

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Les conséquences écologiques de l'accident de Tchernobyl

Un sujet toujours controversé

C. Adam-Guillermin, J.Garnier-Laplace,
K. Beaugelin-Seiller, C. Lecomte-Pradines,
J.M.Bonzom, A. Sternalski, T.Hinton

IRSN - Pôle Radioprotection Environnement Déchets Crise


Service de recherche et d'expertise sur les risques
environnementaux (SERIS)


Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (LECO)

prenom.nom@irsn.fr



Last Updated: Thursday, 20 April 2006, 05:55 GMT 06:55 UK

 E-mail this to a friend

 Printable version

Wildlife defies Chernobyl radiation

By Stephen Mulvey
BBC News

It contains some of the most contaminated land in the world, yet it has become a haven for wildlife - a nature reserve in all but name.

The exclusion zone around the Chernobyl nuclear power station is teeming with life.

As humans were evacuated from the area 20 years ago, animals moved in. Existing populations multiplied and species not seen for decades, such as the lynx and eagle owl, began to return.

There are even tantalising footprints of a bear, an animal that has not trodden this part



30 July 2010 Last updated at 16:00



Chernobyl zone shows decline in biodiversity

By Victoria Gill
Science reporter, BBC News



Scientists say contamination in the Chernobyl exclusion zone has affected biodiversity

The largest wildlife census of its kind conducted in Chernobyl has revealed that mammals are declining in the exclusion zone surrounding the nuclear power plant.

The study aimed to establish the most reliable way to measure the impact on wildlife of contamination in the zone.

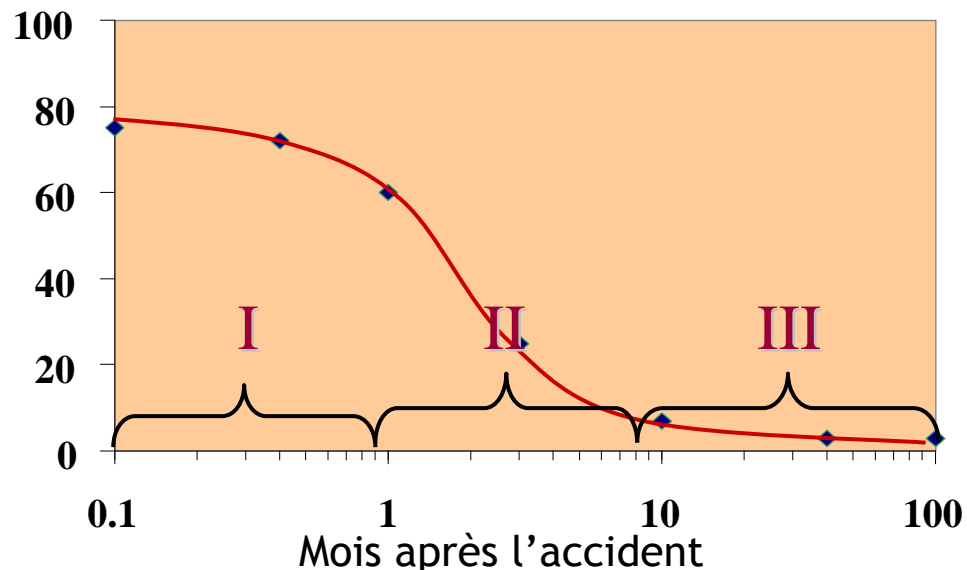
It was based on almost four years of counting and studying animals there.

Trois phases d'exposition différentes des organismes vivants et d'observation d'effets variés sur les espèces vivant dans la zone d'exclusion

- Les organismes vivants ont été exposés à différents radionucléides
- Enorme hétérogénéité spatiale des dépôts et des paramètres environnementaux gouvernant la dynamique d'évolution des concentrations en radionucléides dans les habitats et les organismes
- L'accident s'est produit au moment d'un "pic" métabolique, début du printemps

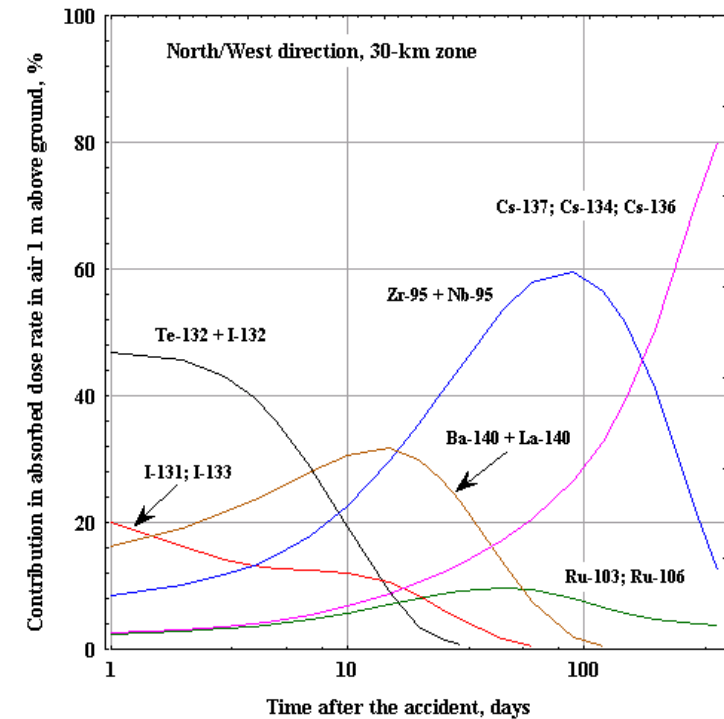
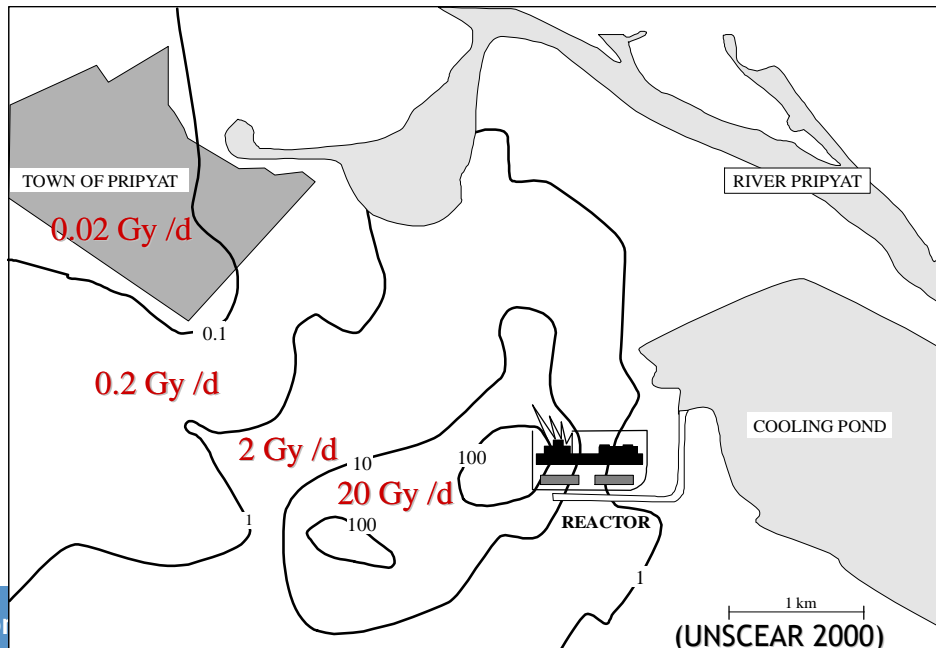
- Phase I : 20 à 30 premiers jours dite phase aiguë
- Phase II : jusqu'à la saison printanière suivante dite phase transitoire
- Phase III : jusqu'à nos jours dite phase chronique

Débit de dose par rapport au débit de dose initial (%)



Phase I - Exposition

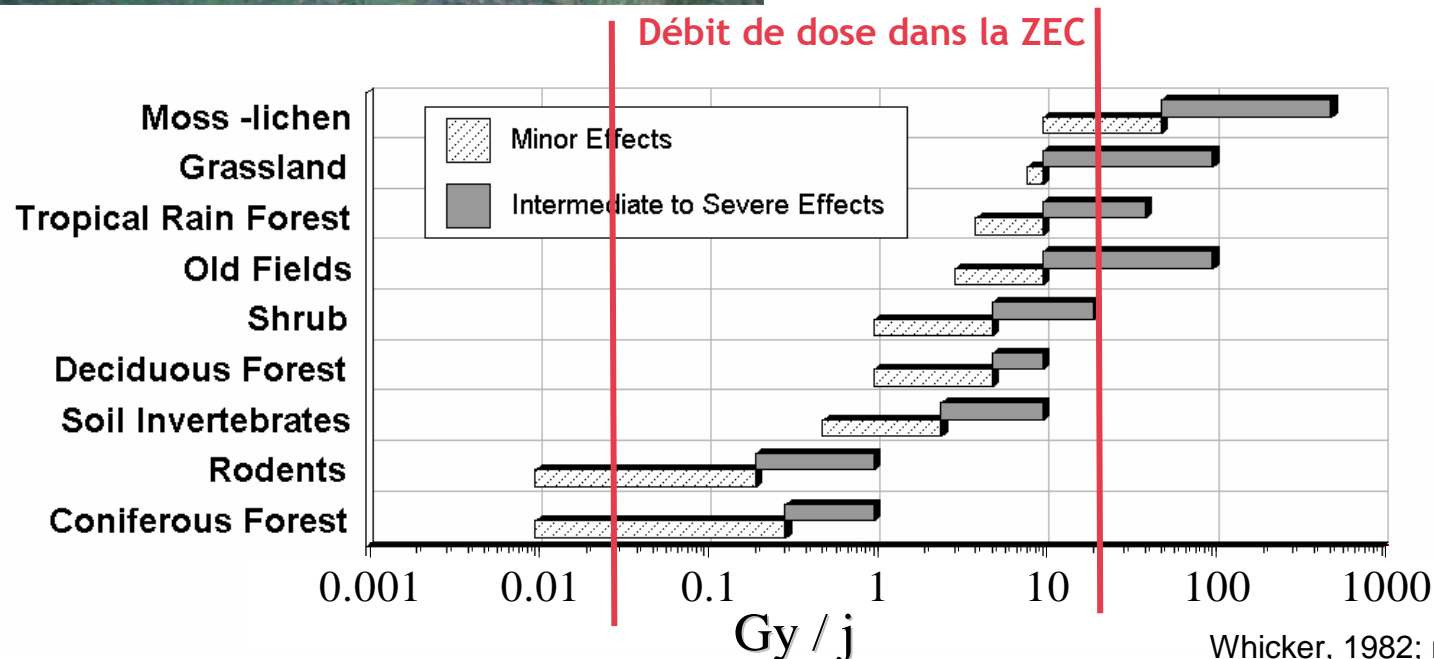
- Caractérisée par une grande quantité de RNs à vie courte ^{99}Mo ; $^{132}\text{Te}/\text{I}$; ^{133}Xe ; ^{131}I ; $^{140}\text{Ba}/\text{La}$
- Débit de dose γ allant jusqu'à 20 Gy/j
- Débits de dose dûs aux émetteurs β ponctuellement plus élevés
- Ratio β/γ de l'ordre de 6
- Doses à la thyroïde très élevées



Phase I - Effets aigus



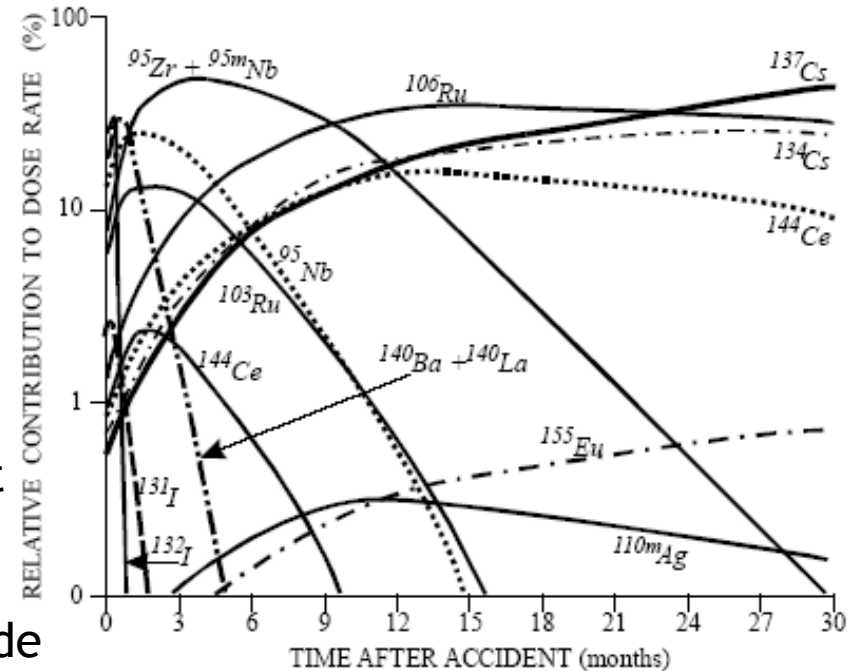
- Effets délétères aigus dans les 10 km autour du réacteur accidenté
- Mortalité des espèces les plus radiosensibles: mortalité accrue chez les conifères (forêt rousse), invertébrés du sol et mammifères
- Diminution de la reproduction chez les plantes et les animaux



Whicker, 1982; modified by T. Hinton)

Phase II - Exposition

- Décroissance des RNs à vie courte
- Redistribution au sein des différents compartiments des radionucléides déposés (transport, transferts)
- Contribution de la contamination interne des organismes vivants : domine progressivement l'irradiation externe.
- Pendant les trois mois après l'accident, 80% de la dose totale (estimée à l'échelle de la durée de vie) a été délivrée aux plantes et aux animaux, et plus de 95% de cette dose est due aux rayonnements β . Ratio β/γ de l'ordre de 30



Phase II - Effets

- Reproduction affectée - chez les mammifères, résorption embryonnaire en augmentation - dose cumulée pendant les 5 premiers mois de 12 à 110 Gy (γ) et de 580 à 4500 Gy (β). Dès le printemps 1987, la taille des populations réaugmente en raison de l'arrivée d'individus migrants provenant des zones les moins contaminées.

Phase III : du printemps 1987... à nos jours

- la majorité des recherches a été conduite sur les 5 à 6 ans après l'accident -

- L'exposition est chronique et les débits de dose sont globalement de l'ordre de moins de 1% des débits initiaux (mais toujours élevés - jusqu'à *ca.* 100-200 $\mu\text{Gy/h}$)
- La contribution de la dose en β vs. γ est fonction des capacités d'accumulation du Cs et du Sr spécifique à chaque espèce et fonction de paramètres du milieu
- Le ^{137}Cs et le ^{90}Sr sont les contributeurs majoritaires à la dose (puis Pu, Am)
- Les effets indirects et les effets subtils dominant. C'est la phase de toutes les controverses scientifiques en matière d'interprétation des effets observés...

Effets à l'échelle des écosystèmes dans la ZEC

Les conséquences des réponses biologiques dans les phases aiguë et transitoire ont conduit à un changement drastique des écosystèmes

- Un accident qui induit des doses létales dans la zone des 30 km pour un certain nombre d'espèces
- Une altération drastique de cet équilibre, avec progressivement la création de nouvelles niches écologiques ouvertes à des espèces immigrant dans la zone.
- Au delà de la zone d'exclusion, aucun effet aigu n'a été rapporté sur les espèces non-humaines

Effets sur la flore de la ZEC



- Diminution de la diversité et de l'abondance de certaines espèces (variations de radiosensibilité sur 4 ordres de grandeurs)
- Réduction du pouvoir germinatif des graines de diverses espèces
- Sélection des géotypes les moins radiosensibles. En 1993, les pins (5 à 15 Gy) ont 8x plus de dommages cytogénétiques que des contrôles. 50 à 60 % des jeunes conifères présentent une morphogénèse anormale

- Hyperméthylation de l'ADN des pins dans les zones les plus contaminées (20 à 40 Gy). Prévention de l'instabilité génomique et du remaniement du matériel génétique dans cet environnement extrême



Effets sur la faune de la ZEC



■ Pas de différence entre les populations vivant dans des sites contaminés par rapport à des sites témoins en ce qui concerne la distribution en âge, le sexe ratio, la diversité, l'abondance et l'état de santé global (Université du Texas, *Baker et al.*)

■ Impacts génétiques contradictoires: désordres significatifs de la spermatogénèse (Shevchenko et al.) à l'absence d'effet sur la reproduction ou l'absence de mutations sur les lignées germinales (*Baker*)

■ Chez l'hirondelle : Apparition d'un albinisme partiel 10x plus fréquents chez les individus de la zone - marqueur phénotypique de mutations chez les hirondelles. Cet albinisme réduirait leur succès d'accouplement. Augmentation significative de sperme anormal et taux d'anti-oxydants sanguin et hépatique réduits (Travaux de l'équipe de *Moller*)

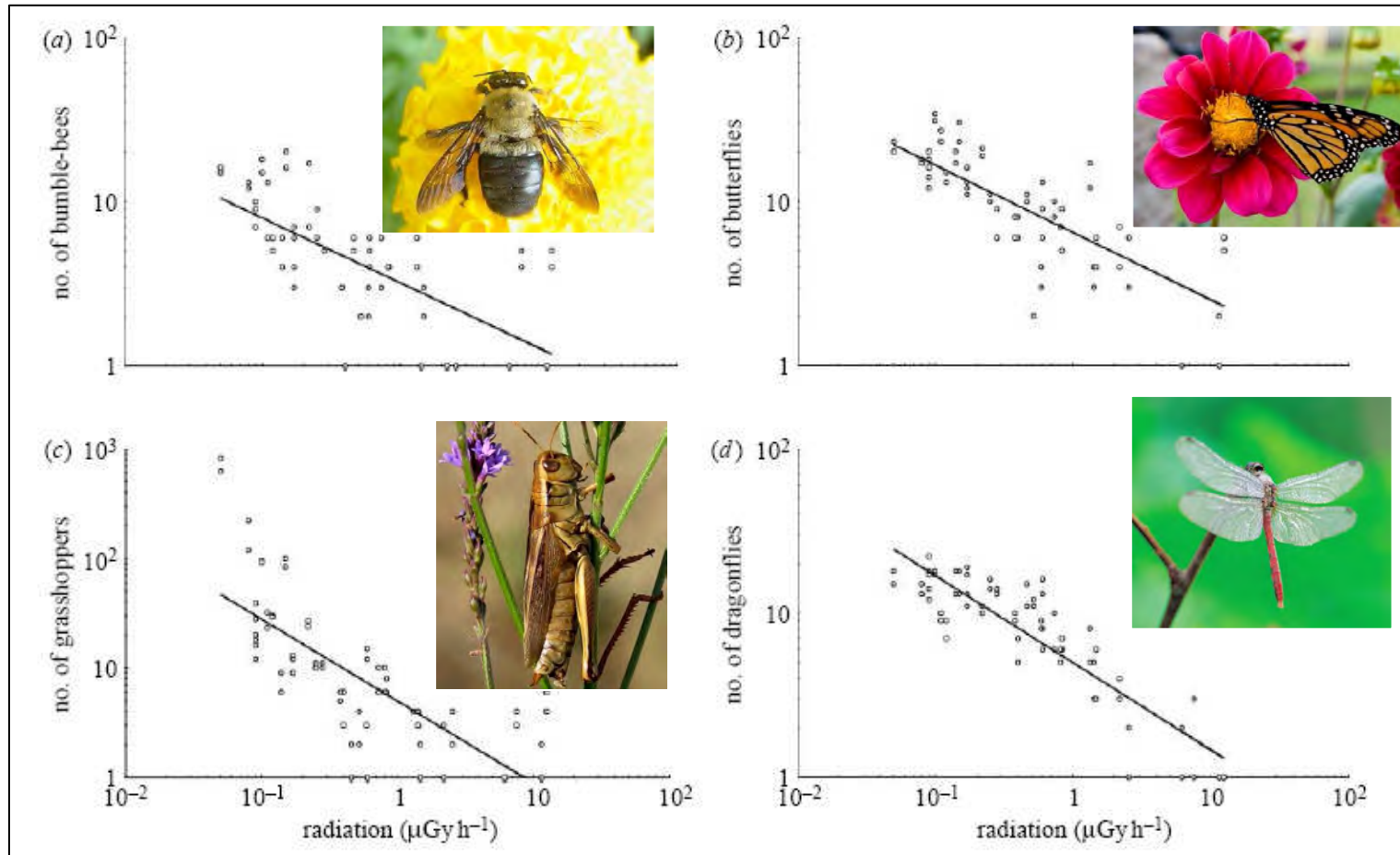


■ Déclin des populations plus important chez les espèces présentant des colorations basées sur les caroténoïdes (pigments, apportés par la nourriture, agissent comme anti-oxydants et décroissent en cas d'exposition aux radiations ionisantes). Etude sur 97 espèces - (*Galvan et al.*)

Les études éco-épidémiologiques chez les oiseaux une seule équipe « Moller & Mousseau »

- La richesse spécifique, l'abondance et la densité des populations d'oiseaux en milieu forestier décroissent avec l'augmentation du niveau d'exposition aux rayonnements ionisants
- L'abondance des oiseaux diminuerait de 60% entre les sites avec 0,1 à 1 mGy/h et les sites dits « témoin » avec 0,1 $\mu\text{Gy}/\text{h}$.
- Les populations d'oiseaux de la zone d'exclusion (546 individus de 48 espèces) présenteraient des cerveaux significativement plus petits que dans les zones témoins. Les auteurs quantifient une réduction de 5% sur le volume du cerveau quand le débit de dose varie de 0,02 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ à 100 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ (0,48 $\mu\text{Gy}/\text{j}$ à 2400 $\mu\text{Gy}/\text{j}$).
- Les femelles sont plus radiosensibles. Un net déséquilibre du sex-ratio caractérise les populations des oiseaux de Tchernobyl (chez les adultes 73% de mâles à 160 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ vs. 50% dans les zones non contaminées).

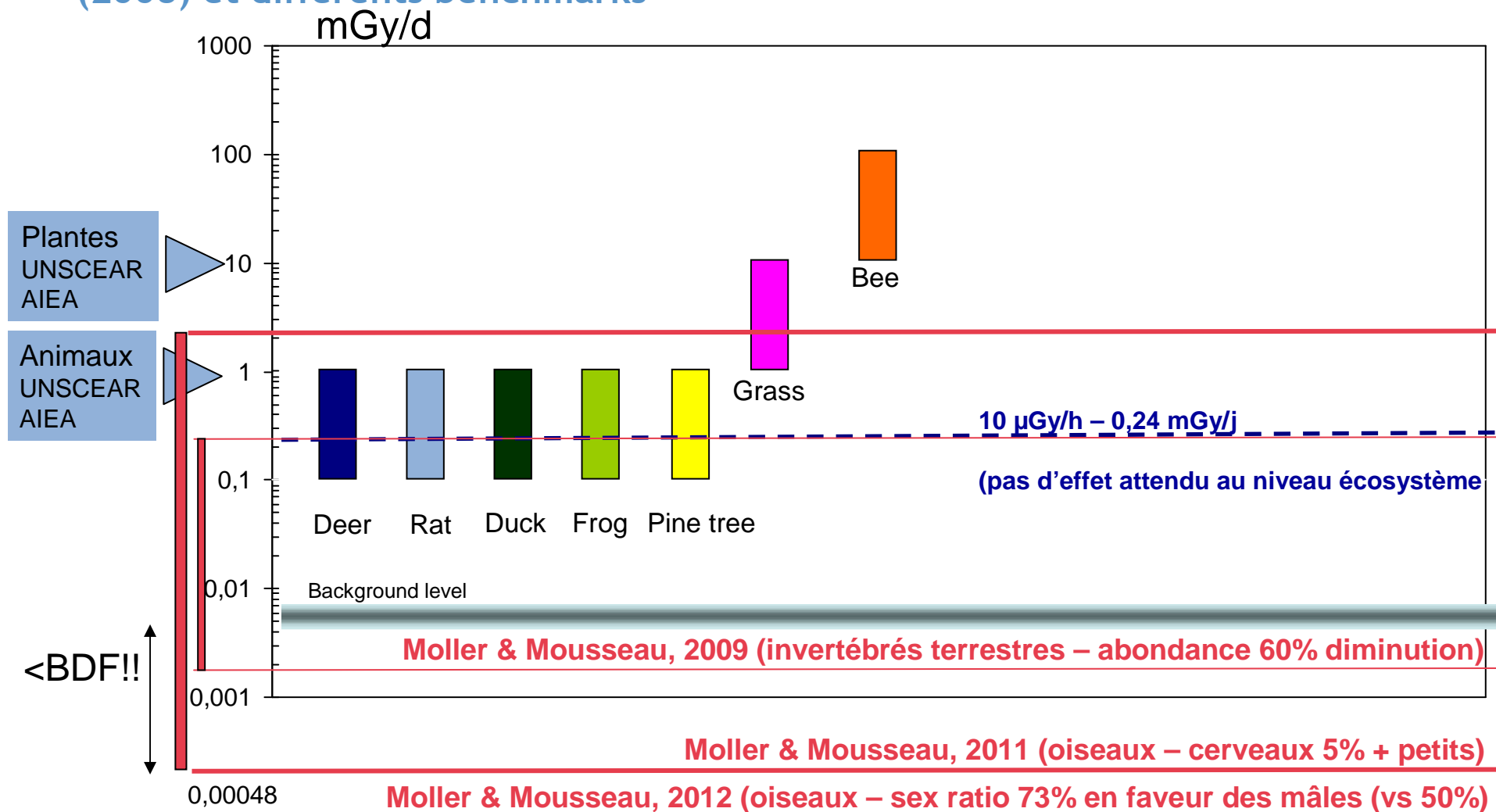
...et chez les invertébrés terrestres



- Selon, Moller & Mousseau: Lien de causalité entre le niveau d'irradiation et l'abondance de diverses espèces d'invertébrés terrestres (insectes pollinisateurs (papillons, bourdons), herbivores (sauterelles) et prédateurs (libellules, araignées). Effets drastiques (chute d'un facteur 10 de l'abondance) entre 0,1 $\mu\text{Gy/h}$ et 10 $\mu\text{Gy/h}$...

...mais remise en cause profonde de l'état de l'art...

Comparaison avec les gammes de débits de doses entrainant une très faible probabilité d'effets (Derived Consideration Reference Levels) de la CIPR 108 (2008) et différents benchmarks



Quelles peuvent être les causes de controverse?

■ Dosimétrie très souvent biaisée

- Calibration de l'instrument de mesure; sous estimation de la dose d'exposition : seul le débit de dose externe est mesuré ; celui lié à la contamination interne est ignoré et il est très variable d'une espèce à l'autre, et pour une même espèce est fonction du stade de vie; Forte hétérogénéité spatiale

■ Interprétation très souvent indirecte, statistiques critiquables

- Difficultés d'obtenir de « vrais » contrôles
- Difficultés de maîtriser toutes les variables confondantes (e.g., effet d'un échantillonnage dans le temps - croissance rapide des juvéniles, cycle saisonnier et évolution des stades de vie...)
- Adaptation au fil des générations

Les efforts de R&D à poursuivre

- Effet sur la diversité génétique de l'exposition chronique à ce nouvel environnement; adaptation; épigénétique
- Comprendre les mécanismes moléculaires d'actions des radionucléides pour inférer les différences taxonomiques de radiosensibilité
- L'IRSN en collaboration avec diverses équipes a mis en place différentes études comparées -études en milieu contrôlé - ZEC - Ecosystèmes dans la zone des 100 km de Fukushima-

Actions en cours dans la zone d'exclusion à Tchernobyl

- Etude de la diversité des communautés de nématodes en lien avec le niveau d'exposition

Catherine Lecomte-Pradines

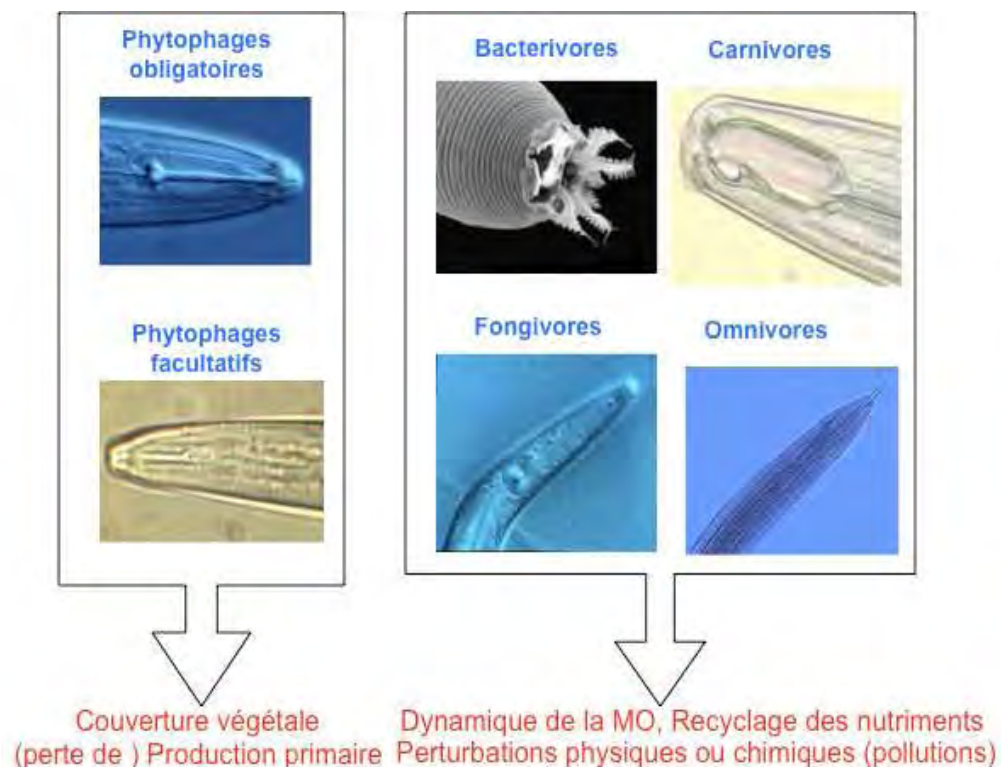
- Etude du taux de décomposition des litières de sol

Jean-Marc Bonzom



Choix de la nématofaune comme bio-indicateur de l'état écologique des sols

- Abondants
- Ubiquistes
- Grande diversité taxonomique



- Micro-régulateurs dans la dynamique des éléments nutritifs du sol
- Sensibles aux perturbations physico-chimiques du milieu



12 cores/sites – 10 cm de profondeur



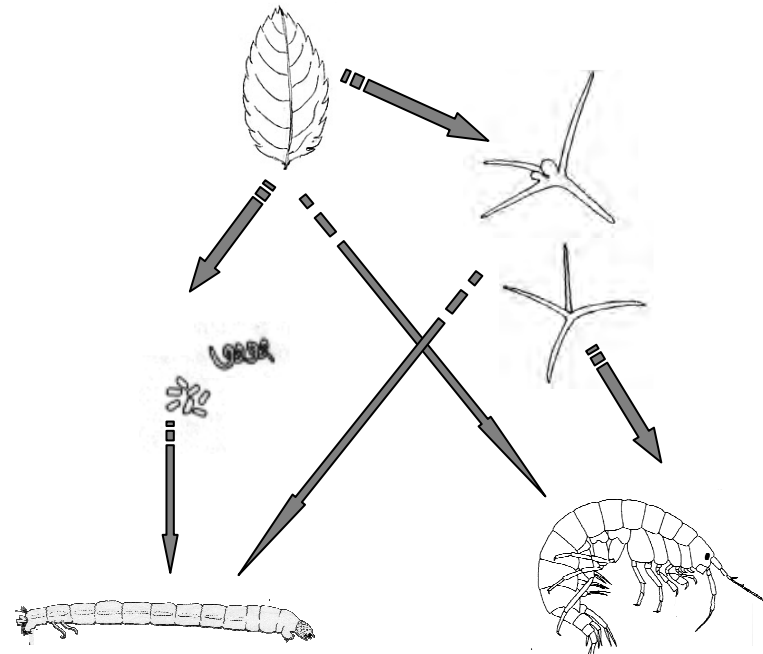
Extraction des nématodes (48h)



Dénombrement et identification (ISO 23611-4)

Décomposition des litières

- La décomposition des litières issues de la végétation forestière et riparienne joue un rôle majeur dans les cycles du carbone et des nutriments -> importance pour les réseaux trophiques et la biogéochimie de ces écosystèmes





Echantillonnage des sols

- Sites forestiers
- Qualités de végétation et de sol semblables

► 5 sites témoin

< 0.3 $\mu\text{Sv/h}$

► 15 sites contaminés

0.37 – 75 $\mu\text{Sv/h}$

► Transect (3 rep/dose)

0.5 $\mu\text{Sv/h}$

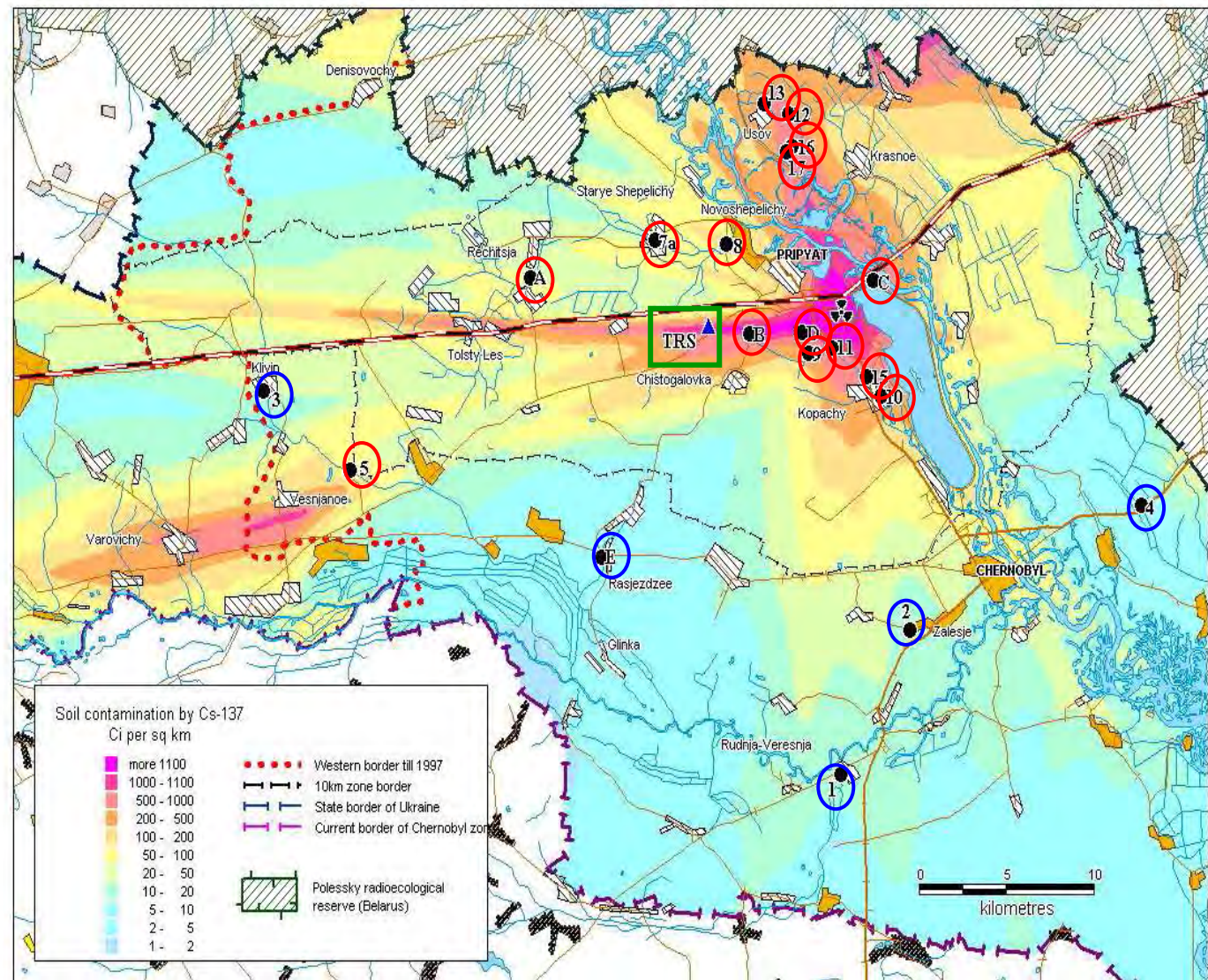
1 $\mu\text{Sv/h}$

2 $\mu\text{Sv/h}$

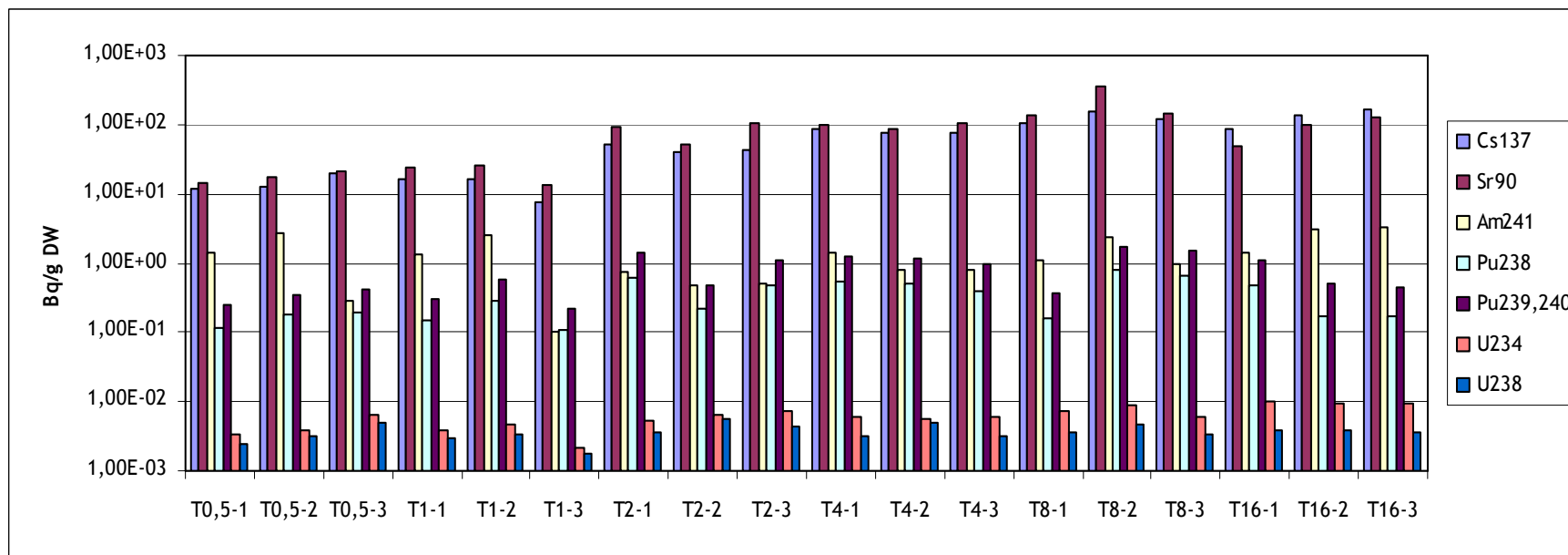
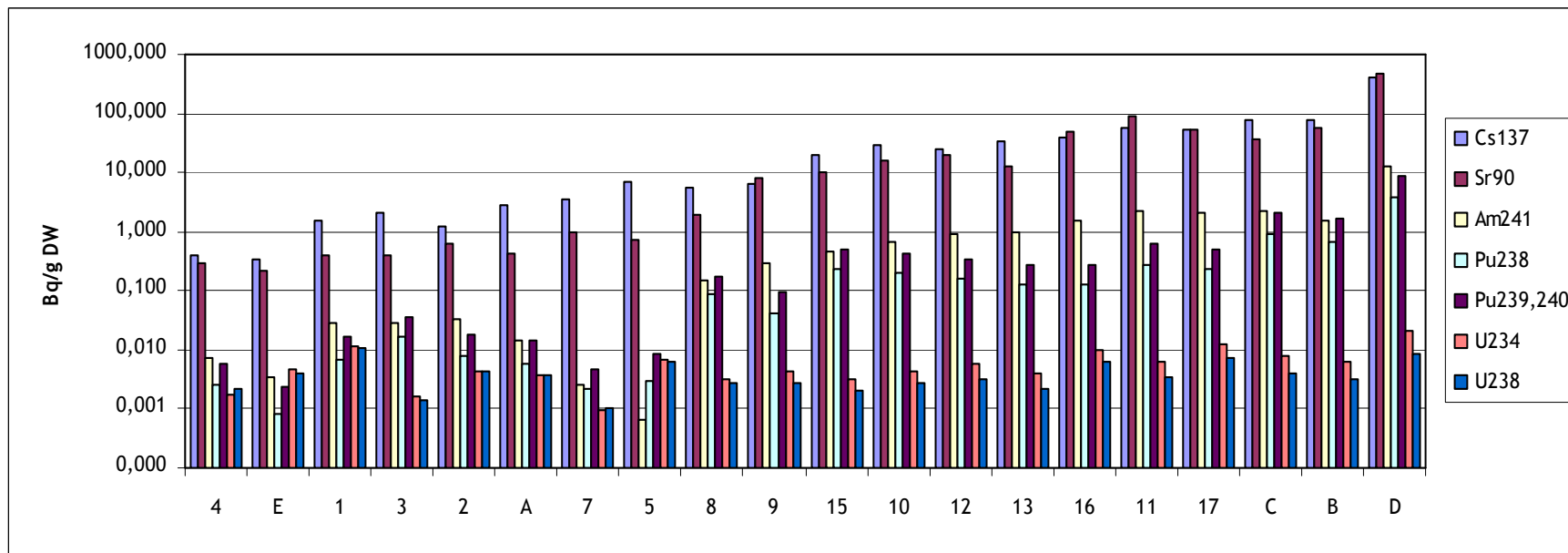
4 $\mu\text{Sv/h}$

8 $\mu\text{Sv/h}$

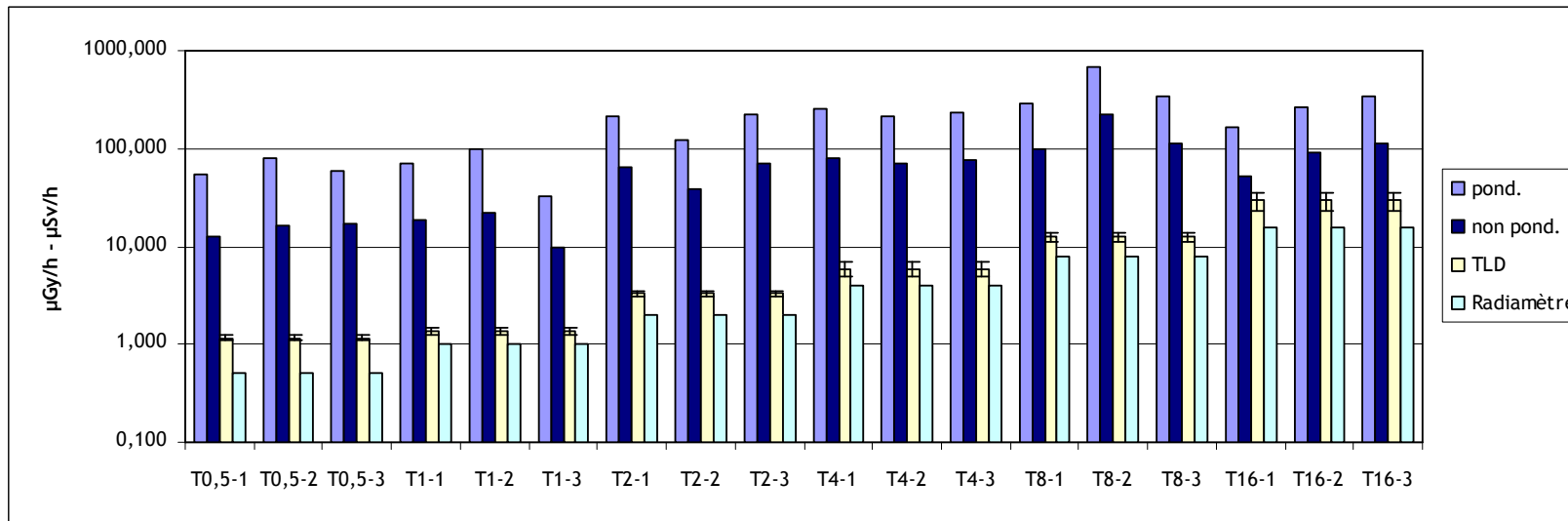
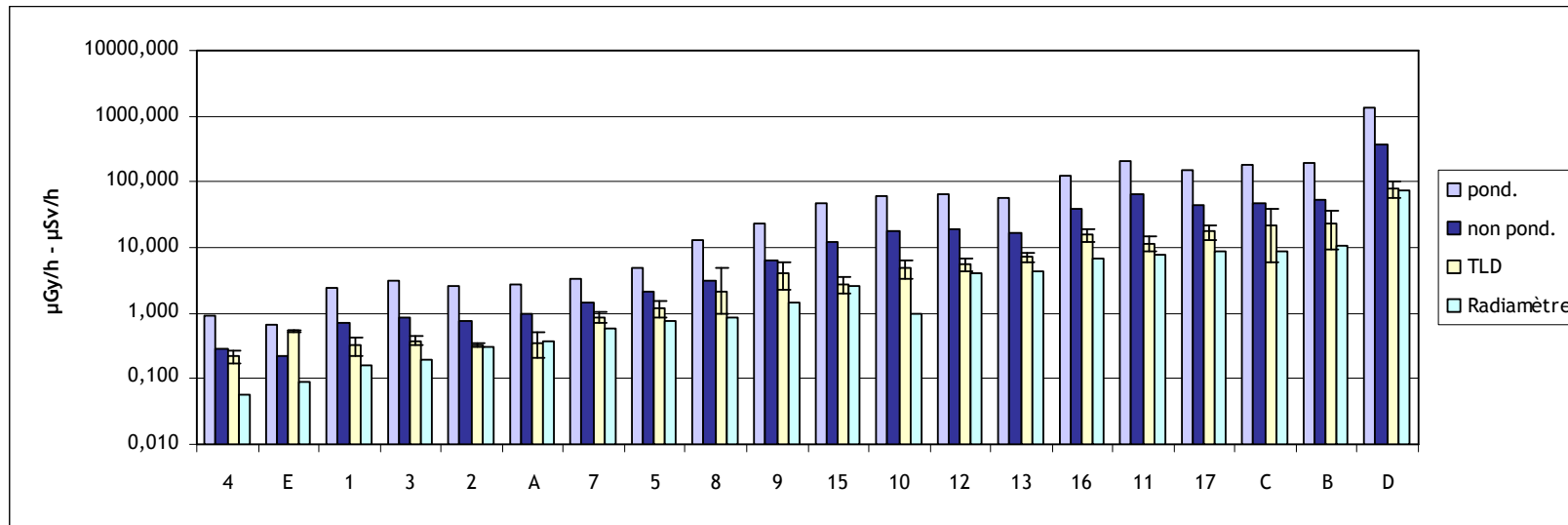
16 $\mu\text{Sv/h}$



Caractérisation radiologique des sols



Estimation de la dose absorbée par les organismes



Conclusions sur la diversité de la nématofaune

- Densité classique et faible diversité des nématodes indépendamment du niveau de contamination
 - Conditions environnementales inadaptées aux espèces fragiles
 - Disparition des espèces fragiles lors du pic de contamination
 - Adaptation à la contamination



Echantillonnage de sites
témoins hors de la zone
d'exclusion

Projet FREEBIRD - Fukushima Radiation Exposure and Effects in BIRD populations



AAP Flash Japon AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR

Originalité du projet : approche intégrative basée sur des théories d'écologie comportementale et d'écophysiologie, associées à des mesures de dosimétrie robustes

- En écologie comportementale, les processus de “décision” des animaux sont basés sur des signaux*

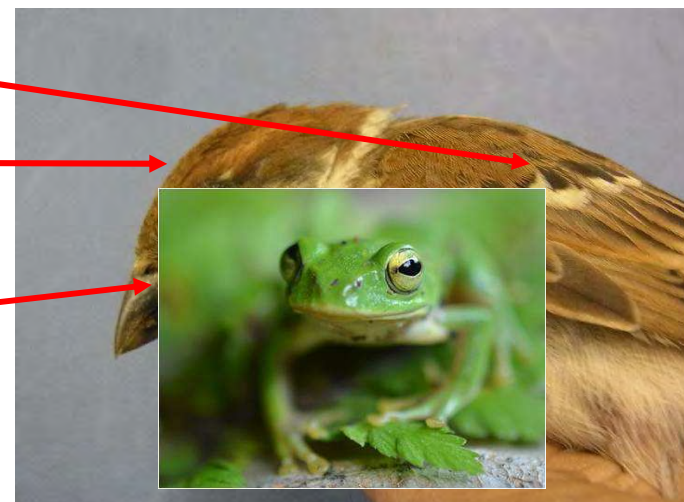
*Signal: trait phénotypique qui informe sur la qualité du ‘porteur’

- Il existe ≠ types de signaux utilisés, parmi lesquels les plus utilisés sont les signaux visuels (i.e. traits colorés) d'origine pigmentaire

Il existe 2 principaux types de pigments en nature:

- le plus couramment chez les oiseaux...
- ...mais aussi chez les amphibiens

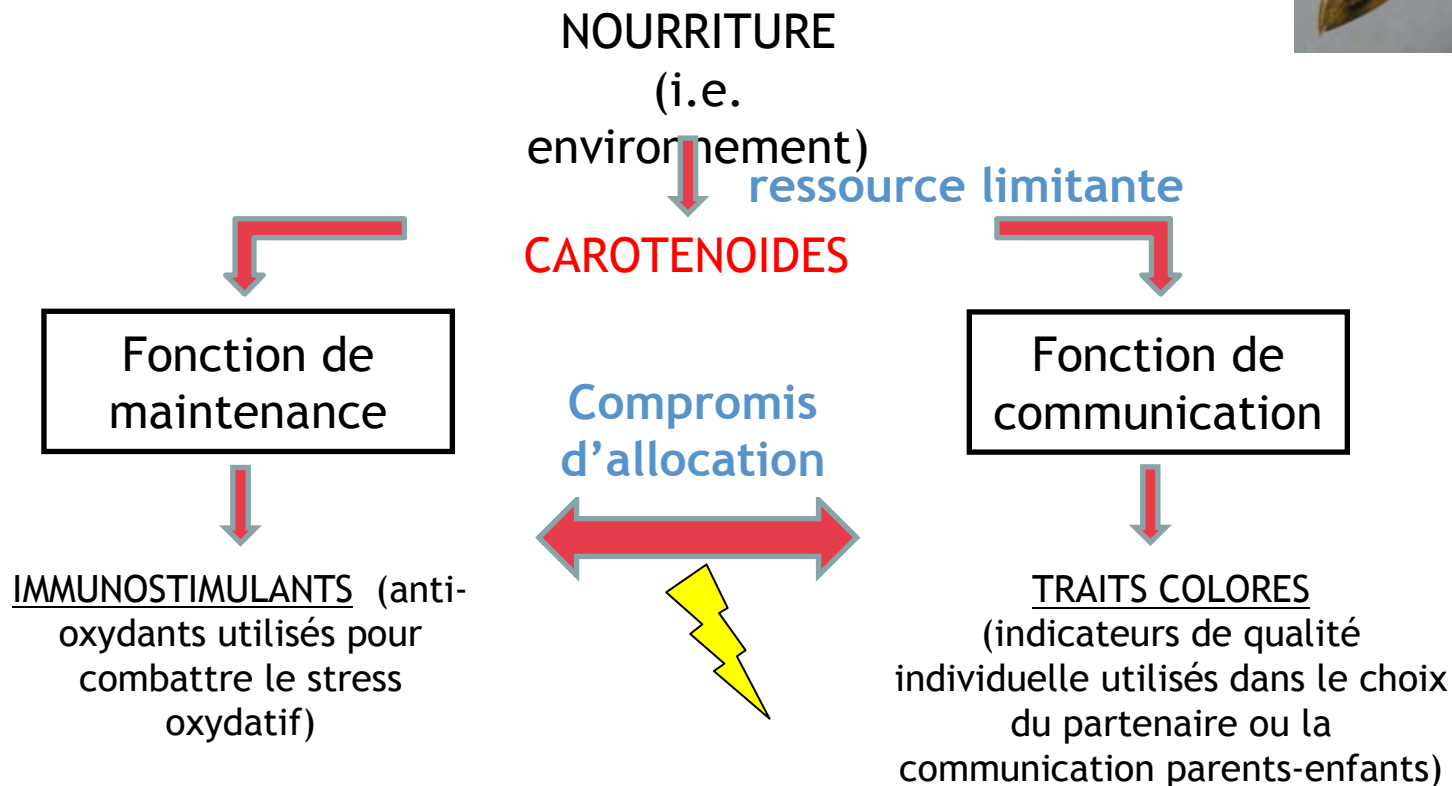
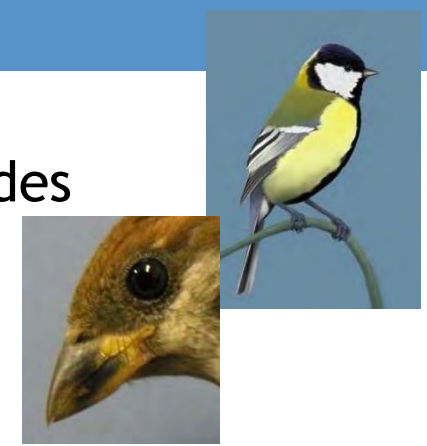
- Mélanine
 - eu-mélanine (gris à noir)
 - Phéo-mélanine (beige, roux à brun)
- Caroténoïdes (jaune à rouge)



Pigments caroténoïdes

Caractéristiques et propriétés des pigments caroténoïdes

- ↻ non synthétisables par les vertébrés
- ↻ utilisés dans différentes fonctions physiologiques



Les traits colorés par des pigments caroténoïdes peuvent donc révéler la qualité & l'état de santé général des individus

Les objectifs du projet FREEBIRD

- Acquérir un jeu de données sur des organismes dans leur milieu naturel peu de temps après l'accident (manquant à Tchernobyl)
- Définir des paramètres critiques pouvant fournir une indication de la réponse des organismes à leur environnement
- Définir des seuils de protection
- Identifier les mécanismes physiologiques clefs

Modèles d'étude

Les passereaux... et une espèce de grenouille

- ▮ présentent couramment des traits colorés (i.e. à base de caroténoïdes et/ou de mélanine)
- ▮ faciles à capturer (!) et à manipuler
- ▮ communs et distribués le long d'un gradient de contamination
- ▮ beaucoup étudiés à Tchernobyl → **jamais étudiée!!**

↪ 3 espèces sélectionnées

+ 1 espèce sélectionnée



Moineau commun
(*Passer montanus*)



Mésange variée



Mésange charbonnière
(*Parus major*)



Rainette du Japon
(*Hyla japonica*)

Méthodes de captures

Deux méthodes de capture différentes... pour des objectifs différents

Capture au filet japonais

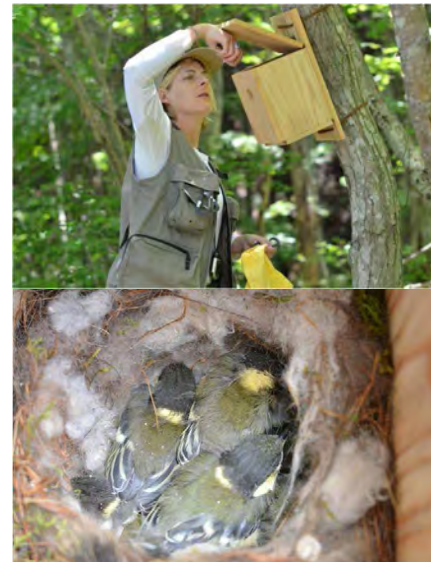
- PHYSIOLOGIE
- EXPRESSION PHENOTYPIQUE



Moineau commun

Nichoirs en forêt

- PHYSIOLOGIE
- EXPRESSION PHENOTYPIQUE
- REPRODUCTION



Mésange charbonnière
(Parus major)

Sites d'étude

▮ Gradient de contamination de dose

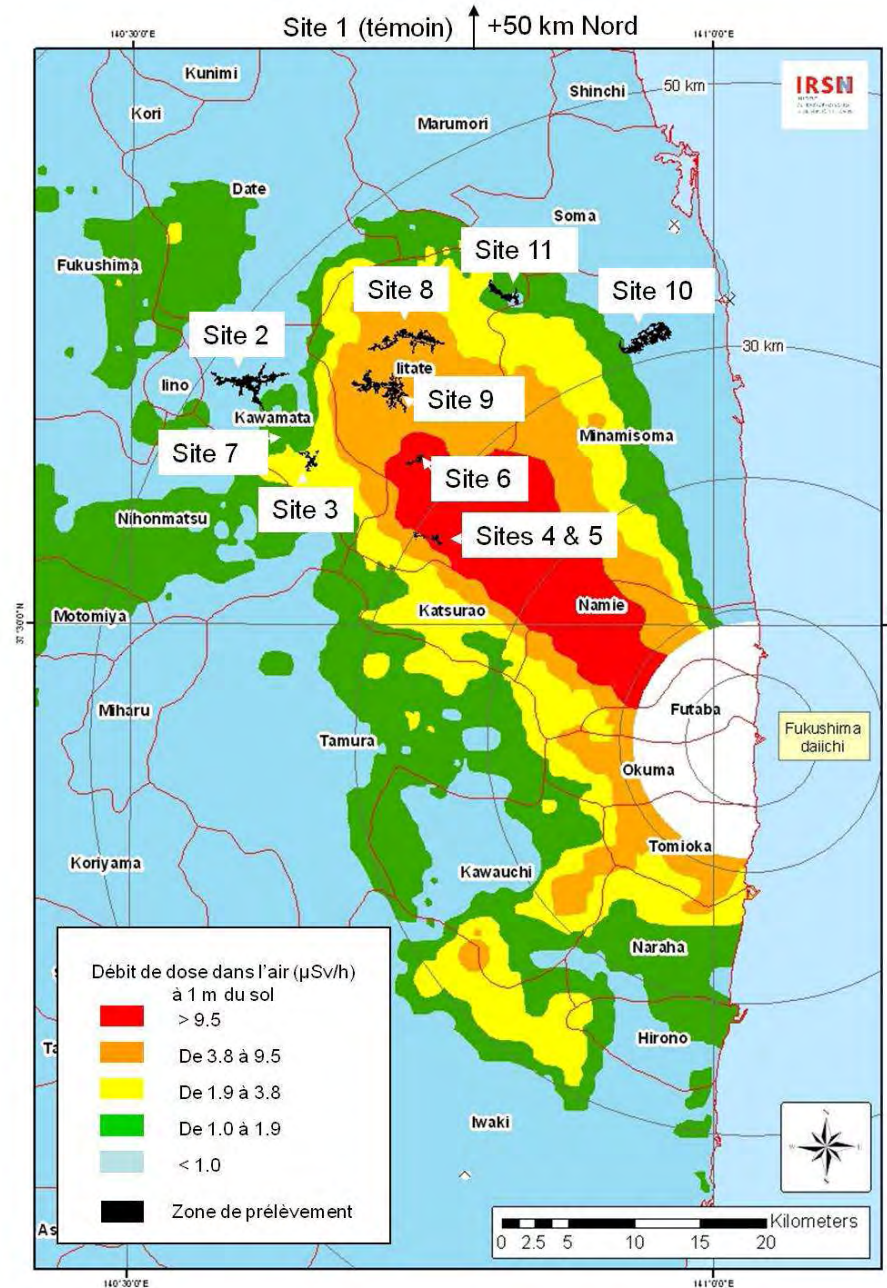
➔ Janvier 2012

↻ 12 sites "tests"

➔ Juin 2012

↻ Sites en milieu urbain (moineaux)
- de 3 à 7 $\mu\text{Sv/h}$

↻ Sites en milieu forestier (mésanges)
- de 4 à 30 $\mu\text{Sv/h}$



Caractérisation dosimétrique des sites

Dosimétrie: irradiation externe

→ Couplage de mesures dosimétriques **passives** & **actives**



↪ dosimètres (RPL)

- sur 12 sites "tests"
- tps intégration = 6 mois
- 3 hauteurs ≠ (10 cm / 1m / 2m)



↪ mesures avec radiamètres

- sur 12 sites "tests"
- tps intégration = débit de dose tps réel
- 3 hauteurs ≠ (10 cm / 1m / 2m)

→ Mesures identiques pour les sites sélectionnés en Juin 2012

Caractérisation dosimétrique individuelle

Dosimétrie: contamination individuelle interne



➔ Méthodologie



Paramètres biologiques clés

Paramètres physiologiques

→ Méthodologie

↻ À partir d'une prise de sang

↻ et de plumes

centrifugation

Globules rouges (45%)

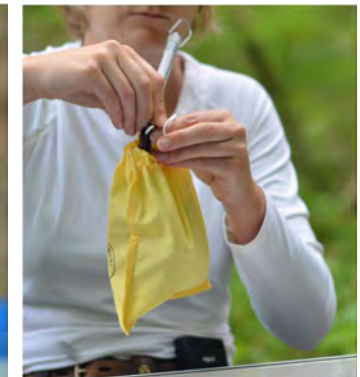
Plasma (55%)



Paramètres biologiques clés

- | Coloration (caroténoïdes)
- | Système immunitaire
- | Statut anti-oxydant
- | Hormones
- | Génotoxicité, méthylation de l'ADN
- | Biométrie
- | Reproduction

Analyses en cours...



Conclusions et perspectives

- Des données existantes sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl, mais disparates et controversées
- Lancement de programmes à l'IRSN pour combler ces lacunes, en utilisant des critères d'effets sensibles et une dosimétrie robuste
- Etudes démarrées à Fukushima peu après l'accident pour améliorer la compréhension des effets

Merci de votre attention !



Photo by Jean-Marc Bonzom, IRSN