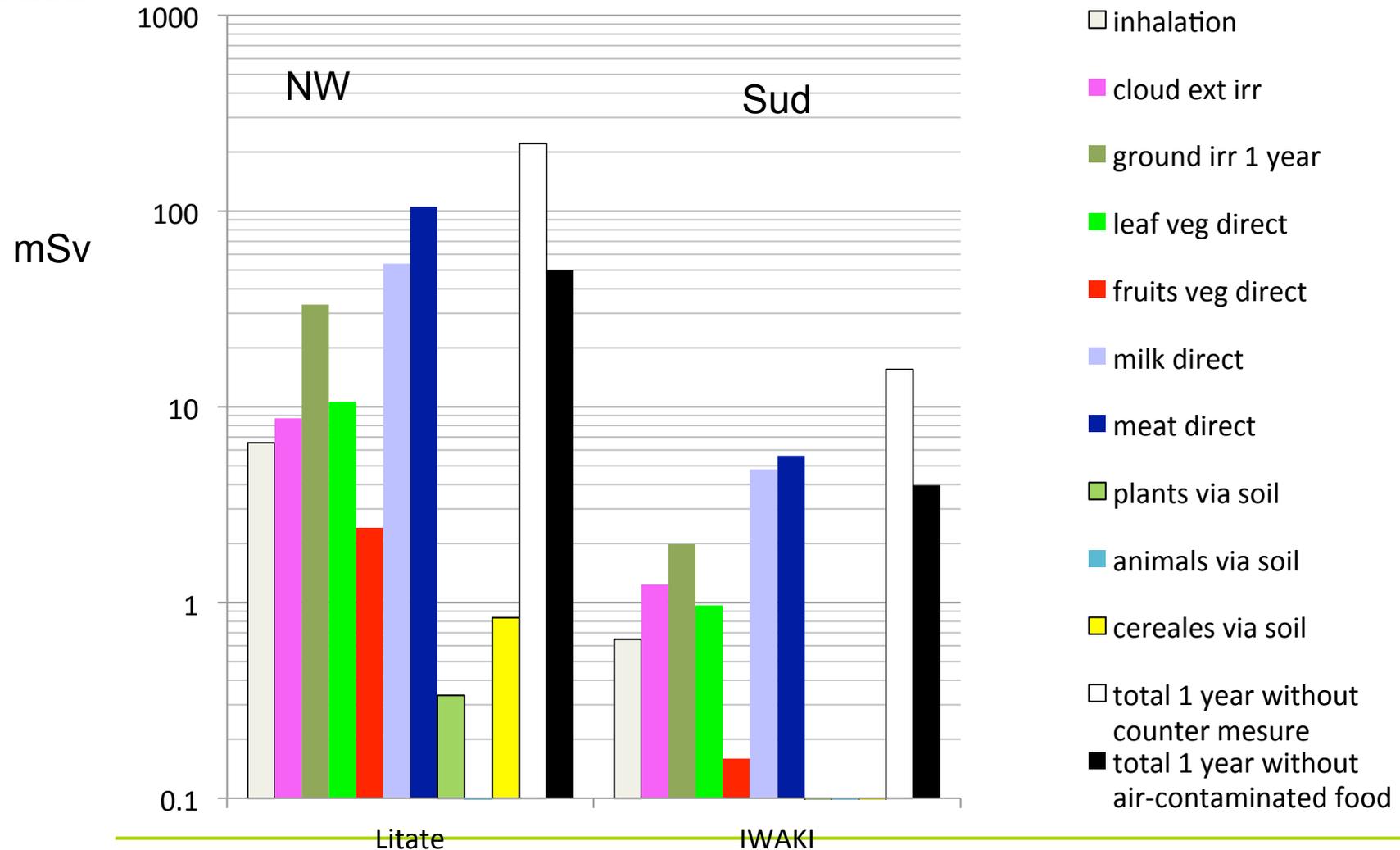


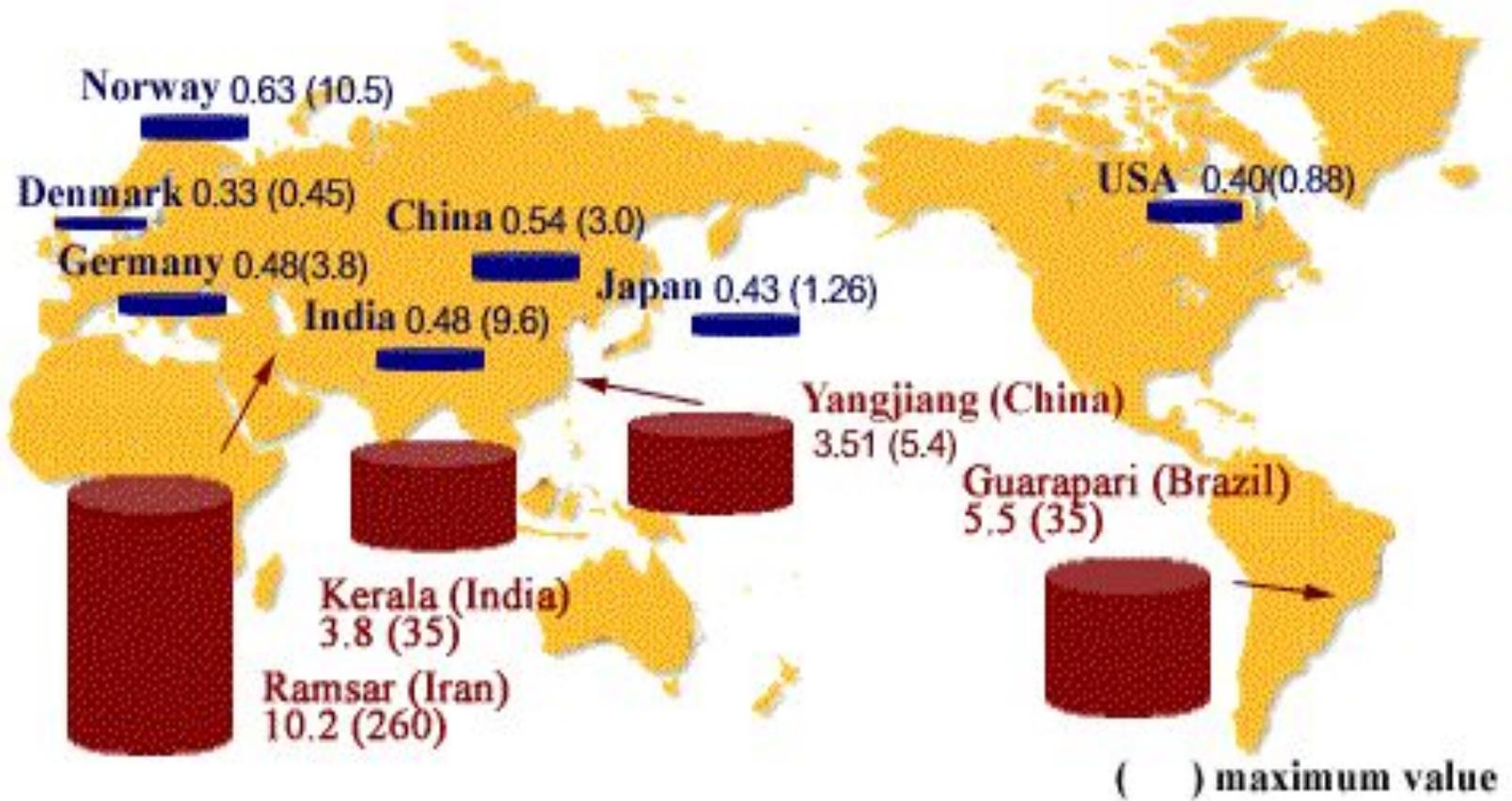
- Une pluie de quelques millimètres augmente les dépôts au sol de plus d'un facteur 10.

# Voie d'exposition adulte théorique - Exposure pathways



energie atomique - energies alternatives



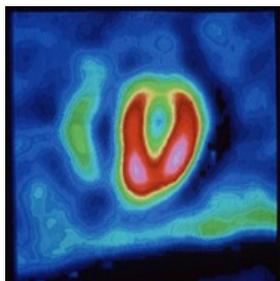


## Artificial radiation doses, orders of magnitude

Mean medical exposure in Europe: 1- 3 mSv/year

Source	World average	USA	Japan
Medical	0.60	3.00	2.30
Fallout	0.007	-	0.01
Industry	0.0052	0.25	0.001
sub total	0.6	3.25	2.311

injection for thyroid scintigraphy: 70 MBq of technetium Tc99m, 0.01 mSv  
 0.4 MBq Na-I-131 iodide, 11 mSv



**Mammography: 0.5 to 1 mSv**  
**Abdominal tomodensitometry: 10 mSv**  
**Scintigraphy:**  
**skeleton 4 mSv**  
**myocardiac 8 to 23 mSv**  
**TEP scan : 10 to 20 mSv**

