

The logo for IRSN, consisting of the letters 'IRSN' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue.

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# Résultats des études sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl



Dominique Laurier,

Elisabeth Cardis

Journée Technique de la SFRP  
« Tchernobyl - 30 ans après »  
Paris, 15 mars 2016



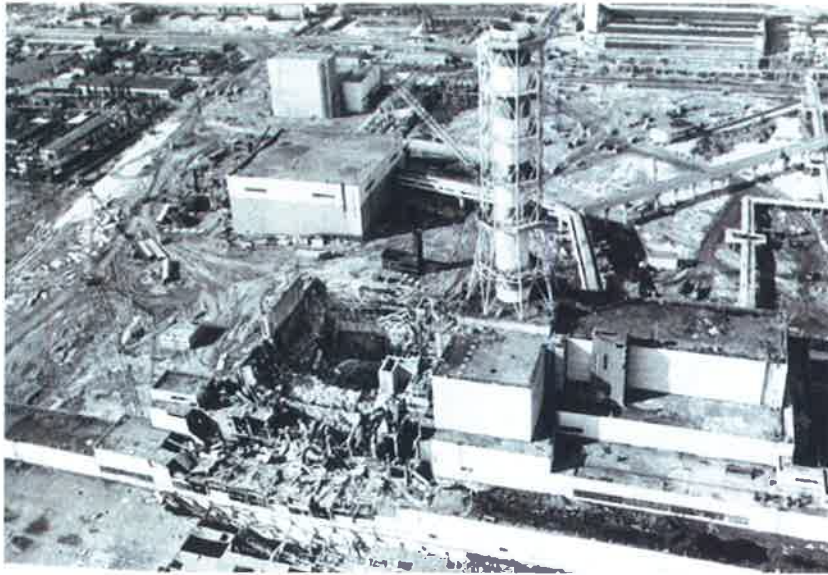


## Plan

- Contexte et populations impactées
- Risques de cancers
- Risques de pathologies non cancéreuses
- Conclusion et perspectives

# Accident de Tchernobyl

26 avril 1986



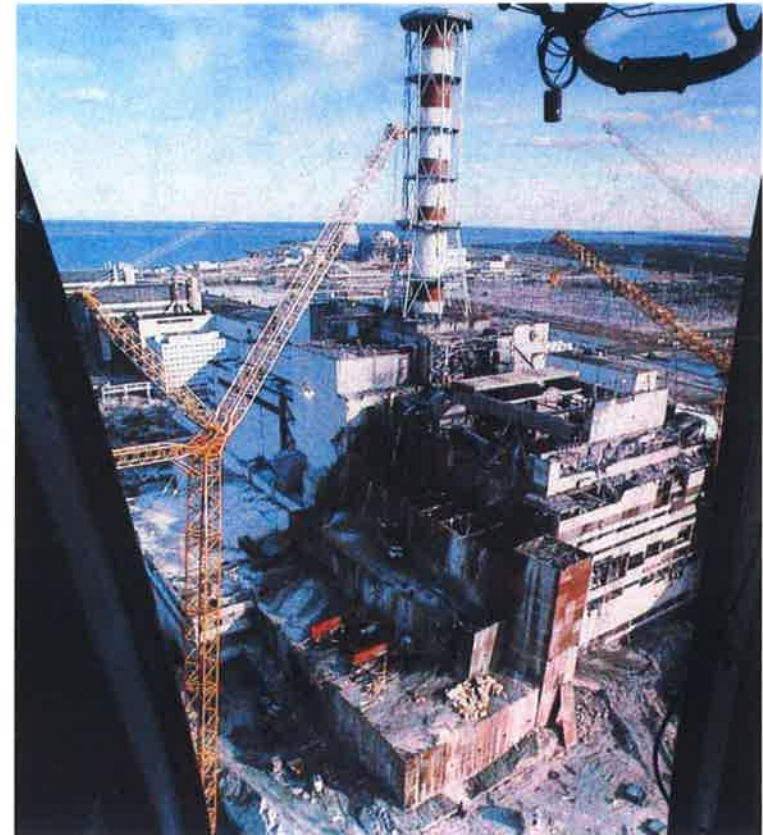
## Impact à court terme :

600 travailleurs présents le 26 avril 1986

237 hospitalisations

134 syndromes aigus d'irradiation

42 décès immédiats



## Impact environnemental :

Activité relâchée :  $12 \cdot 10^{18}$  Bq

Radionucléides : Xe, I, Te, Cs, Sr



# Dépôts de césium 137

Source : UNSCEAR 2006

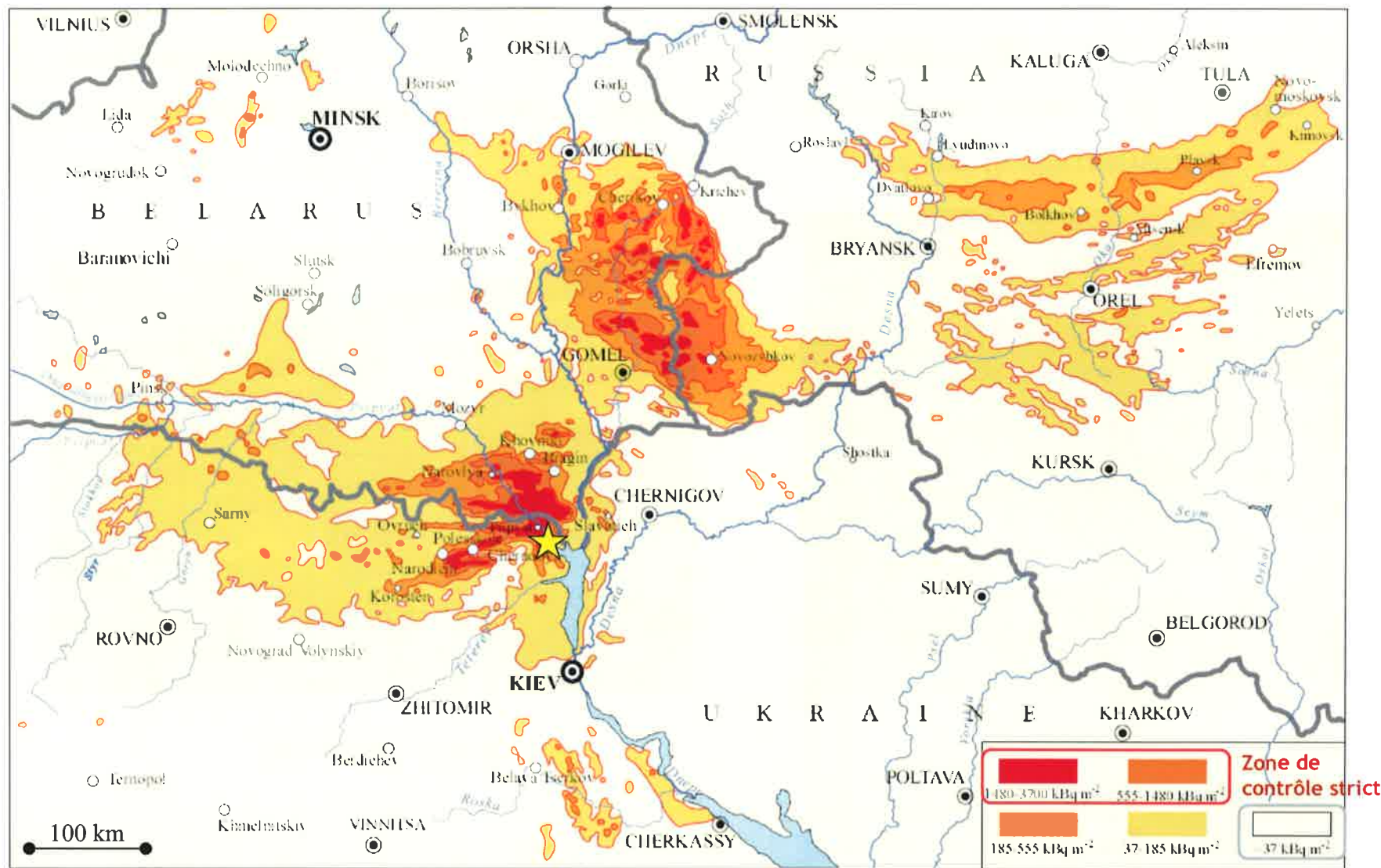


Figure VI. Surface ground deposition of caesium-137 released in the Chernobyl accident [11, 13].

# Principales populations exposées

Population	Taille de la population	Dose efficace moy (mSv)
Liquidateurs (1986–87, zone 30 km)	240 000	100
Evacués en 1986	116 000	33
Habitants des zones contaminées:		
<i>Dépôt Cs<sup>137</sup> &gt;555 kBq/m<sup>2</sup> *</i>	270 000	50
<i>Dépôt Cs<sup>137</sup> &gt;37,5 kBq/m<sup>2</sup></i>	5 000 000	10
<i>Belarus, Ukraine et zones contaminées de Russie</i>	66 500 000	2,5
Europe †	570 000 000	0,5

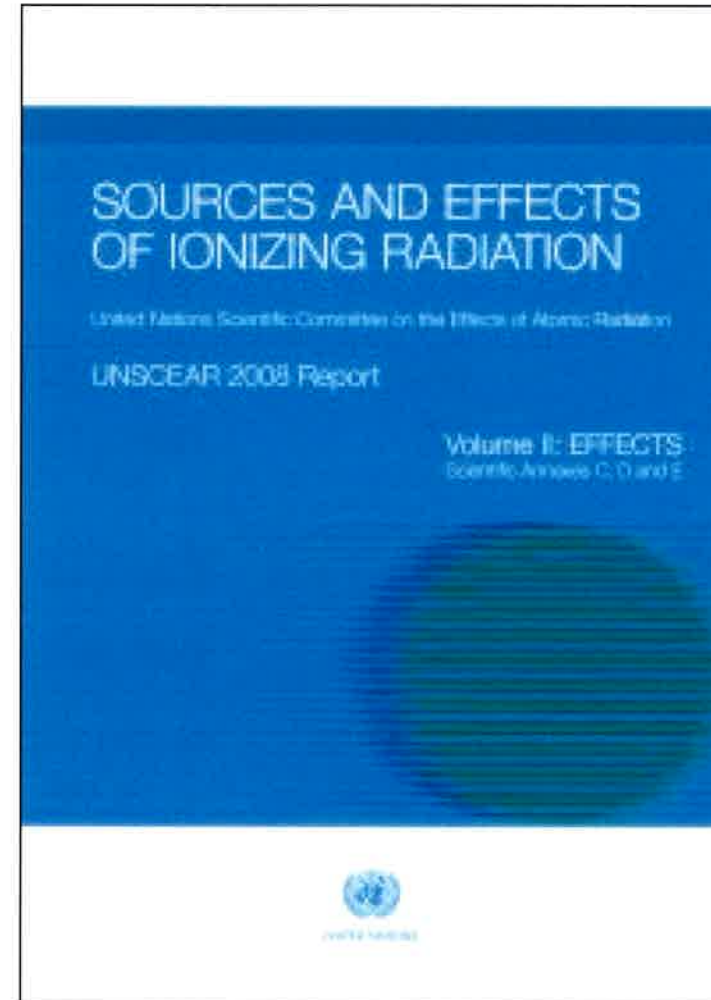
\* Zone de contrôle strict

† Hors zones contaminées et plupart de la Russie

# Bilan des effets sanitaires

**Rapport Unscear 2008  
Annex D.**

**« Health effects due to radiation  
from the Chernobyl accident »**



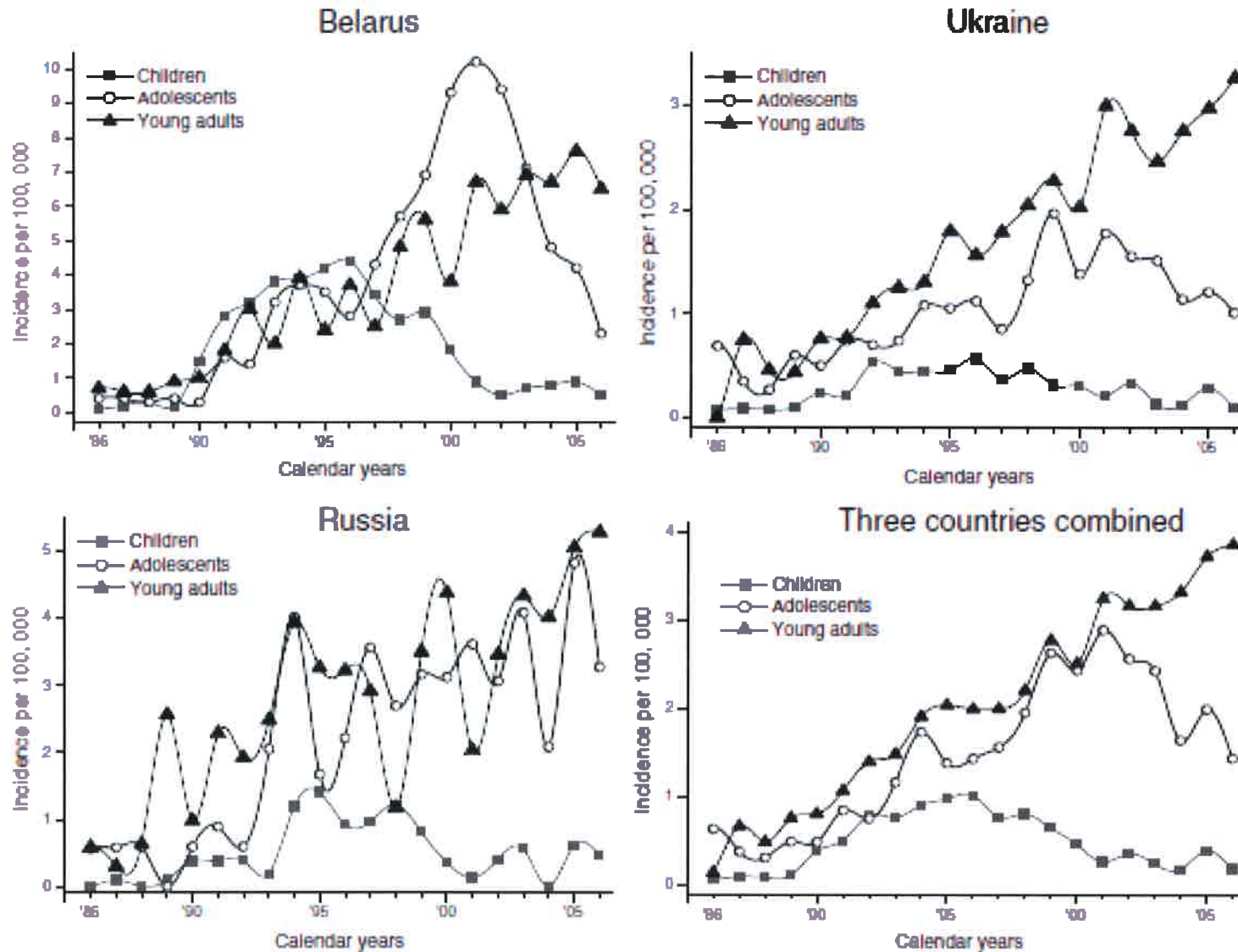


## Plan

- Contexte et populations impactées
- Risques de cancers
- Risques de pathologies non cancéreuses
- Conclusion et perspectives

# Incidence du cancer de la thyroïde

[Yamashita HP 2014]

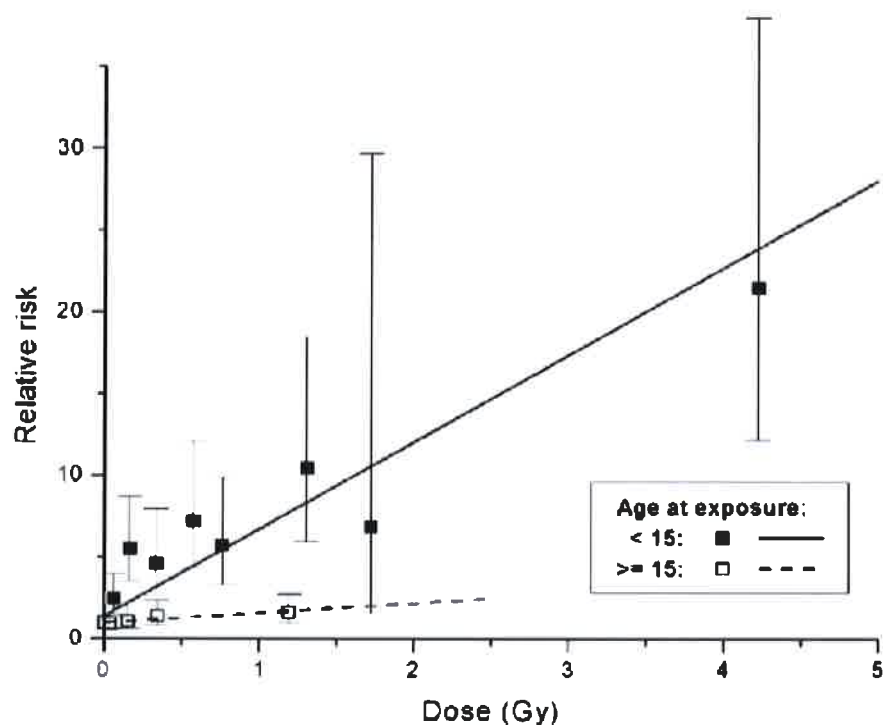


**Augmentation persiste plus de 20 ans après l'accident**  
**Augmentation aujourd'hui observée chez des adultes**



# Relation dose-risque pour le cancer de la thyroïde chez les enfants

External exposure  
ERR/Gy~7.7 [1.1 – 32]



Internal exposure, Chernobyl (0-17 y.o.)  
OR at 1 Gy~5.5 – 8.4 [ERR/Gy 1.9 – 19]

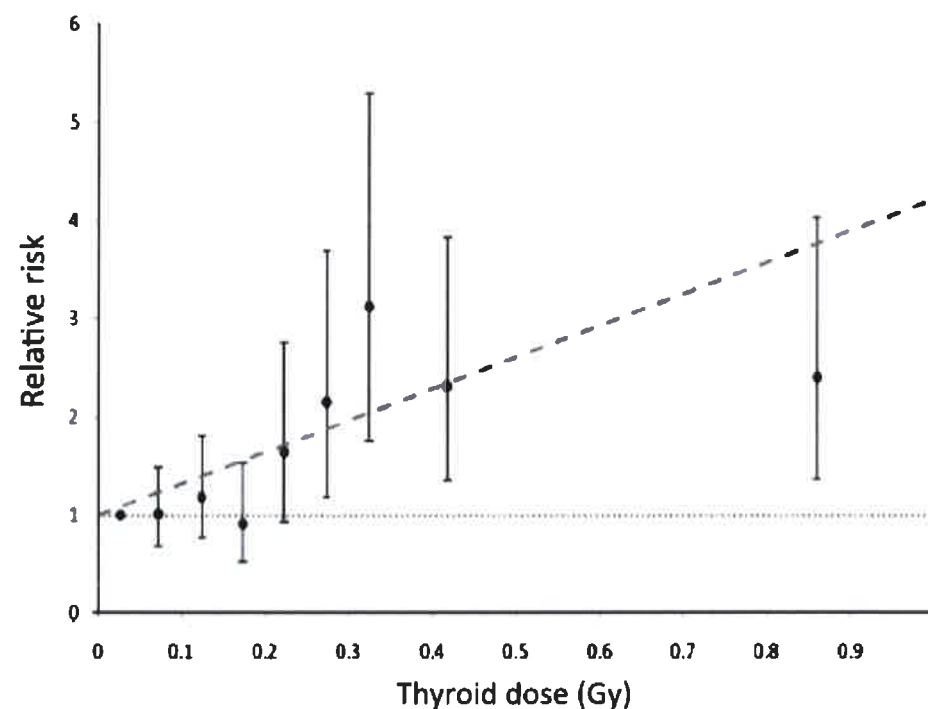


Fig. 1. Dose-response relationship for developing thyroid cancer after external or internal radiation exposure. Radiation exposure of the thyroid at young age is the most clearly defined environmental factor associated with risk for thyroid cancer. Risk estimates for external and internal exposures are generally comparable. Graphs are reproduced from references Ron (2002) and Ivanov et al. (2012), respectively, with permissions.

[Yamashita HP 2014]

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancer thyroïdien chez les adultes lors de l'accident

## Matériel & méthode

- ❑ Cohorte des liquidateurs ukrainiens : 150 813 hommes suivis de 1986 à 2010
- ❑ 196 cas de cancer de la thyroïde diagnostiqués
- ❑ Calcul du ratio d'incidence standardisé (SIR) par rapport aux taux du registre du cancer national

## Résultats

- ❑ Cohorte totale : SIR = 3,5 [3,0 - 4,0]
- ❑ Liquidateurs de 1986 : SIR = 3,9 [3,3 - 4,6]

## Limites

- ❑ Biais possible dû à meilleure surveillance médicale
- ❑ Pas d'analyse de relation dose-risque

[Ostroumova et al. EJE 2014]

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancer thyroïdien chez les adultes lors de l'accident

## Matériel & méthode

- ❑ Liquidateurs biélorusses, russes et baltes ayant travaillé à Tchernobyl entre avril 86 et décembre 87
- ❑ Etude cas-témoins nichée
- ❑ Questionnaire en face à face (type de travail, lieu de vie et comportement - examens médicaux/tabac), calcul de la dose à la thyroïde (prise en compte de l'exposition externe et interne, modèle de dosimétrie RADRUE)  
Prise en compte des incertitudes

## Résultats

- ❑ Effectif important : 107 cas et 423 témoins
- ❑ Dose médiane à la thyroïde entre 50 et 70 mGy
- ❑ Relation dose-risque significative : ERR/Gy = 3,8 [1,0 ; 10,9]
- ❑ Relation significative dès 300 mGy

[Kesminiene et al. Radiat Res 2012]

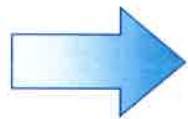
## Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancer thyroïdien

- ❑ Excès de risque identifié dès 1992
  - ❑ Tumeurs invasives, essentiellement papillaires
  - ❑ RR augmenté si âge à l'exposition précoce et si carence iodée
  - ❑ Dû à l'iode 131 (+ iodes vie courte + carence en iode stable ?)
- 
- ❑ Excès se poursuit encore aujourd'hui chez des individus devenus adultes
  - ❑ Relation dose-risque (plus faible) observée chez des individus adultes lors de l'accident
  - ❑ Relation compatible avec les résultats des survivants Hiroshima et Nagasaki
  - ❑ Relation dose-risque significative avec un ERR par Gy entre 3 et 8

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : leucémie chez les enfants

Etude cas-témoins Ukraine [Noshchenko IJC 2010]

- ❑ Enfants < 5 ans résidants dans les zones les plus contaminées
- ❑ 246 cas diagnostiqués entre 1987 et 1997 / 492 témoins
- ❑ Reconstitution des doses : historique habitat, mode de vie, débit gamma (sol), consommation × mesures contamination Cs<sup>137</sup>  
Considère exposition externe et contamination interne
- ❑ Doses de 0 à 313 mGy (92% < 10 mGy)



Augmentation significative du risque de leucémies

OR = 2,4 [1,4 ; 4,0] pour une dose > 10 mGy

Limites : choix des témoins et estimation des doses



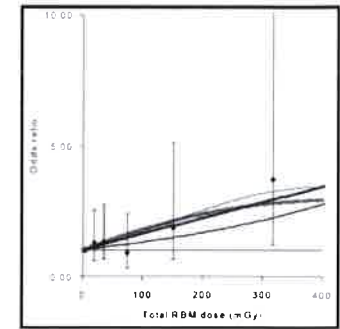
# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : leucémie chez les adultes

Liquidateurs Biélorusses-Russes-Baltes (CIRC) [Kesminiene et al. 2008]

60 cas (40 leu + 20 LNH) / 287 témoins

Dose moyenne 13 mGy (RADRUE)

Leucémies hors LLC : ERR/Gy = 5,0 [-0,4 ; 5,7]



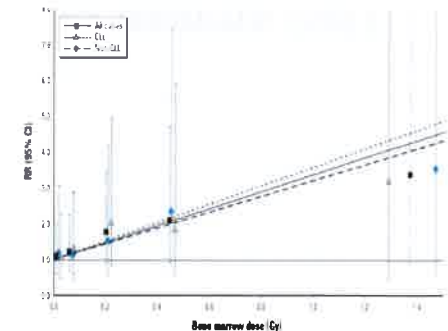
Liquidateurs Ukrainiens (NCI) [Zablotska et al. 2012 ; Romanenko et al. 2008]

117 cas / 716 témoins

Dose moyenne 132 / 82 mGy (Rad rue)

Leucémies hors LLC : ERR/Gy = 2,4 [0,5 ; 5,9]

LLC : ERR/Gy = 2,6 [0,1 ; 8,4]



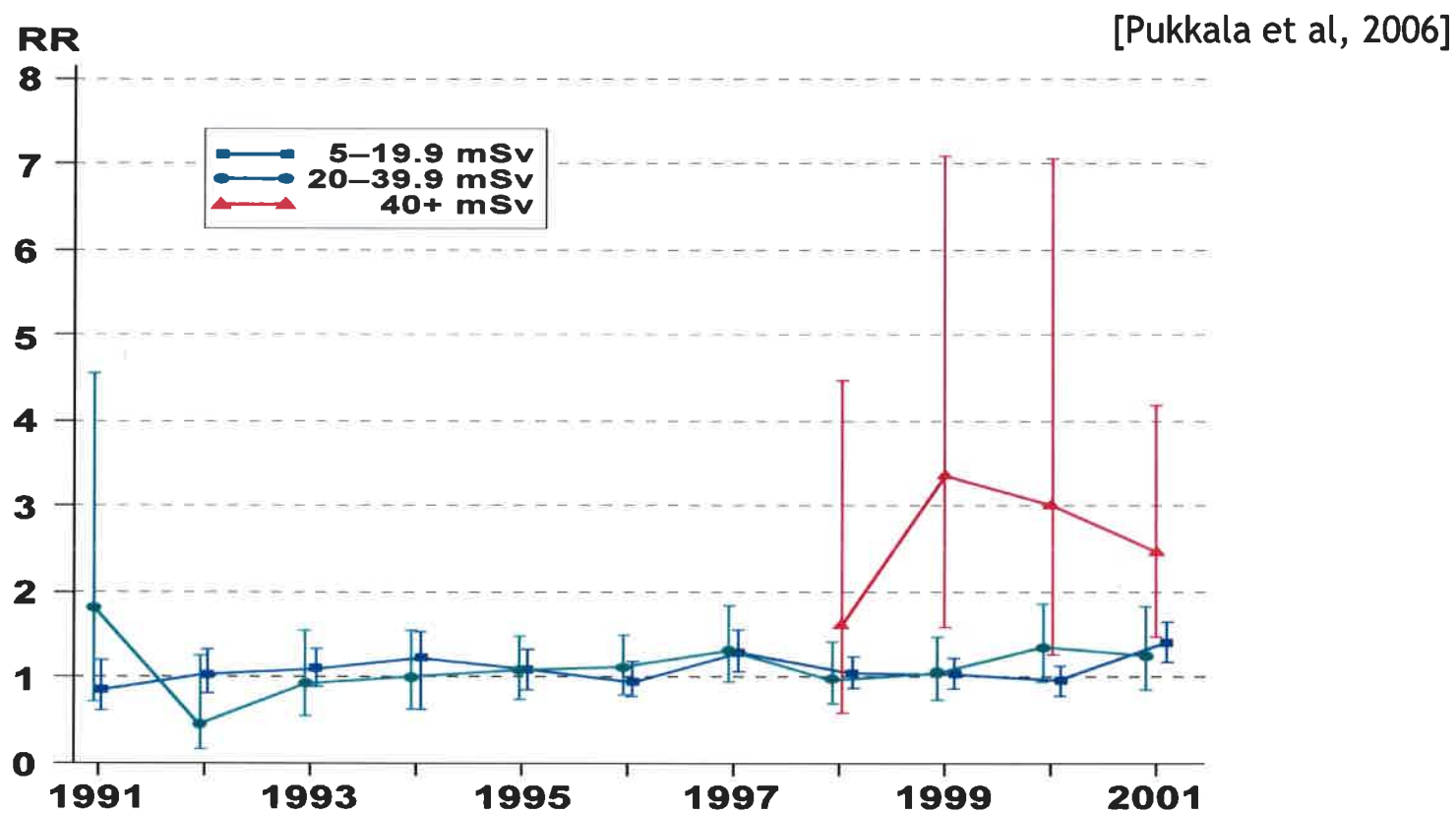
ERR proches de ceux issus des survivants de Hiroshima et Nagasaki

Relation pour les LLC et non-LLC

Cohérence des résultats des 2 études

# Incidence du cancer du sein chez la femme

Incidence du cancer du sein dans les territoires contaminés en Belarus et en Ukraine (âge à l'exposition < 45 ans, dose laggée de 5 ans)



# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancer du sein

[Prysyazhnyuk et al. PRMR 2014]

## SIR cancer du sein (femmes) en Ukraine

	N cas observés	N cas attendus	SIR (IC 95%)
Résidents des territoires contaminés (1990-2011)	1 168	1 835,7	0,63 (0,60 ; 0,67)
Evacués de Prypyat et zone 30 km (1990-2011)	314	411,9	0,76 (0,68 ; 0,85)
Liquidateurs intervenus en 1986-87 (1994-2011)	303	185,7	1,63 (1,44 ; 1,82)

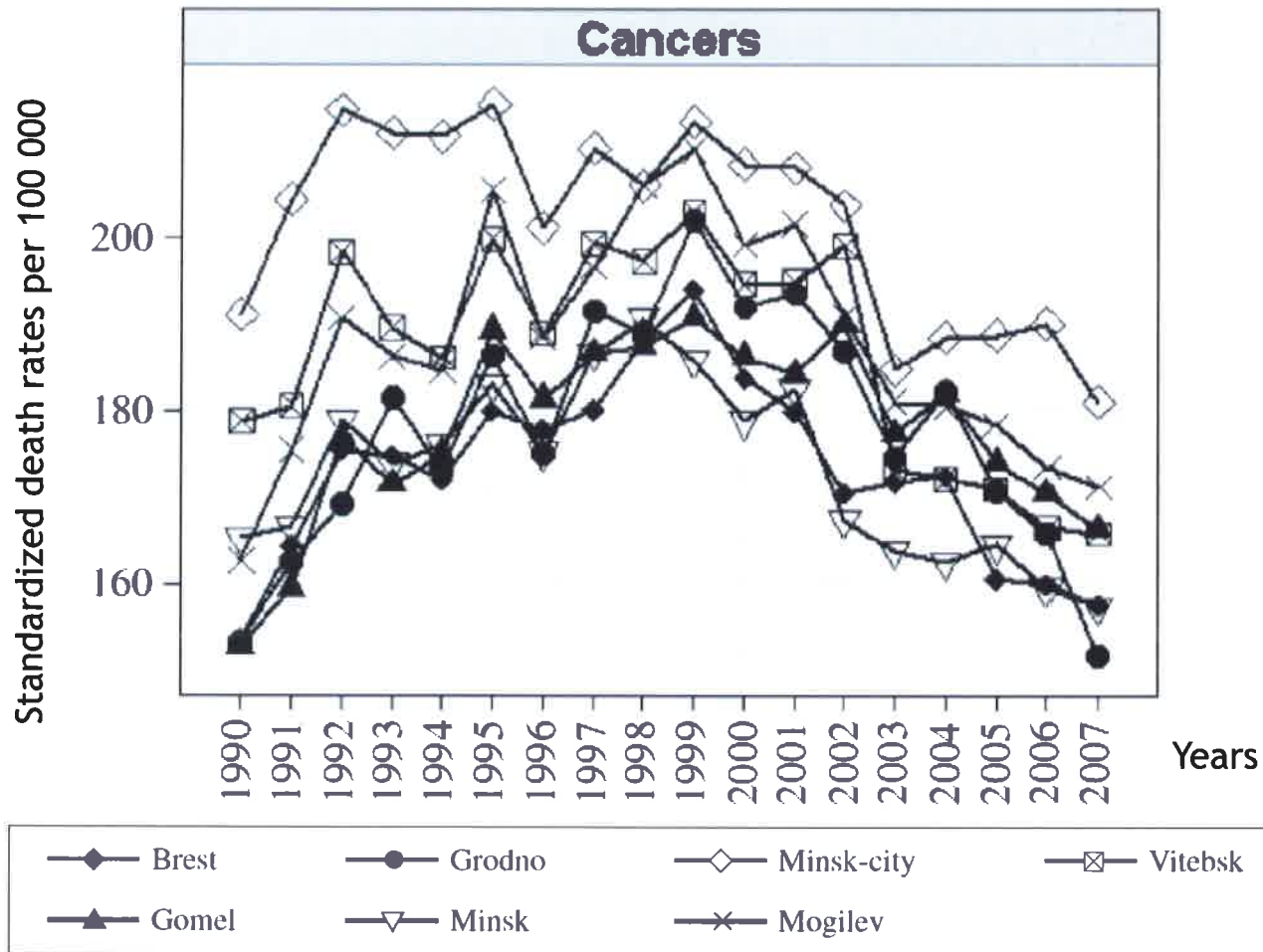


- Pas d'indication d'excès de cancer du sein en population générale
- Excès possible chez les liquidateurs des premières années
- Poursuivre le suivi

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancers solides

Evolution de la mortalité par cancers solides au Belarus

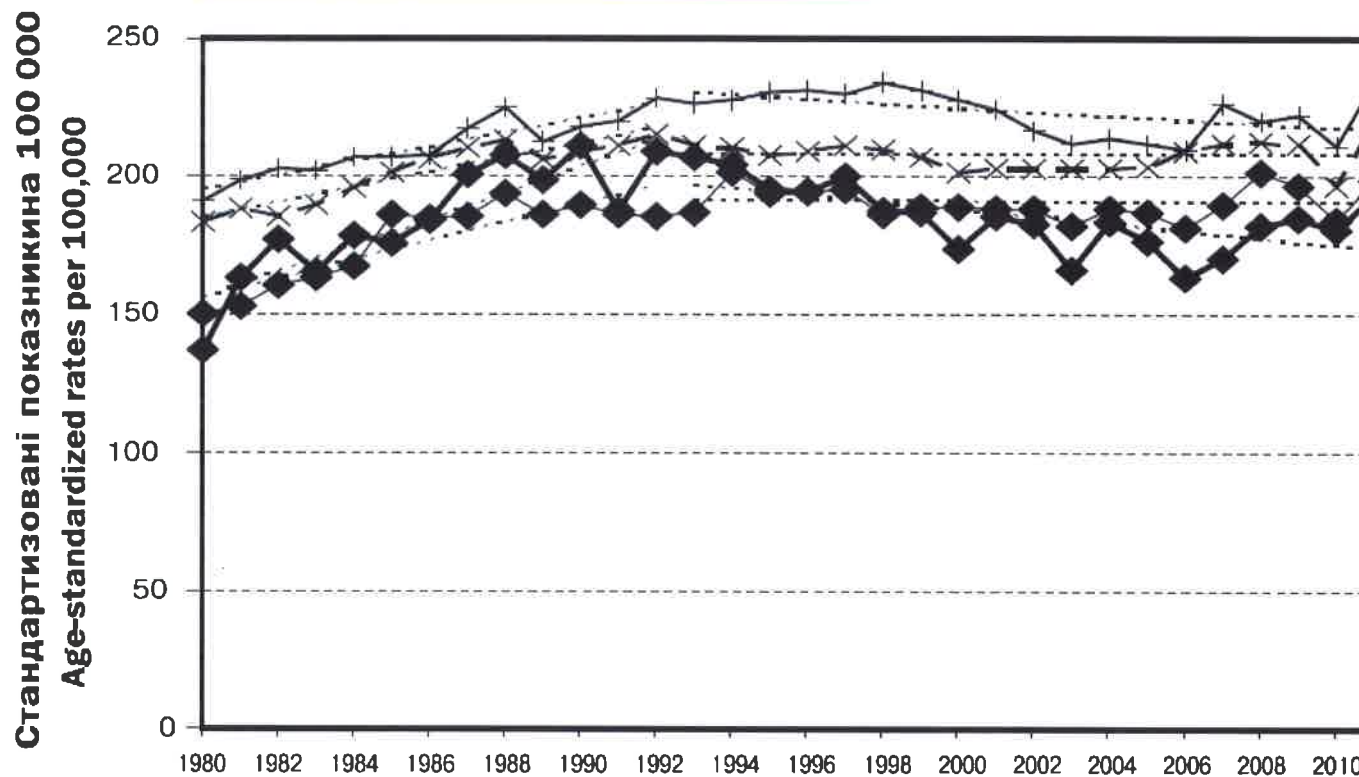
[Grigoriev et al.  
Pop Studies 2013]



# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancers solides

[Prysyazhnyuk et al. PRMR 2014]

## Evolution de l'incidence des cancers solides en Ukraine



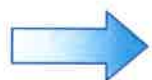


# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancers solides

[Prysyazhnyuk et al. PRMR 2014]

## SIR cancers solides en Ukraine

	Effectif en 1986	N cas observés	N cas attendus	SIR (IC 95%)
Résidents des territoires contaminés (1990-2011)	360 000	15 389	19 226,8	0,80 (0,79 ; 0,81)
Evacués de Prypyat et zone 30 km (1990-2011)	50 000	3 360	3 968,4	0,85 (0,82 ; 0,88)
Liquidateurs intervenus en 1986-87 (1994-2011)	85 000	9 764	9 063,2	1,08 (1,05 ; 1,10)



- Pas d'indication d'excès de cancer solide en population générale
- Excès limité possible chez les liquidateurs des premières années
- Poursuivre le suivi

# Risque de cancer solide chez les liquidateurs

[Kashcheev et al. 2015]

## Cohorte des liquidateurs russes (Registre National de Tchernobyl)

- 65 000 individus avec dose individuelle
- Dose : 0,0001 à 1,24 Gy (médiane 0,102 Gy)
- 4002 cancers solides observés et 2422 décès par cancer solide (1992-2009)

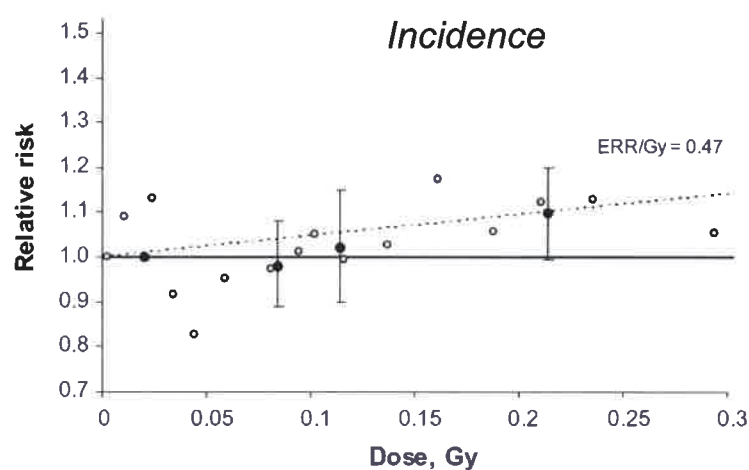


Fig. 4 Relative risk (RR) of all solid cancers by dose groups (black

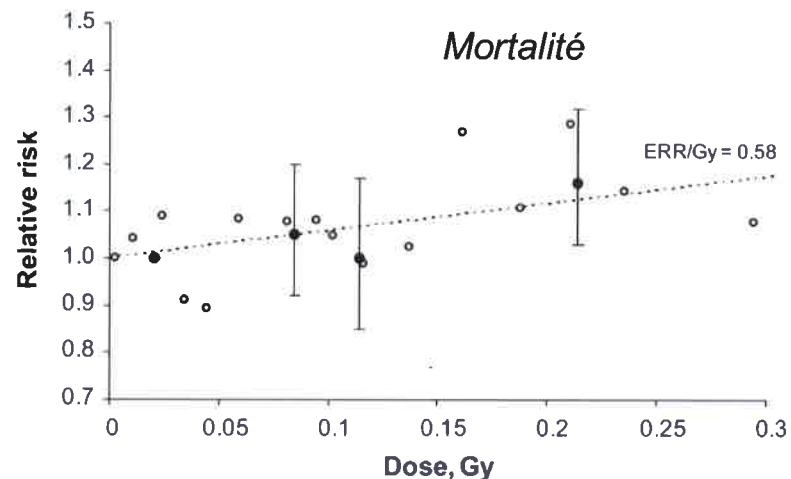


Fig. 6 Relative risk (RR) of all solid cancer deaths by dose groups



Résultats cohérents entre incidence et mortalité

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cancers solides hors thyroïde

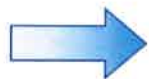
Calcul de SIRs dans des cohortes d'individus exposés durant l'enfance  
avec doses à la thyroïde reconstituée

**Ukraine** [Hatch et al. Cancer Epi 2015]

13 203 individus <18 ans en 1986 - SIRs sur la période 1998-2009  
Âge fin de suivi moy=31 ans (max 51) - N cancers (hors thyroïde) = 43  
Leucémie SIR = 1,9 [0,7 - 4,1] - aucun SIR significatif

**Belarus** [Ostroumova et al. Envir Res 2016]

11 847 individus <18 ans en 1986 - SIRs sur la période 1997-2011  
Âge fin de suivi médiane=33 ans (max 53) - N cancers (hors thyroïde) = 42  
Leucémie SIR = 1,8 [0,7 - 3,6] - aucun SIR significatif



- Pas d'excès de cancer solide hors thyroïde mais âge jeune et effectifs très limités
- Suggère incidence élevée de leucémies
- Poursuivre le suivi

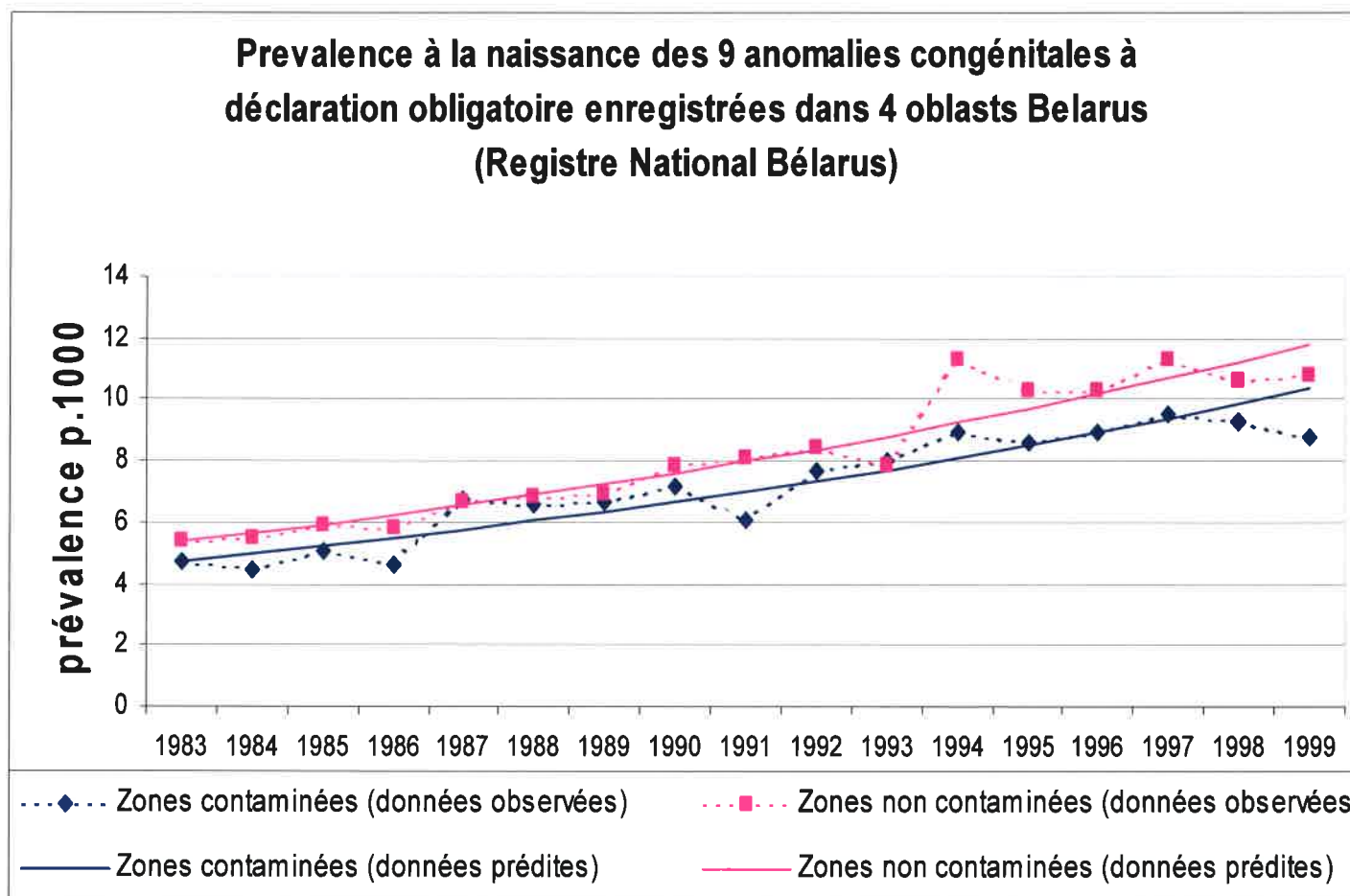


## Plan

- Contexte et populations impactées
- Risques de cancers
- Risques de pathologies non cancéreuses
- Conclusion et perspectives

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : Anomalies congénitales

Initiative Franco-Allemande pour Tchernobyl : registre national Bélarus



**Anomalies mutagènes**  
(Trisomie 21, polydactylie, atrésie œsophage, atrésie anale)

**Anomalies tératogènes**  
(fentes labiales, anencéphalie, Spina bifida, réduction des membres)

[Lazjuk G et al. Reprod Toxicol 2003]



# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : malformations congénitales

## Registre Ukrainien des malformations congénitales de la province de Rivne

- Critères de diagnostic de EUROCAT
- Période 2000-2009
- 28500 mesures anthropogammamétriques corps entier de l'incorporation Cs-137 chez des femmes

[Wertelecki Congenit Anomal 2014]  
[Wertelecki Clin Molec Teratology 2016]



## Ratio entre la région de Polissia et le reste de la province

- Incorporation Cs-137 : ratio = 3 à 5
- Fréquence de défaut de fermeture du tube neural (n=319) : ratio = 1,6

## Limites

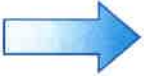
- Etude descriptive, données agrégées, pas de doses individuelles
- Effectifs faibles
- Confusion possible : population rurale, mode de vie, alcool

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : cataractes

Liquidateurs (dose étalée ~ 20 mois)

[Worgul et al. Radiat Res 2007]

- Cohorte des liquidateurs Ukrainiens
- Large effectif : 8 607 personnes examinées 12-14 ans après l'exposition
- 2 évaluations ophtalmologiques à 2 ans d'intervalle, en aveugle
- Classification Merriam-Focht
- Estimations des expositions  $\gamma$  et  $\beta$  : mesures + estimations Monte Carlo
- Doses faibles : 33% < 0,1 Gy ; 77% < 0,2 Gy ; médiane = 0,12 Gy
- Ajustement sur l'âge, le sexe, le statut tabagique, le diabète...

 Prévalence d'opacités Sous-Capsulaire Postérieure ou Cortical : 25%  
OR<sub>1Gy</sub> = 1,65 (toutes opacités non nucléaires, grade 1 à 5)  
Seuil de dose estimé : 0,50 Gy (95% CI : 0,17 - 0,65 Gy)

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : pathologies circulatoires

[Ivanov HP 2006]

## Liquidateurs

- Cohorte russe : 61 017 liquidateurs suivis sur 1986-2000
- Dose moyenne = 109 mGy
- Diagnostics de CVD fournis par le Russian National Medical and Dosimetry Registry (RNMDR)

## Résultats

### Cohorte entière

- |                                   |          |             |                      |
|-----------------------------------|----------|-------------|----------------------|
| ▪ Pathologies circulatoires       | n=32 189 | ERR/Gy=0,18 | 95%CI [-0,03 ; 0,39] |
| ▪ Pathologie cardiaque ischémique | n=10 942 | ERR/Gy=0,41 | 95%CI [0,05 ; 0,78]  |
| ▪ Hypertension essentielle        | n=11 910 | ERR/Gy=0,36 | 95%CI [0,01 ; 0,71]  |
| ▪ Pathologie cérébrovasculaire    | n=12 832 | ERR/Gy=0,45 | 95%CI [0,11 ; 0,80]  |

Intervenants de la première année et restés au moins 6 semaines en zone  
(dose moyenne > 150 mGy)


- Pathologie cérébrovasculaire ERR/Gy=1,18 95%CI [1,00 ; 1,40]

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : pathologies circulatoires

## Population des territoires contaminés en Ukraine

[Buzunov PRMR 2013]

- Mortalité par pathologie circulatoire sur la période 1988-2010
- Groupe 1: 155 592 personnes avec dose estimée entre 5,6 et 21,0 mSv
- Groupe 2: 98 830 personnes avec dose estimée entre 21,0 et 51,0 mSv

 Mortalité significativement supérieure dans le groupe 2  
par rapport au groupe 1

- **Limite** : simple comparaison des taux bruts de mortalité

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : Santé mentale

[Bromet Clin Oncol 2011 ; Bromet JRP 2012]

- Doublement de l'incidence de syndrome de **stress post-traumatique** (PTSD) et de **l'anxiété**, et une réduction significative des scores de **santé perçue** chez les adultes résidant dans les territoires contaminés
- Prévalence de **dépressions et de PTSD** toujours élevée 20 ans après l'accident chez les intervenants d'urgence et les liquidateurs
- Effets psychosociaux attribués aux changements de l'environnement de vie et aux conséquences sociales et économiques de l'accident - Pas de lien mis en évidence avec la dose

**Limites** : Diversité des indicateurs, multiplicité des facteurs confondants potentiels





## Plan

- Contexte et populations impactées
- Risques de cancers
- Risques de pathologies non cancéreuses
- Conclusion et perspectives

# Conséquences de l'accident de Tchernobyl : synthèse

## Conséquences sanitaires établies

- Augmentation forte et rapide de l'incidence des cancers de la thyroïde chez les individus exposés durant l'enfance - persiste à l'âge adulte
- Relation dose-réponse observée pour la leucémie dans les années récentes - chez les enfants et chez les adultes au moment de l'accident
- Relation dose-réponse pour les opacités cristalliniennes (liquidateurs ukrainiens)
- Conséquences psychologiques

## Conséquences sanitaires possibles

- Relation dose-risque de cancers de la thyroïde après exposition à l'âge adulte
- Relation dose-effet possible pour le cancer du sein chez la femme jeune
- Incertitudes sur un accroissement de l'incidence des cancers solides
- Interrogations sur une augmentation de malformations congénitales
- Observations d'effets non-cancers à consolider (pathologies circulatoires chez les liquidateurs)
- Diversité d'effets sanitaires rapportés, liés ou non à l'exposition aux rayonnements ionisants

# Leçons de Tchernobyl

## Limites méthodologiques

- ❑ Complexité du contexte social/politique (chute de l'URSS en 1991)
- ❑ Accroissement de la mortalité et réduction de la durée de vie en ex-URSS
- ❑ Retard de mise en place des études épidémiologiques
- ❑ Problèmes d'identification/caractérisation des populations
- ❑ Qualité des estimations dosimétriques, des diagnostics
- ❑ Données perdues, doutes sur la qualité des données recueillies
- ❑ Manque de données de référence (qualité des taux, démographie)
- ❑ Facteurs de confusion (déficiency en iode, effets des dépistages...)

## Leçons pour l'épidémiologie post-accidentelle

- ❑ Nécessité de se préparer à la mise place d'une réponse épidémiologique
- ❑ Poursuivre le suivi des cohortes
- ❑ Avantages de l'approche cas-témoins

# Coordination des études post-Tchernobyl

CO-CHER « Cooperation on Chernobyl Health Research »

Projet européen (EC FP7)

Coordination CIRC



- Améliorer la coordination des études épidémiologiques post-Tchernobyl, rapprocher les équipes de recherche, assurer un financement pérenne des études et le maintien des agréments ([Chernobyl Research Committee](#))
- Mettre en place des études sur la vie entière ([Chernobyl Lifespan Cohorts](#))
- Développer un plan de recherche à long terme centré sur les études prioritaires identifiées ([Chernobyl Research Program](#))

<http://co-cher.iarc.fr/>

# Préparation post-accidentelle



**SHAMISEN**

Nuclear Emergency Situations  
Improvement of Medical and  
Health Surveillance

## Shamisen

■ Programme Européen Operra 2015-2017



■ 19 partenaires en Europe et au Japon + experts Biélorusses, Russes et Ukrainiens

■ Objectifs

- S'appuyer sur les leçons tirées des populations affectées par des accidents nucléaires, en particulier ceux de Tchernobyl et Fukushima
- Développer des recommandations pour la surveillance médicale et sanitaire des populations affectées par des accidents nucléaires passés et futurs
- Identifier des actions avant / pendant la phase d'urgence / après un accident nucléaire pour améliorer l'épidémiologie post-accidentelle
- Contribuer à l'amélioration des conditions de vie des populations affectées : engagement dans des programmes de surveillance, meilleure communication, éviter la génération d'anxiété

Website : [www.crealradiation.com/index.php/en/shamisen-hom](http://www.crealradiation.com/index.php/en/shamisen-hom)



Remerciements à Jean-Marc Bertho,  
Enora Cléro, Margot Tirmarche

Merci de votre attention