

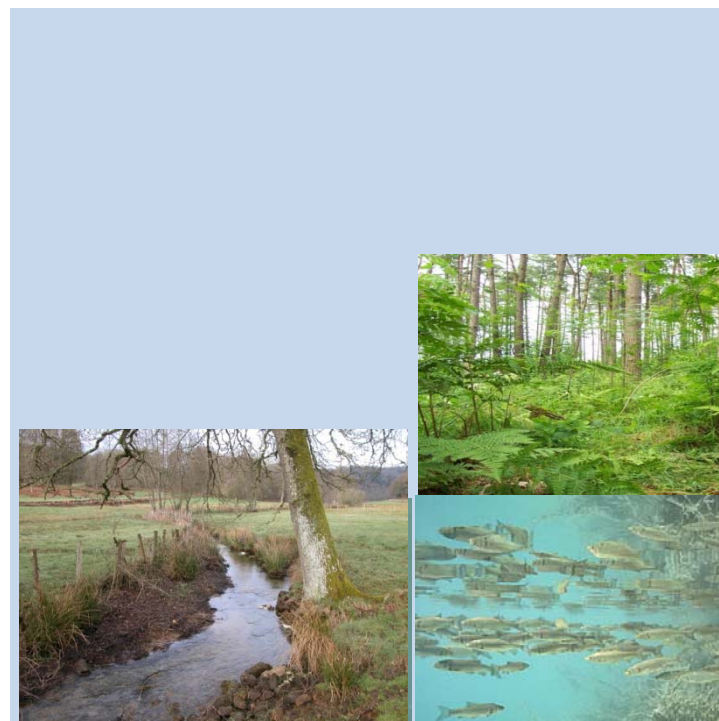
IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

“Protection de l’environnement : le cas des sites miniers uranifères”

jacqueline.garnier-laplace@irsn.fr

“Les enjeux de la filière uranifère au Québec”

Séance du 22 septembre 2014



Sommaire

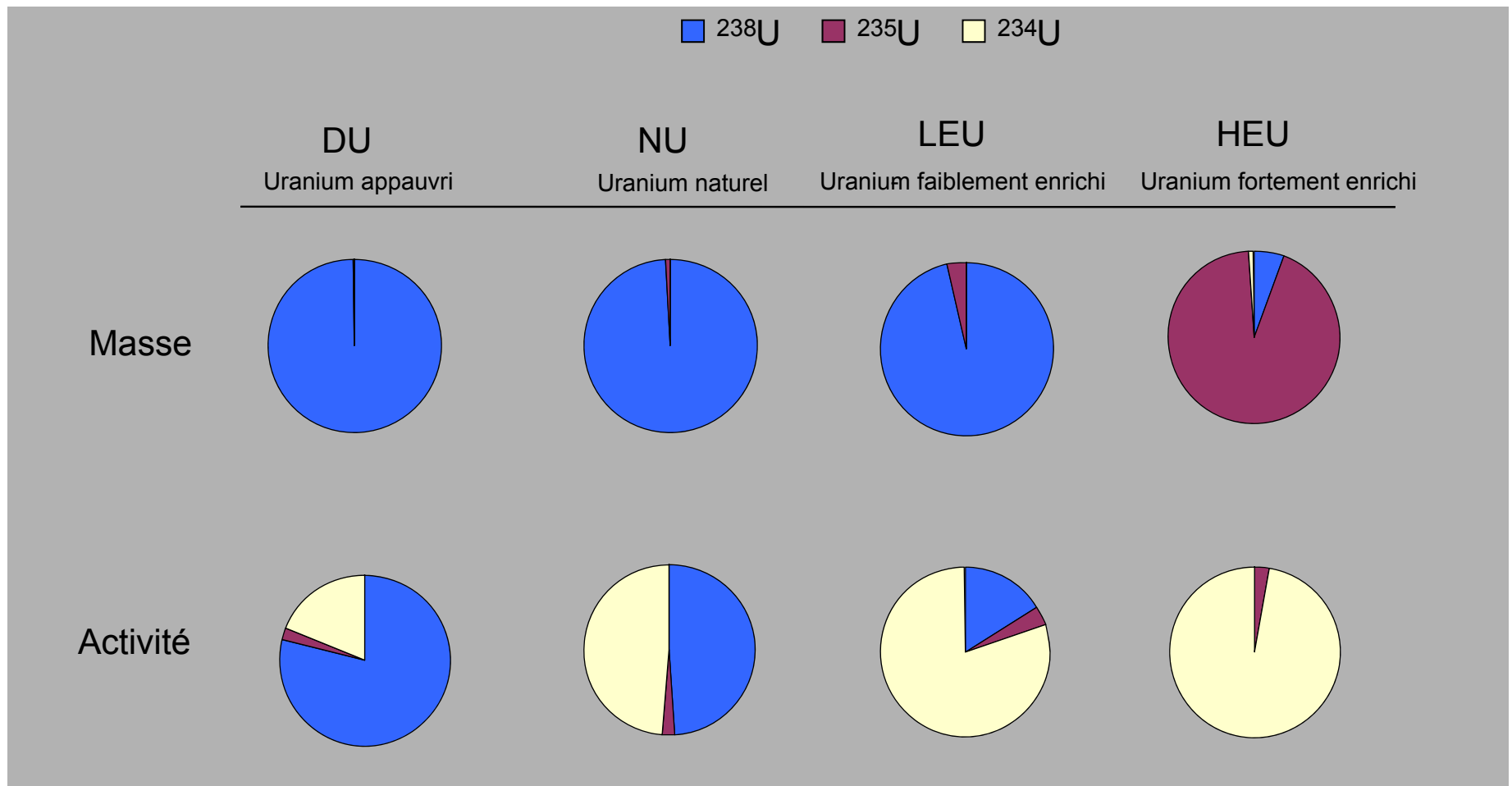
- 1) **Les spécificités de l'uranium à prendre en compte dans l'évaluation du risque écologique: un stressor chimique et radiologique**
- 2) La protection de l'environnement: Quelles justifications pour le volet dédié à la radioprotection?
- 3) L'approche de la CIPR pour la radioprotection de l'environnement : Quelle est-elle? Comment la mettre en œuvre?
- 4) L'évaluation du risque chimique et la prise en compte de la biodisponibilité
- 5) Le retour d'expériences du GEP Mines en France (évaluation du risque écologique appliquée à la gestion des anciens sites miniers uranifères français)

L'uranium...

- Un radioélément d'origine naturelle...mais dont la concentration dans les milieux peut être modifiée par les pratiques anthropiques et conduire à modifier les conditions d'exposition de la flore et de la faune sauvages
- Cette exposition concerne:
 - L'uranium en tant qu'élément chimique, présentant une chimiotoxicité potentielle
 - L'uranium en tant que radioélément mettant en œuvre deux familles (celle de U-238 et celle de U-235, 25 RNs) en équilibre (ou non) avec les descendants: l'ensemble présentant une radiotoxicité potentielle
- Protection de l'environnement & sites miniers uranifères : prise en compte de ces deux aspects pour l'uranium (et d'un contexte de stressseurs multiples)

L'uranium...

- En fonction de l'origine industrielle de l'uranium présent dans l'environnement (Unaturel, appauvri, enrichi), pour une même concentration pondérale, le risque chimique reste identique et le risque radiologique varie.



Sommaire

- 1) Les spécificités de l'uranium à prendre en compte dans l'évaluation du risque écologique: un stressor chimique et radiologique
- 2) **La protection de l'environnement: Quelles justifications pour le volet dédié à la radioprotection?**
- 3) L'approche de la CIPR pour la radioprotection de l'environnement : Quelle est-elle? Comment la mettre en œuvre?
- 4) L'évaluation du risque chimique et la prise en compte de la biodisponibilité
- 5) Le retour d'expériences du GEP Mines en France (évaluation du risque écologique appliquée à la gestion des anciens sites miniers uranifères français)

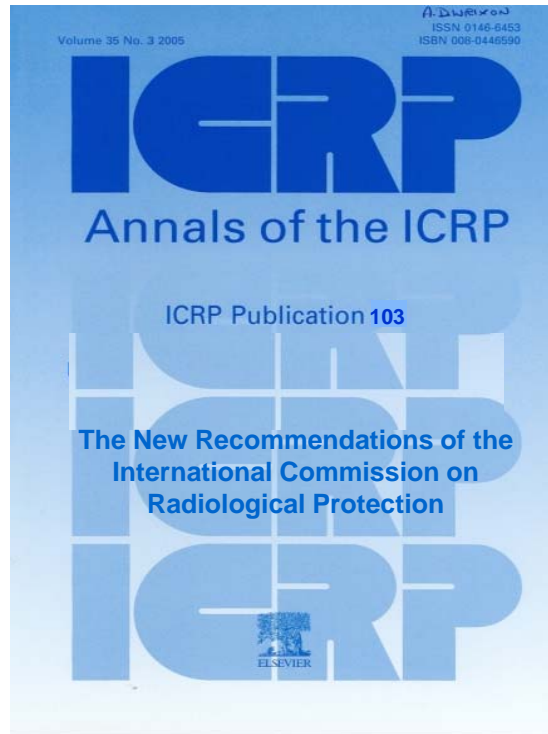
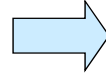
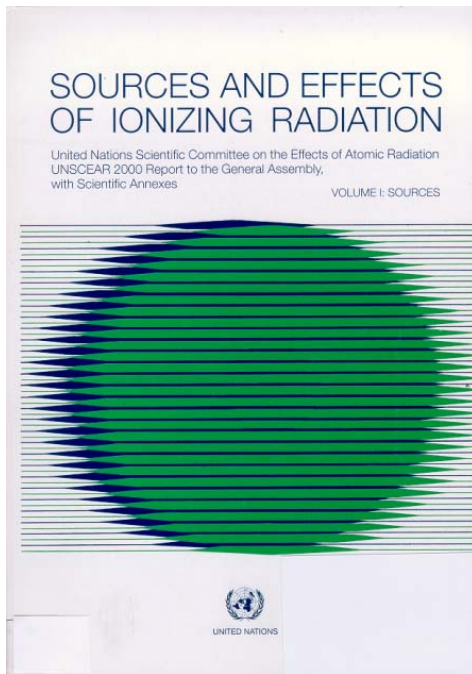
Radioprotection de l'environnement: Les principales justifications de son développement

- Initialement, prise en compte de manière implicite ("Qui protège l'homme protège l'environnement" - CIPR 60, 1991) // divergence de l'approche pour les substances chimiques
- Depuis les années 2000, nécessité de disposer d'une évaluation globale de la protection et des dommages le cas échéant, des ressources naturelles, quel que soit le(s) stresser(s) considéré(s): protection de l'environnement intégrée
- Législation en croissance pour la protection de la biodiversité et des habitats naturels, notamment au niveau européen avec notamment les directives cadres (e.g., DCE, DCSMM- atteinte bon état écologique 2015 et 2020 respectivement) et le réseau d'espaces naturels à protéger (e.g., zones Natura 2000)
- Seules certaines de ces législations traitent explicitement des substances radioactives

Radioprotection de l'environnement: Les principales justifications de son développement

- Manque d'harmonisation entre les modes de gestion de la radioprotection de l'environnement et ceux préconisés pour la protection de l'environnement au sens large pour laquelle diverses réglementations existent.
- Nécessité de disposer d'une méthode pour démontrer explicitement que l'environnement est protégé des effets délétères liés à la présence et/ou aux rejets de substances: la méthode adoptée est l'évaluation du risque environnemental pour les radionucléides (RNs), à l'instar de ce qui existe pour les substances chimiques.
- Emergence de l'approche pour la radioprotection de l'environnement avec deux objectifs:
 - cohérente avec, et donc conforme aux demandes réglementaires déployées aux niveaux national voire régional
 - cohérente pour toutes les industries; cohérente avec ce qui existe pour le contrôle de la pollution et la réduction des émissions de substances à la source
- Selon les recommandations internationales, cette démonstration s'intègre au sein de l'évaluation d'impact environnemental d'un projet (directs, indirects, temporaires et permanents) - niveau de pollution de l'air, du sol et de l'eau, habitat, faune et flore, climat

Le cadre à la base du formalisme de la radioprotection de l'environnement



IAEA Safety Standards

for protecting people and the environment

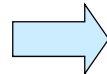
Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards

INTERIM EDITION

General Safety Requirements Part 3
No. GSR Part 3 (Interim)



UNSCER, 2008. Vol. II. Sources of ionizing radiation United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexe E. United Nations, New-York, 2011. (update of the 1996 review)



ICRP Publication 60, 1991

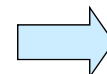
ICRP Publication 91, 2003

ICRP Publication 103, 2007

ICRP Publication 108, 2008

ICRP Publication 114, 2009

ICRP Publication 124, 2014



IAEA 2011. International BSS, remplace BSS 1996, intègre ICRP 103

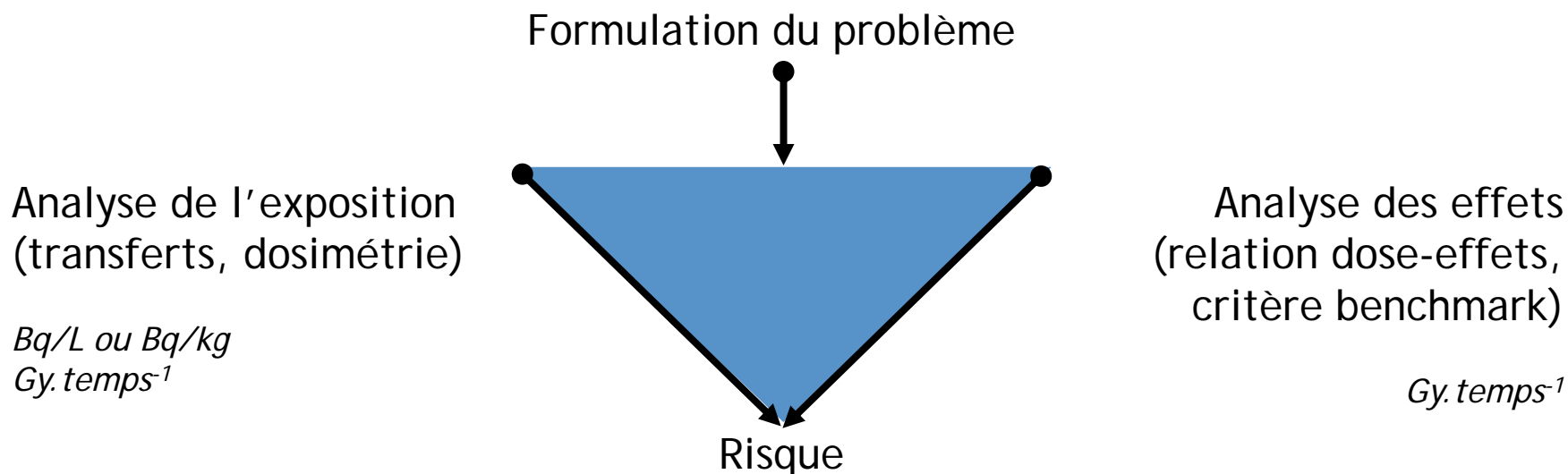
Sommaire

- 1) Les spécificités de l'uranium à prendre en compte dans l'évaluation du risque écologique: un stresser chimique et radiologique
- 2) La protection de l'environnement: Quelles justifications pour le volet dédié à la radioprotection?
- 3) **L'approche de la CIPR pour la radioprotection de l'environnement : Quelle est-elle? Comment la mettre en œuvre?**
- 4) L'évaluation du risque chimique et la prise en compte de la biodisponibilité
- 5) Le retour d'expériences du GEP Mines en France (évaluation du risque écologique appliquée à la gestion des anciens sites miniers uranifères français)

La CIPR et le comité 5

*“C5 is concerned with radiological protection of the environment. It will aim to ensure that the development and application of **approaches to environmental protection are compatible with those for radiological protection of man**, and with those for protection of the environment from other hazards”*

- Définition du Risque écologique (**sanitaire**): incidence et sévérité des dommages (effets sur la santé) susceptibles d'apparaître dans l'écosystème (**membres du public**) suite à l'exposition (irradiation, contamination) réelle ou prévue aux substances radioactives avec évaluation des incertitudes



Evaluation de l'impact dosimétrique aux espèces sauvages

Homme

Environnement

Habitudes alimentaires
et comportement
(budget temps)

Terme-source en RN

Voies d'exposition

Cycle de vie et
relations à l'habitat

Plantes et animaux de référence

<->

Organismes représentatifs

Facteur de pondération –
types de rayonnement et
sensibilités tissulaires

Application d'un
facteur de
pondération par type
de rayonnement

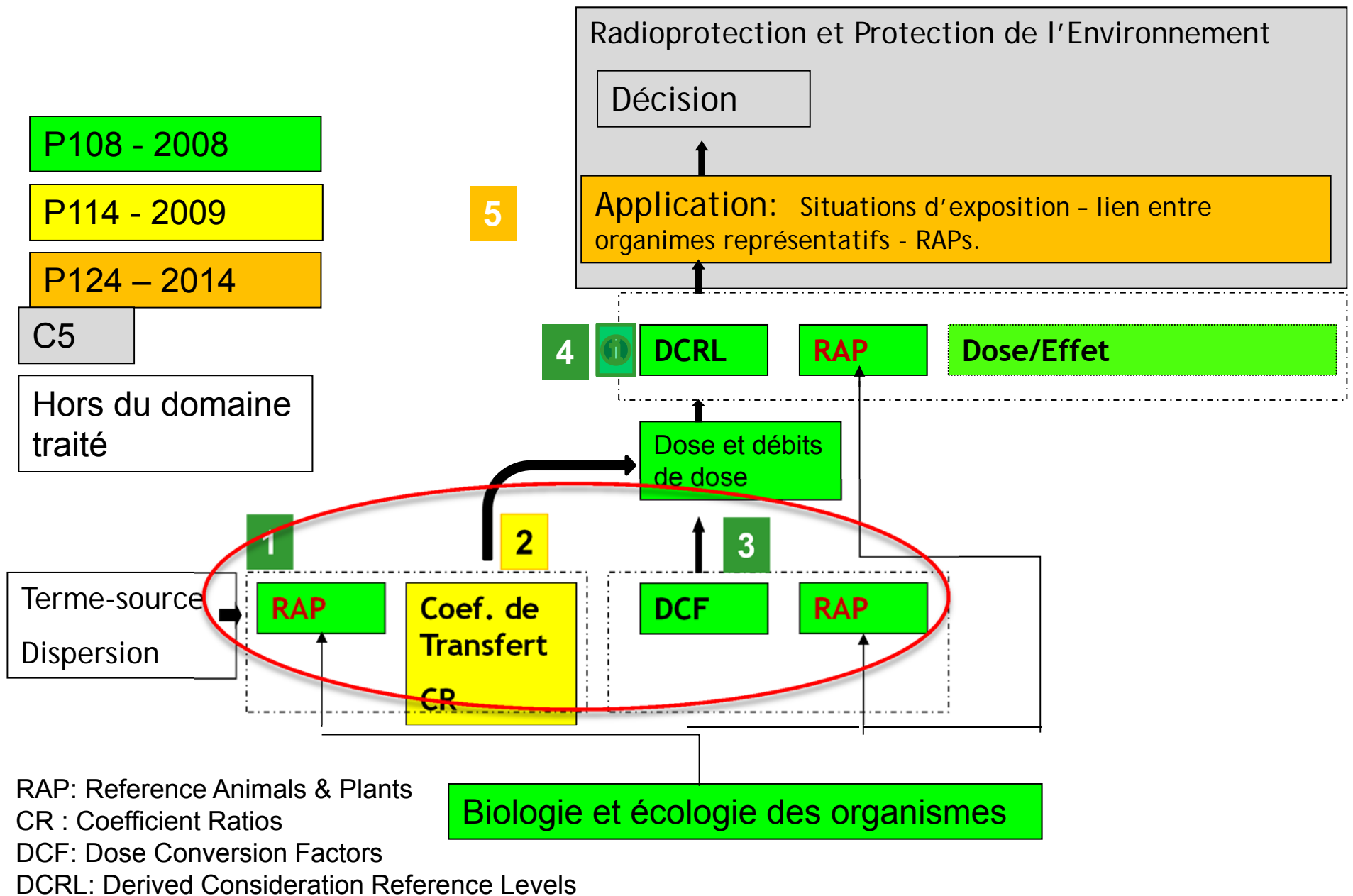
Débit de dose
et/ou Dose totale
absorbée

Comparaison de la dose
prédite et de la dose limite

Comparaison de la dose
prédite à des valeurs guides
pour interpréter les effets
écologiques

IMPACT

L'approche CIPR : articulation des 3 principales publications



Entités hypothétiques servant de points de référence

- Principes et objet similaires à la personne de référence
- Définis sur les plans anatomiques, physiologiques et par ses traits d'histoires de vie
- Modèles conceptuels permettant d'examiner la dosimétrie pour les différents stades du cycle de vies et pour des espèces constratées (en exposition, en géométries...)
- Permet ensuite de relier dose et effets et effets/consequences pour diverses espèces et leur stade de vie

Un premier cadre pour collecter les données d'effets et construire une feuille de route afin de prioriser les actions de R&D pour combler les lacunes

MAIS les RAPs ne sont pas nécessairement les objets de la protection. Les cibles à protéger sont:

- La biodiversité, les espèces, l'état écologique des habitats naturels, les communautés, les écosystèmes
- Toutes les cibles de protection sont reliées aux organismes vivants et aux populations ou à des niveaux d'organisation supérieurs, plus rarement aux individus (sauf cas des espèces en danger)

D'où le concept d'organismes représentatifs introduit plus tard (Pub124)

Les RAPs: qui sont-ils?

1

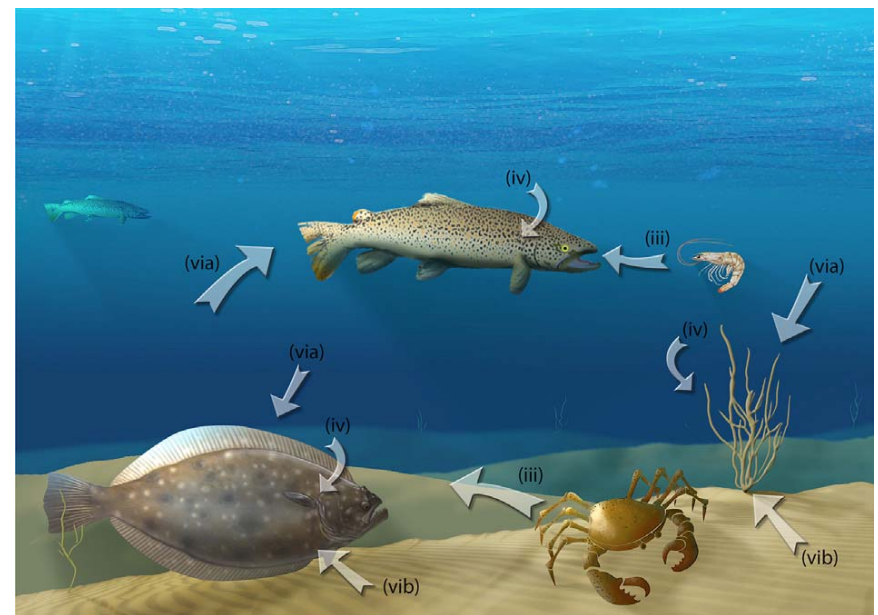
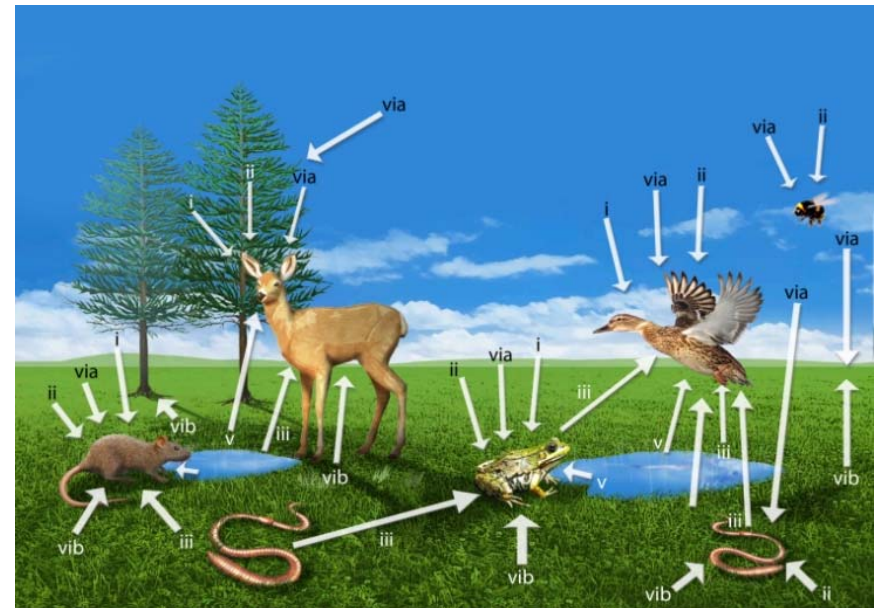
Terrestres	Eaux douces	Eaux Marines
Pin <i>pinacae</i>	grenouille (adulte, oeuf, têtard) <i>ranidae</i>	Poisson plat (adulte, oeuf) <i>pleuronectidae</i>
Abeille (adulte, colonie) <i>apidae</i>	Truite (adulte, oeuf) <i>salmonidae</i>	Crabe (adulte, oeuf, larve) <i>cancriidae</i>
Ver de terre (oeuf, adulte) <i>lumbricidae</i>	Canard (adulte, oeuf) <i>anatidae</i>	Algue brune <i>cyclosporeae</i>
Herbe (meristème, grass spike) <i>poaceae</i>		
Cerf (jeune, adulte) <i>cervidae</i>		
Rat <i>muridae</i>		

La CIPR 108 balaie leurs caractéristiques biologiques et écologiques (répartition, taxonomie, cycle de vie, stratégie reproductive, physiologie....) et rassemblent les données d'effets biologiques des rayonnements ionisants

Au nombre de 12, définis au niveau de la *famille*

[règne](#) → [embranchement](#) → [classe](#) → [ordre](#) → [famille](#) → [genre](#) → [espèce](#)

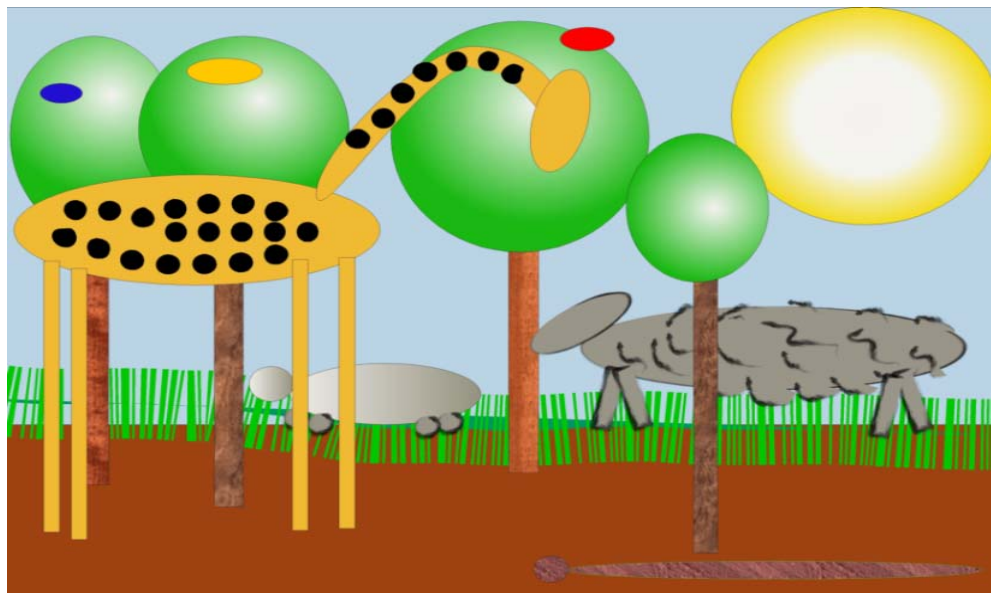
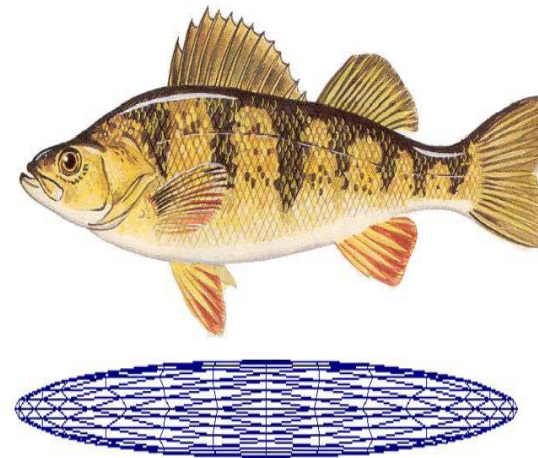
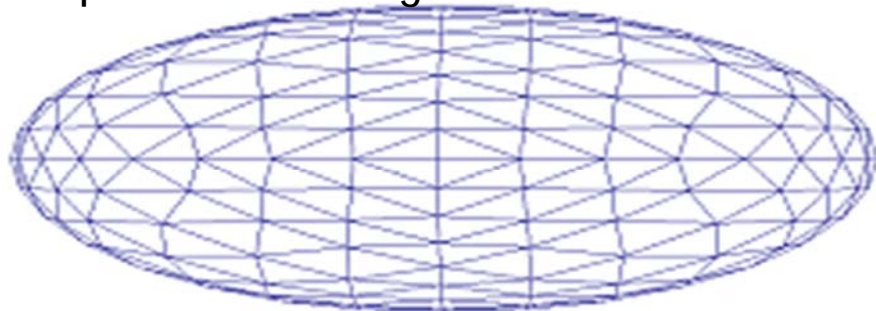
- La publication 114 présente les facteurs de concentration (Concentration Ratios) pour 39 éléments et 12 RAPs, avec leurs statistiques associées;
- Basés sur des données de laboratoire ou de terrain;
- Implementation d'une approche d'extrapolation à base phylogénique pour générer les données manquantes (surrogate data);
- Prise en compte du cycle de vie et de l'habitat
- Discussion sur la robustesse des données proposées



Les RAPs: comment sont-ils représentés?

3

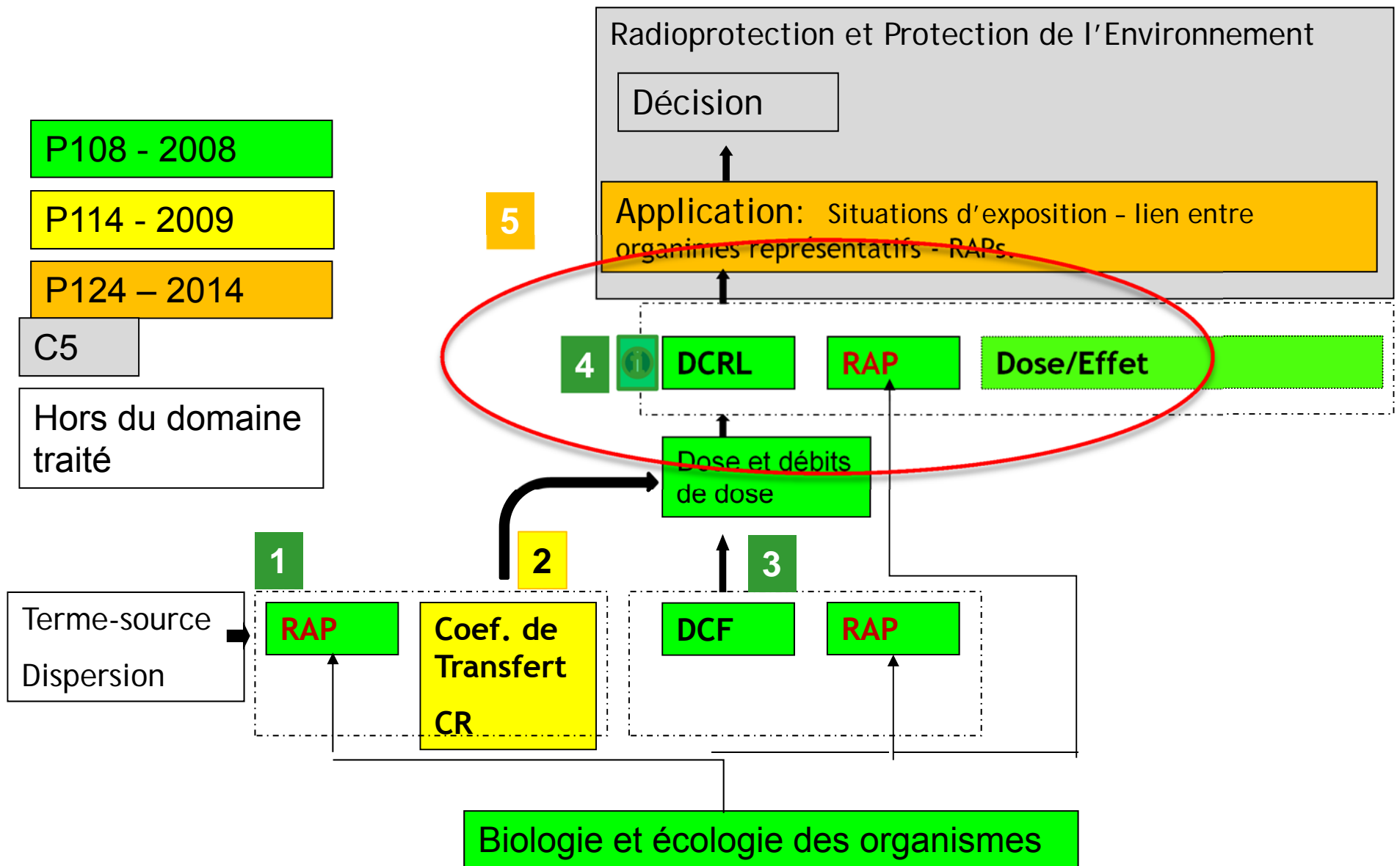
Les coefficients de Conversion de dose (DCF) sont calculés pour des géométries simples, sous l'hypothèse d'une répartition homogène



DCF interne en $(\mu\text{Gy}/\text{j})/(\text{Bq}/\text{kg})$

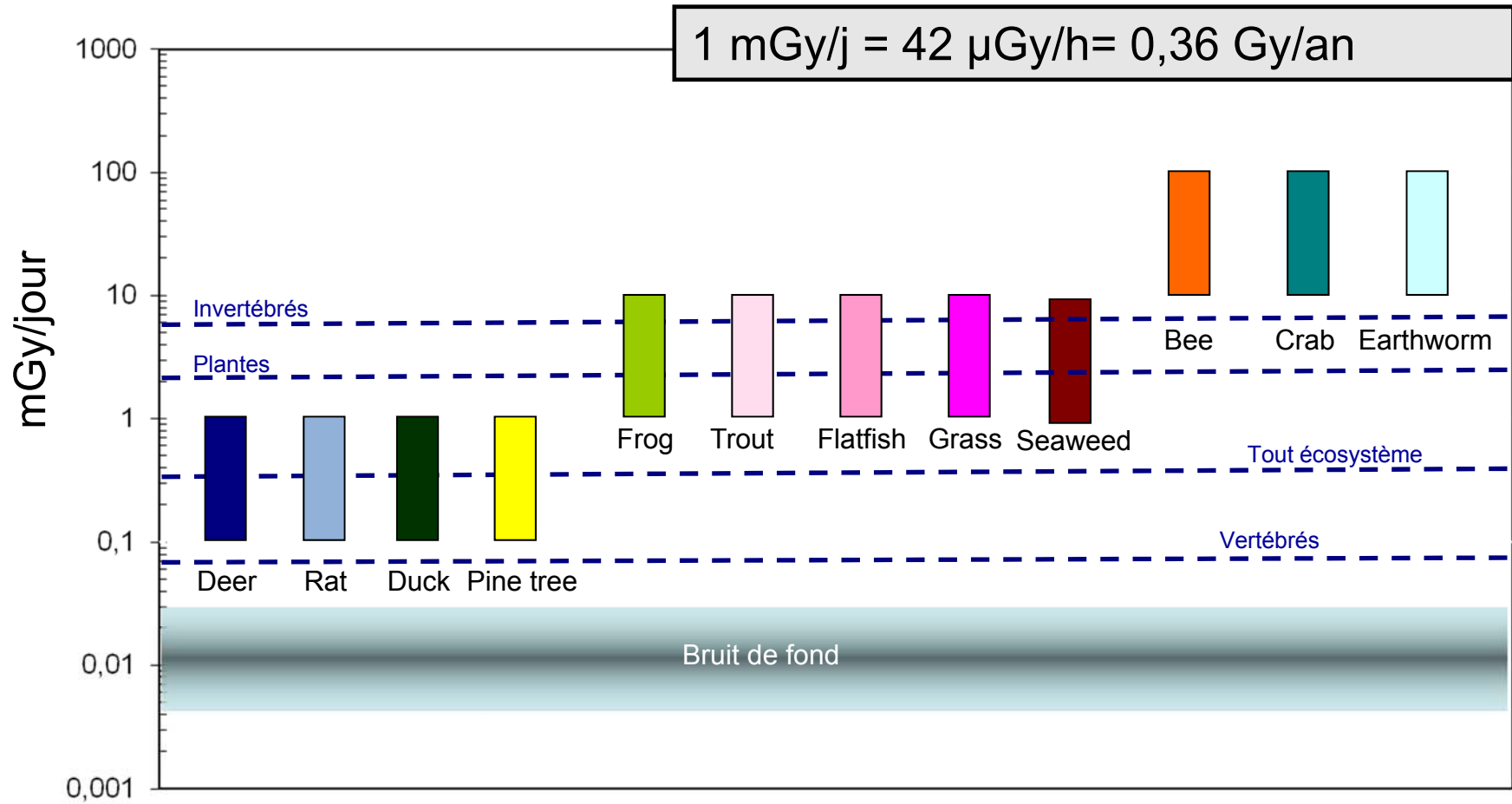
DCF externe en $(\mu\text{Gy}/\text{j})/(\text{Bq}/\text{volume ou surface})$

L'approche CIPR : articulation des 3 principales publications



- Basée sur le concept du DCRL ou "Derived Consideration Reference Levels": gamme de débits de dose couvrant un ordre de grandeur au sein de laquelle des effets délétères sont susceptibles d'apparaître pour les individus du même type que le RAP
- La CIPR suggère de les utiliser comme "points de référence"

*"A band of dose rate within which there is **likely to be some chance of deleterious effects** of ionising radiation occurring to individuals of that type of RAP (derived from a knowledge of expected biological effects for that type of organism) that, when considered together with other relevant information, can be used as a point of reference to optimise the level of effort expended on environmental protection, dependent upon the overall management objectives and the relevant exposure situation."*

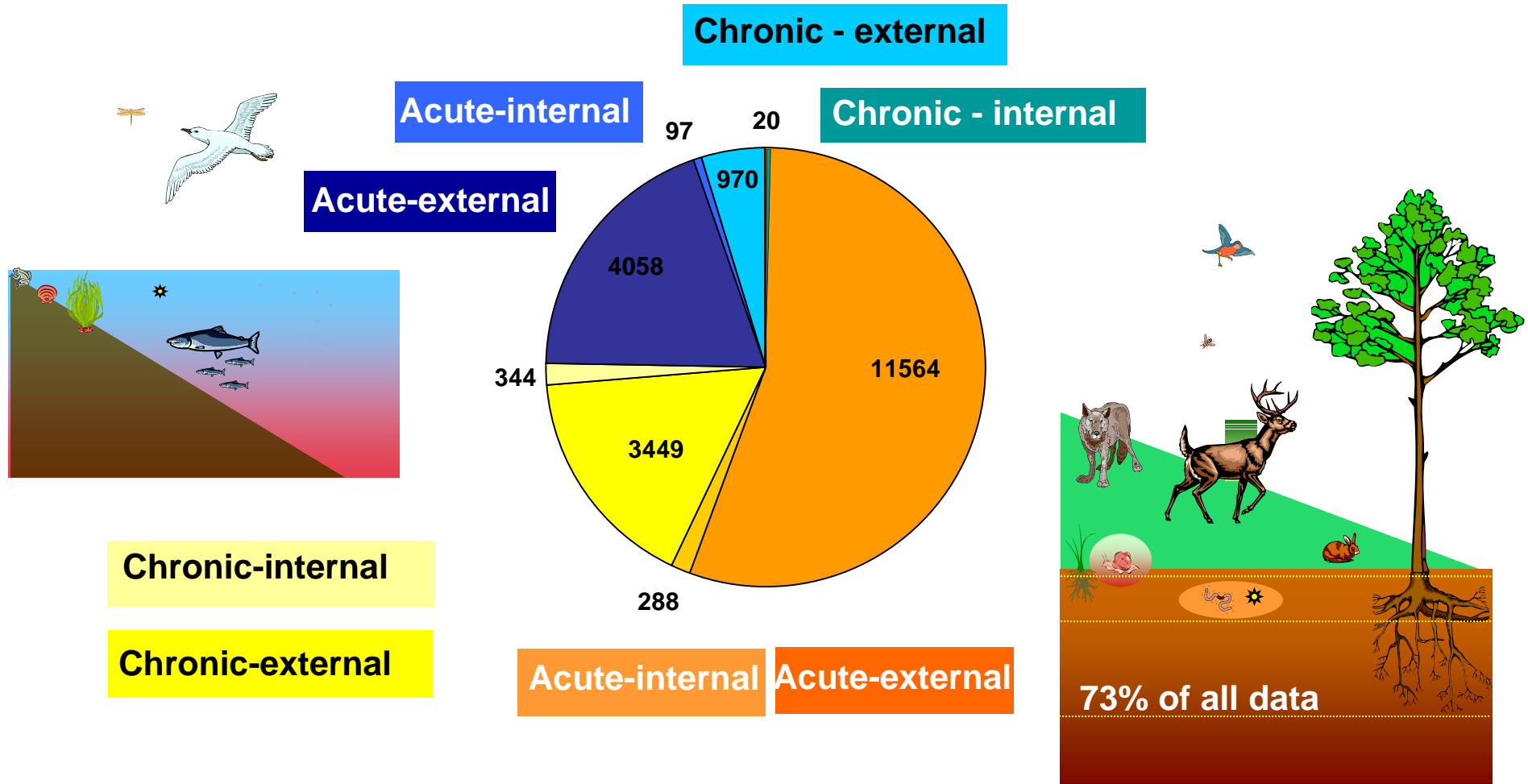


Benchmarks issus d'autres études (Valeur guide en deça desquelles il n'y a pas d'effet pour 95% des espèces)

- Les données d'effets sont compilées dans la base de données FREDERICA
- Les effets rapportés concernent principalement la mortalité, morbidité, succès reproducteur (fertilité, fécondité), et la génotoxicité au niveau des individus; ces effets ont principalement été observés en conditions contrôlées sur diverses espèces réparties en une vingtaine de groupes taxonomiques
- 80% des données d'effets sur les espèces non-humaines rapportent sur les effets observés après irradiation γ externe en conséquence d'exposition aiguë (flash & forte dose)
- Seulement 20% sont dédiés aux conditions d'exposition chronique (durée significative au regard de la durée de vie de l'espèce testée et faible débit de dose). La quasi-totalité a trait à des situations d'irradiation γ externe

Brève description de FREDERICA

Nombre de données d'effets par écosystème et par voie d'exposition (externe / interne irradiation) et durée d'exposition (aigu vs chronique)



Chronic-internal

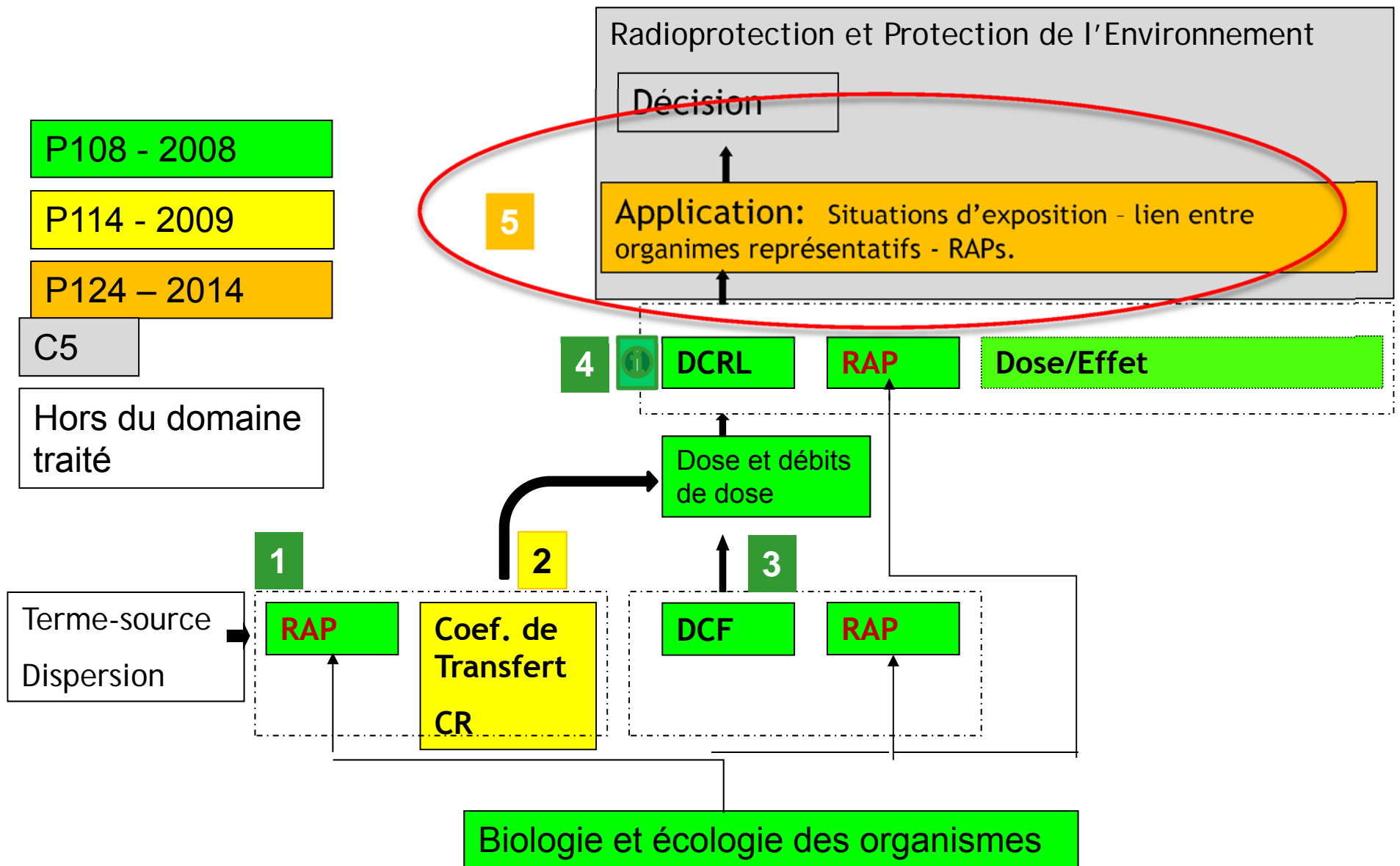
Chronic-external

www.frederica-online.org

Sur la base de ces connaissances, le concept de DCRL propose d'utiliser selon un jugement d'experts les connaissances existantes pour les espèces correspondant aux RAPs

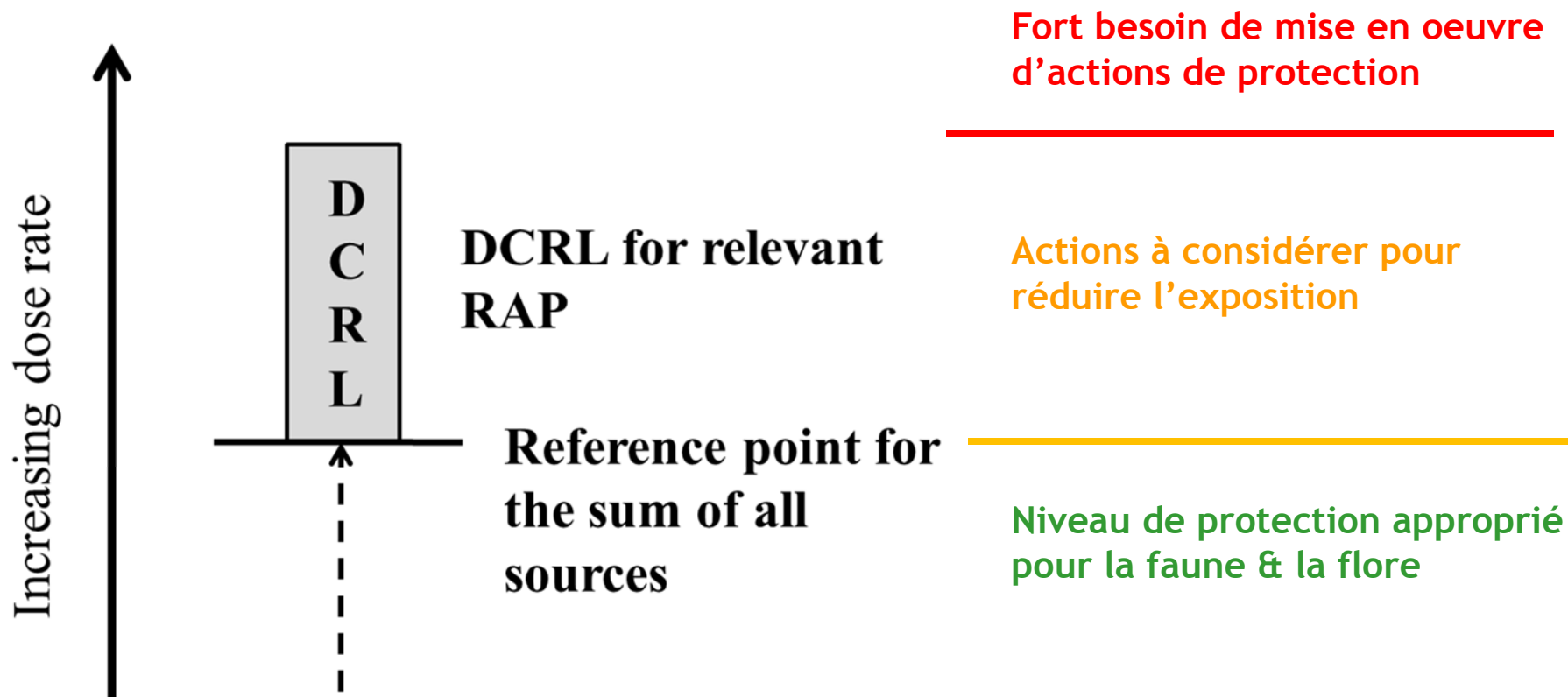
Dose rate (mGy d⁻¹)	<u>Reference Deer</u>	<u>Reference Flatfish</u>
100 - 1000	Reduction in lifespan due to various causes.	Some mortality expected in larvae and hatchlings
10 - 100	Increased morbidity. Possible reduced lifespan. Reduced reproductive success.	Reduced reproductive success
1 - 10	Potential for reduced reproductive success	Possible reduced reproductive success due to reduced fertility
0.1 - 1	Very low probability of various effects	No information
0.01 – 0.1	No observed effects.	No information
< 0.01	Natural background	Natural background

L'approche CIPR : articulation des 3 principales publications



Application dans les cas des situations d'exposition planifiées

- Situation caractérisée par une augmentation significative du débit de dose d'exposition au dessus du bruit de fond naturel: la valeur minimale de la gamme de DRCL sert de point de référence, avec prise en compte d'impacts cumulés pour diverses sources

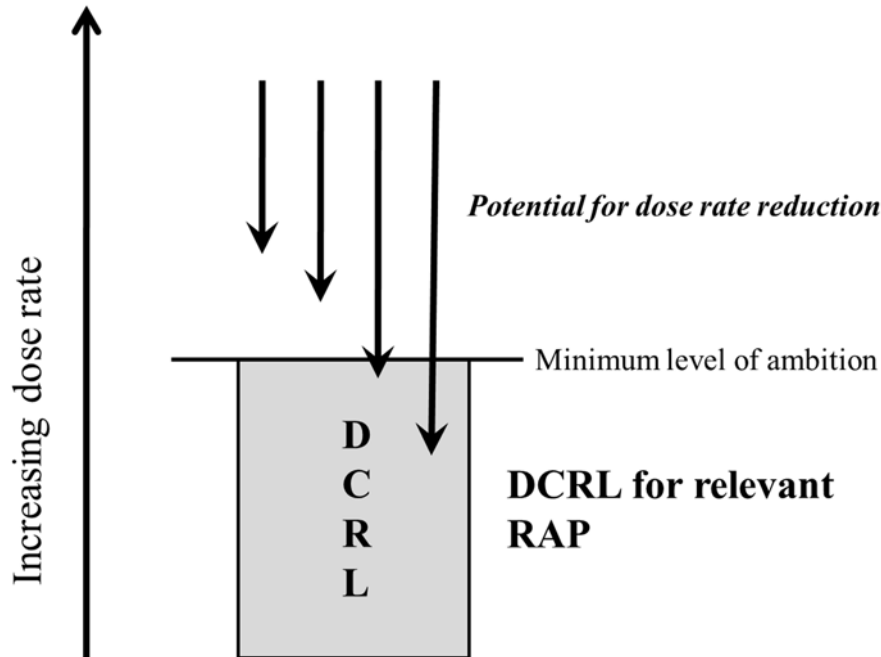


Comment utiliser les DCRLs?

Application dans les cas des situations d'exposition existantes

5

Ambition pour l'optimisation : réduire l'exposition à un niveau compris dans la gamme de DCRL



Implementation de l'optimisation

-l'exposition de la faune et flore sont un facteur de l'optimisation de la protection humaine

-les mesures de remédiation peuvent avoir des conséquences importantes sur les populations (e.g., décapage du sol)

Examen des solutions pour réduire les expositions

-Faisabilité technique

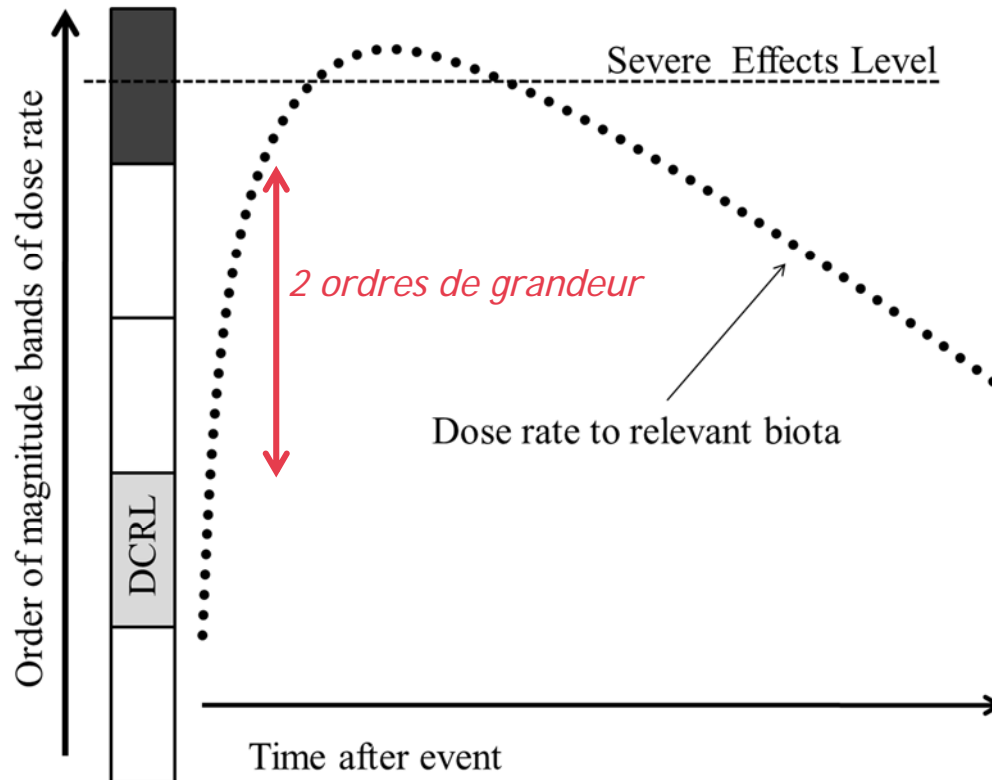
-Coût et bénéfice des efforts entrepris

-Peut permettre une réduction des expositions des personnes

-DCRLs utilisés comme critères de mitigation des expositions environnementales

Application dans les cas des situations d'exposition d'urgence

Situation telle que le contrôle de la source n'est pas encore réalisé: rarement une priorité immédiate par rapport à la RP humaine pour laquelle les conséquences environnementales sont un facteur de l'optimisation de la protection; éléments de communication et prévision des effets attendus/observés



Diminuer les niveaux d'exposition en considérant les conséquences radiologiques et non-radiologiques

Actions à considérer pour réduire l'exposition selon une approche coût-bénéfice

Niveau de protection approprié pour la faune & la flore

L'application des 3 principes de la radioprotection

Justification

- Protection de l'environnement est l'un des facteurs du processus de justification

Optimisation

- Protection de l'environnement est l'un des facteurs du processus d'optimisation
- La valeur basse de DCRLs représente un point de référence pour la protection de la vie sauvage
- Implémenté selon une procédure qui vise à atteindre le meilleur niveau de protection selon une approche intégrée, tenant compte des paramètres : (i) caractérisation de la situation d'exposition; (ii) sélection des RO, identification des options de protection possible; (iii) sélection puis implémentation de la meilleure option guidée par les DCRL

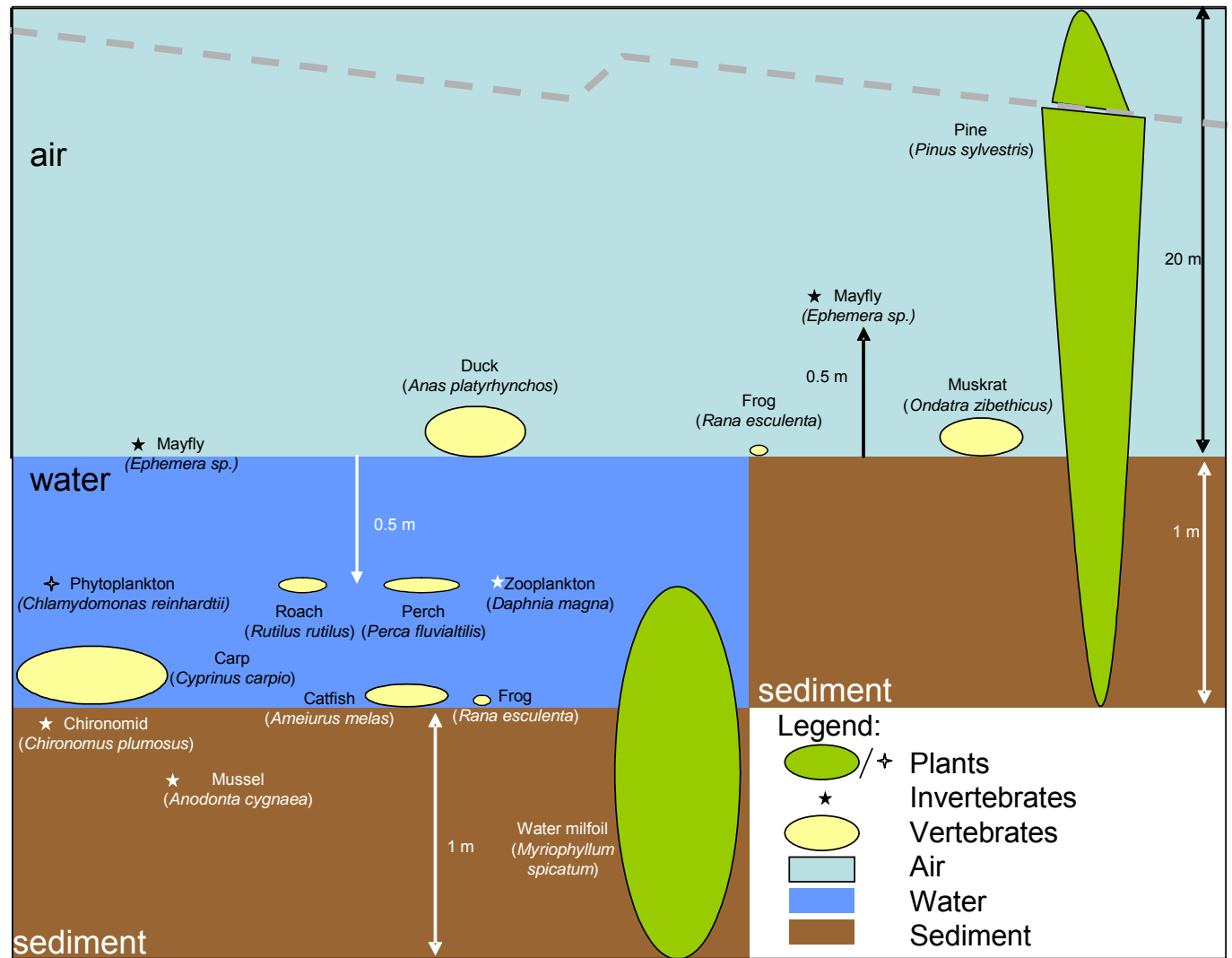
Limitation des doses (non applicable pour la radioprotection de l'environnement)

- Pas de limite de doses

Sur un plan pratique pour l'évaluation du risque radiologique

- L'approche ERICA développée en Europe (ERICA-Tool première version en 2007) englobe les concepts de la CIPR et revêt un caractère opérationnel facile à mettre en oeuvre (*www.ericatool.com*)
- Cet outil peut être utilisé pour évaluer le risque associé à l'exposition de la faune et de la flore aux rayonnements ionisants dûs aux isotopes de l'uranium et à ses descendants
- Il permet de conduire une approche graduée (du screening au site-spécifique); il est mis à jour régulièrement
- A l'étape de screening, il propose d'utiliser la valeur de référence de 10 $\mu\text{Gy/h}$ dont la détermination est tracée scientifiquement
- L'approche et l'outil ont été déployés (et appréciés) en France dans le cadre du groupe d'expertise pluraliste dédié aux anciens sites miniers uranifères
- Il existe d'autres outils équivalents (RES-RAD Biota -US, R&D128 UK...)

Approche et outil ERICA permettent de prendre en compte le modèle conceptuel d'exposition aux rayonnements ionisants (isotopes des familles de l'uranium) suivant pour les écosystèmes aquatiques



Sommaire

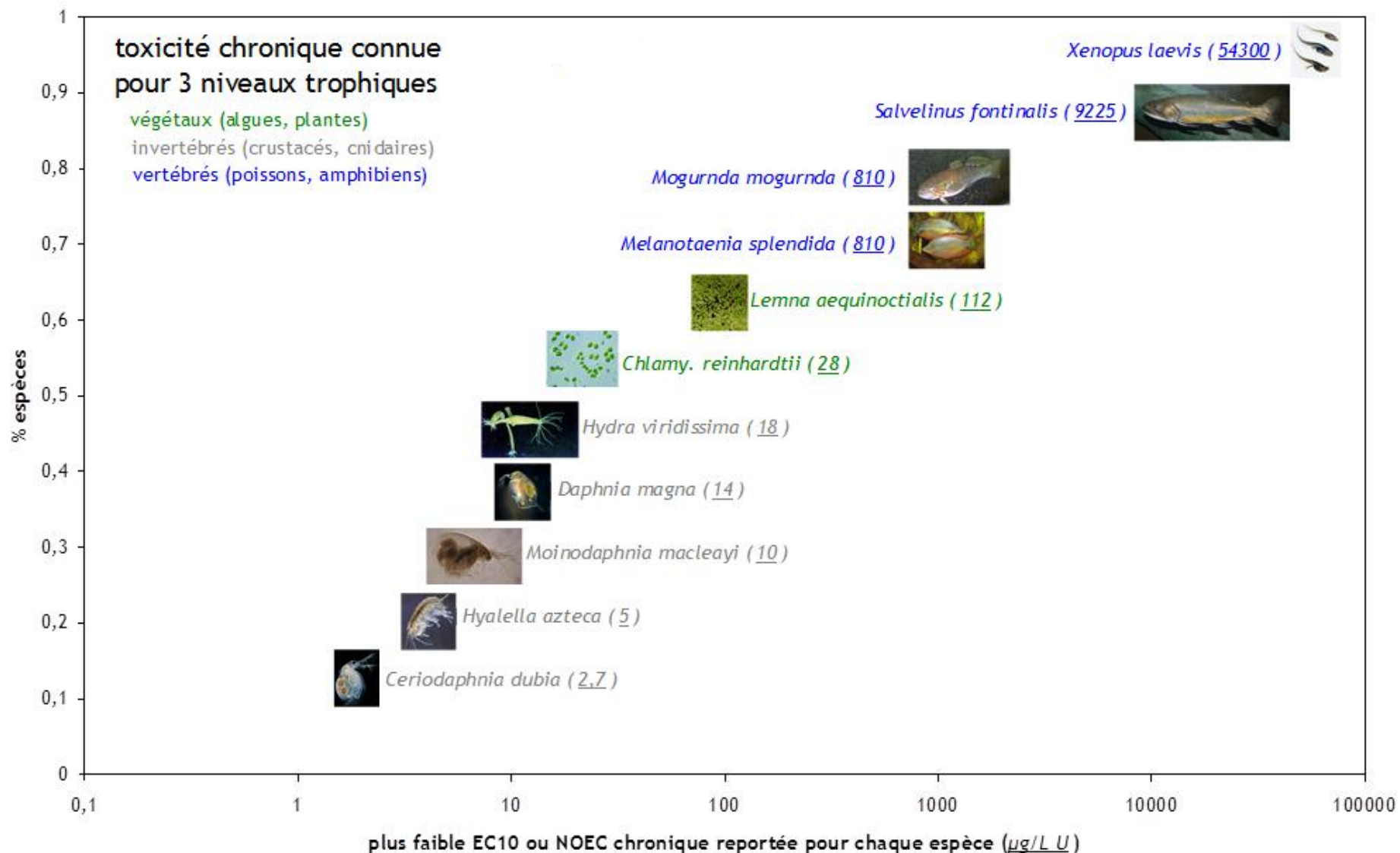
- 1) Les spécificités de l'uranium à prendre en compte dans l'évaluation du risque écologique: un stresser chimique et radiologique
- 2) La protection de l'environnement: Quelles justifications pour le volet dédié à la radioprotection?
- 3) L'approche de la CIPR pour la radioprotection de l'environnement : Quelle est-elle? Comment la mettre en œuvre?
- 4) **L'évaluation du risque chimique et la prise en compte de la biodisponibilité**
- 5) Le retour d'expériences du GEP Mines en France (évaluation du risque écologique appliquée à la gestion des anciens sites miniers uranifères français)

Evaluation du risque chimique: quelle valeur de référence adoptée?

- La littérature scientifique démontre une grande sensibilité de l'écotoxicité de l'uranium à la qualité physico-chimique du milieu (lien entre la spéciation de l'U dans le milieu, sa biodisponibilité et sa toxicité)
- Par exemple, en eau douce, les paramètres du milieu les plus influents sont le pH, l'alcalinité, la dureté et la concentration en matières organiques
- Une démarche tracée et validée par des données *in situ* nous a conduit à élaborer et adopter des PNECs conditionnelles aux domaines physico-chimiques (PNEC: Predicted No Effect Concentration)
- Utilisées au sein d'une évaluation du risque écologique, elles servent à la prise de décision pour la gestion des milieux

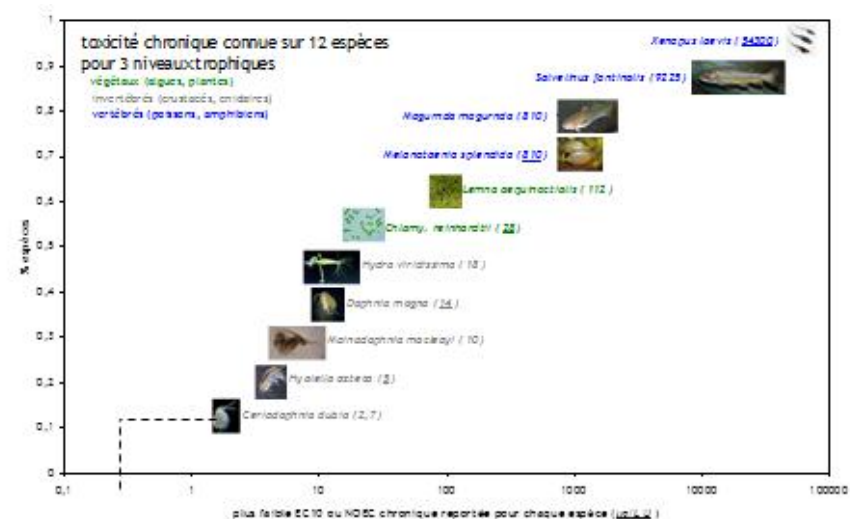
Ecotoxicité de l'uranium (ex. chronique en eau douce)

Synthèse des connaissances existantes au niveau international



Ecotoxicité de l'uranium (ex. chronique en eau douce)

- Les connaissances sur l'écotoxicité de l'uranium permettent à ce jour de déterminer une valeur générique de $PNEC_{\text{eau}}$ à $0,3 \mu\text{g/L U}$ (plus faible EC_{10} chronique x facteur de sécurité de 10) = valeur actuelle (circulaire NQEp 2007)



- Cette valeur générique conservative peut s'appliquer pour tous les hydrosystèmes d'eau douce, c'est à dire quelle que soit la physico-chimie du milieu et la biodiversité
 - Les préconisations européennes (EC, 2010) incitent à tirer le meilleur parti possible des connaissances sur la biodisponibilité des métaux traces pour déterminer des PNEC conditionnelles aux domaines physico-chimiques des milieux
- Quelles sont les connaissances sur la biodisponibilité de l'uranium ?

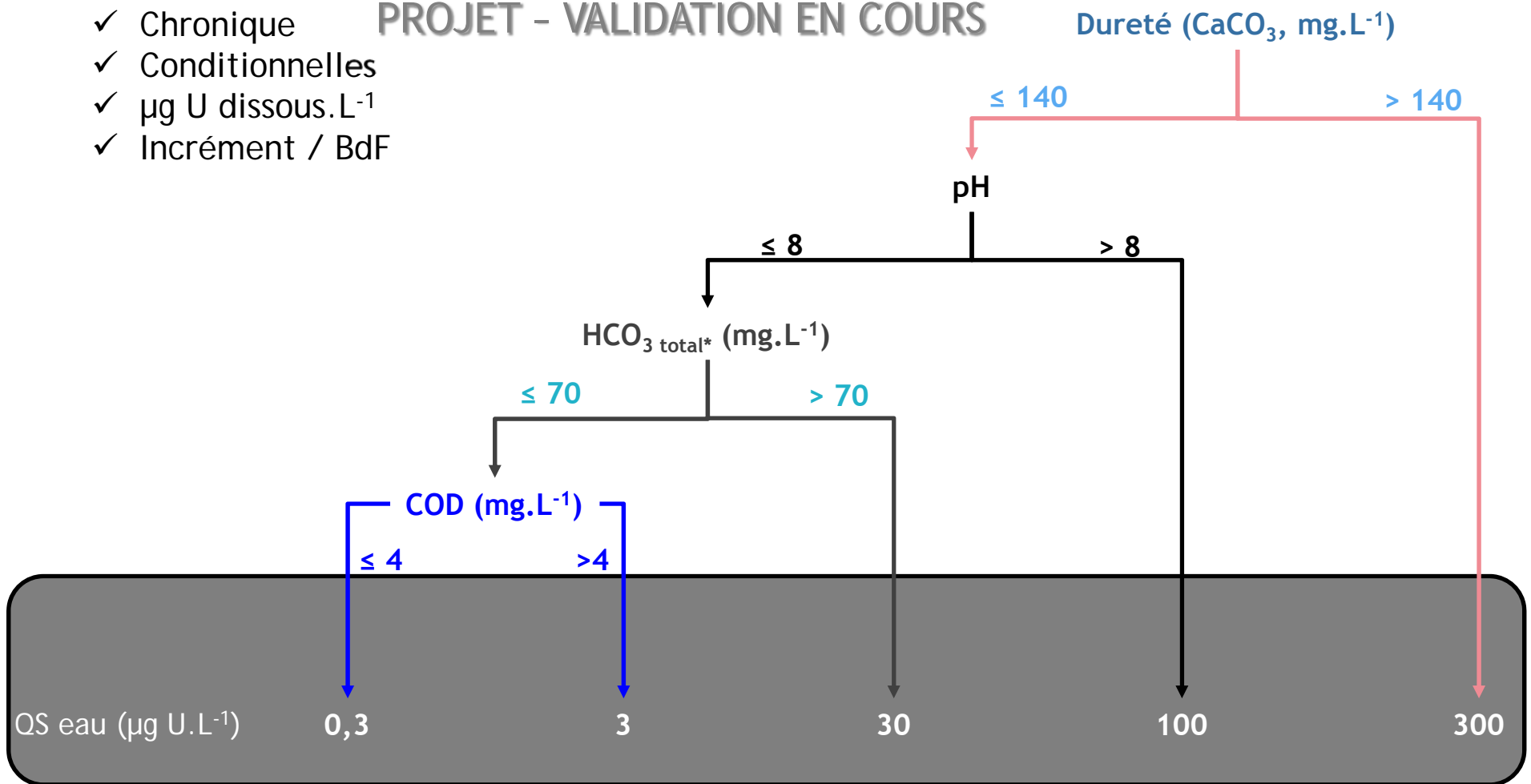
Biodisponibilité de l'uranium

- degré avec lequel un contaminant est assimilé par un organisme : primordiale pour estimer l'exposition des organismes et la réponse biologique qui en résulte
- pour les éléments traces métalliques, la biodisponibilité dépend des espèces chimiques présentes et de leurs propriétés
- Certaines études conduites à un pH donné indiquent que la biodisponibilité de l'uranium est proportionnelle à la **concentration en ion uranyle libre** (UO_2^{2+})
- D'autres études menées avec des **eaux naturelles** (présence de **matière organique dissoute, MOD**) confirment que **concentration en ion uranyle libre** (UO_2^{2+}) est un bon indicateur de la biodisponibilité
- Mais des études balayant une large gamme de pH montrent que d'autres espèces sont biodisponibles. En effet, un certain nombre d'**exceptions** ont été reportées quand le pH varie : différentes hypothèses quant aux espèces chimiques pouvant être considérées comme biodisponibles en + de l'ion libre (**complexes hydroxylés, carbonatés**)

Construction d'abaques prenant en compte la biodisponibilité de l'Uranium

- ✓ Chronique
- ✓ Conditionnelles
- ✓ $\mu\text{g U dissous.L}^{-1}$
- ✓ Incrément / BdF

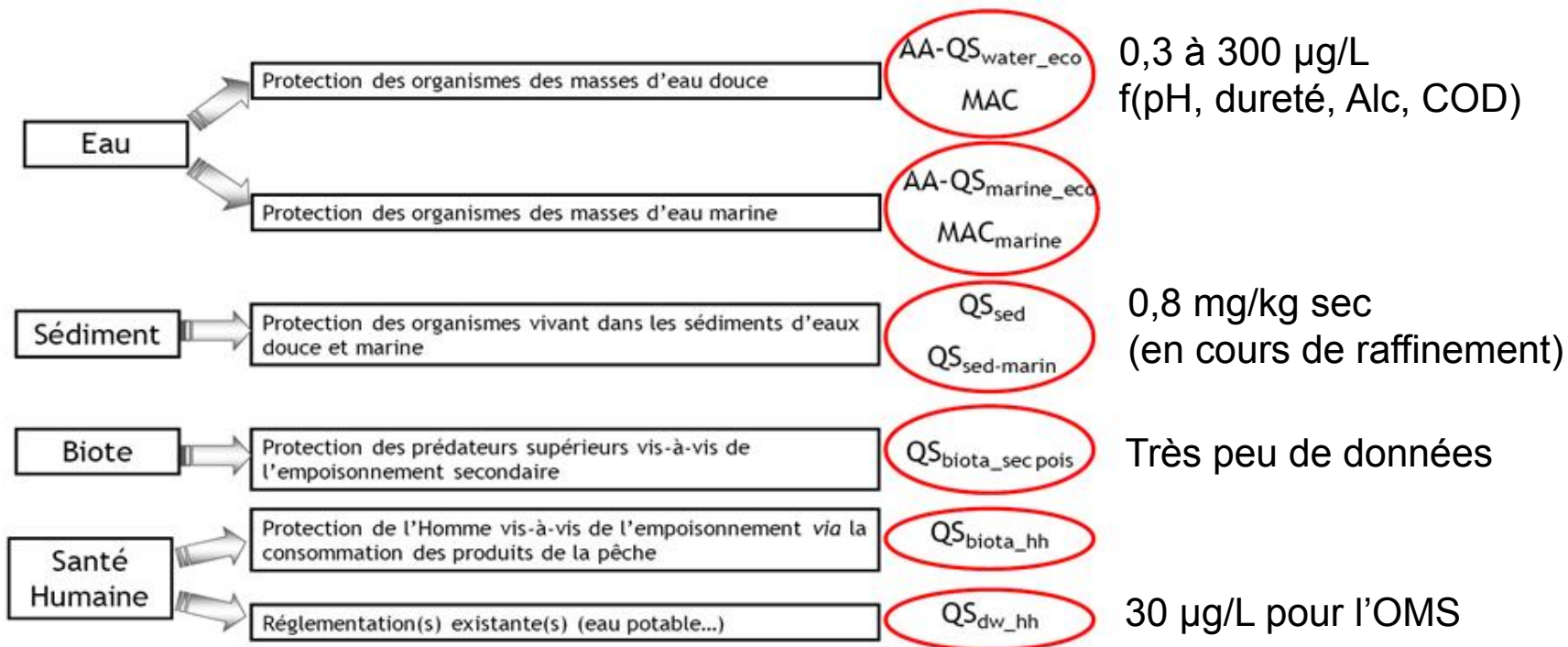
PROJET - VALIDATION EN COURS



- formes chimiques considérées biodisponibles (U_{bio} : UO_2^{2+} , $\text{UO}_2(\text{OH})^+$, $\text{UO}_2(\text{OH})_2$, UO_2CO_3)
- paramètres physico-chimiques influant U_{bio} : pH, Alcalinité, COD, dureté ($[\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{Mg}^{2+}]$)
- Calcul de U_{total} conduisant à $U_{\text{bio}} = \text{PNEC}$ générique par modélisation thermodynamique dans les eaux françaises

Examen pour les autres compartiments de l'environnement

Une valeur guide environnementale globale est déterminée à partir des valeurs de qualité spécifiques calculées pour chacun des compartiments. Pour la France, les valeurs en cours d'adoption sont:



QS Quality Standard
 = NQ, Norme de Qualité
 AA-QS Concentration Moyenne Annuelle à ne pas dépasser
 (chronique)

MAC
 Concentration Maximale Acceptable (aigu)

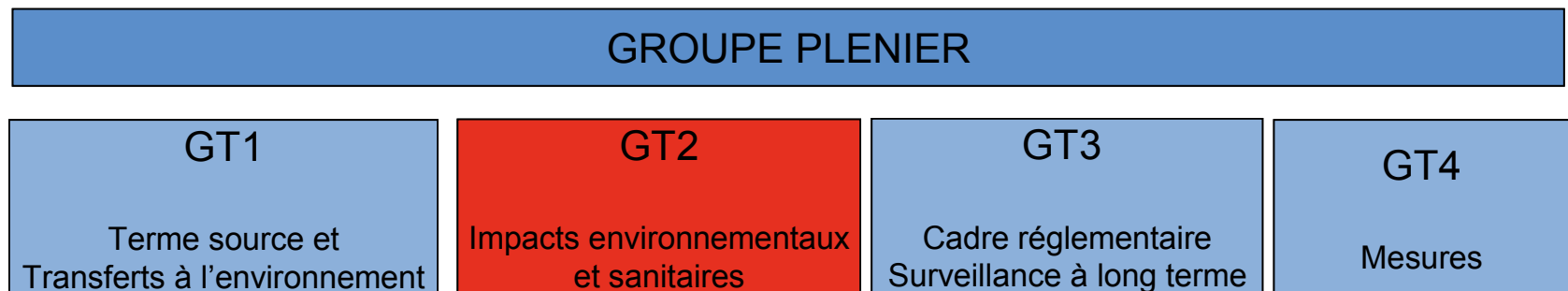
Sommaire

- 1) Les spécificités de l'uranium à prendre en compte dans l'évaluation du risque écologique: un stresser chimique et radiologique
- 2) La protection de l'environnement: Quelles justifications pour le volet dédié à la radioprotection?
- 3) L'approche de la CIPR pour la radioprotection de l'environnement : Quelle est-elle? Comment la mettre en œuvre?
- 4) L'évaluation du risque chimique et la prise en compte de la biodisponibilité
- 5) **Le retour d'expériences du GEP Mines en France (évaluation du risque écologique appliquée à la gestion des anciens sites miniers uranifères français)**

Le retour d'expériences du GEP Mines en France

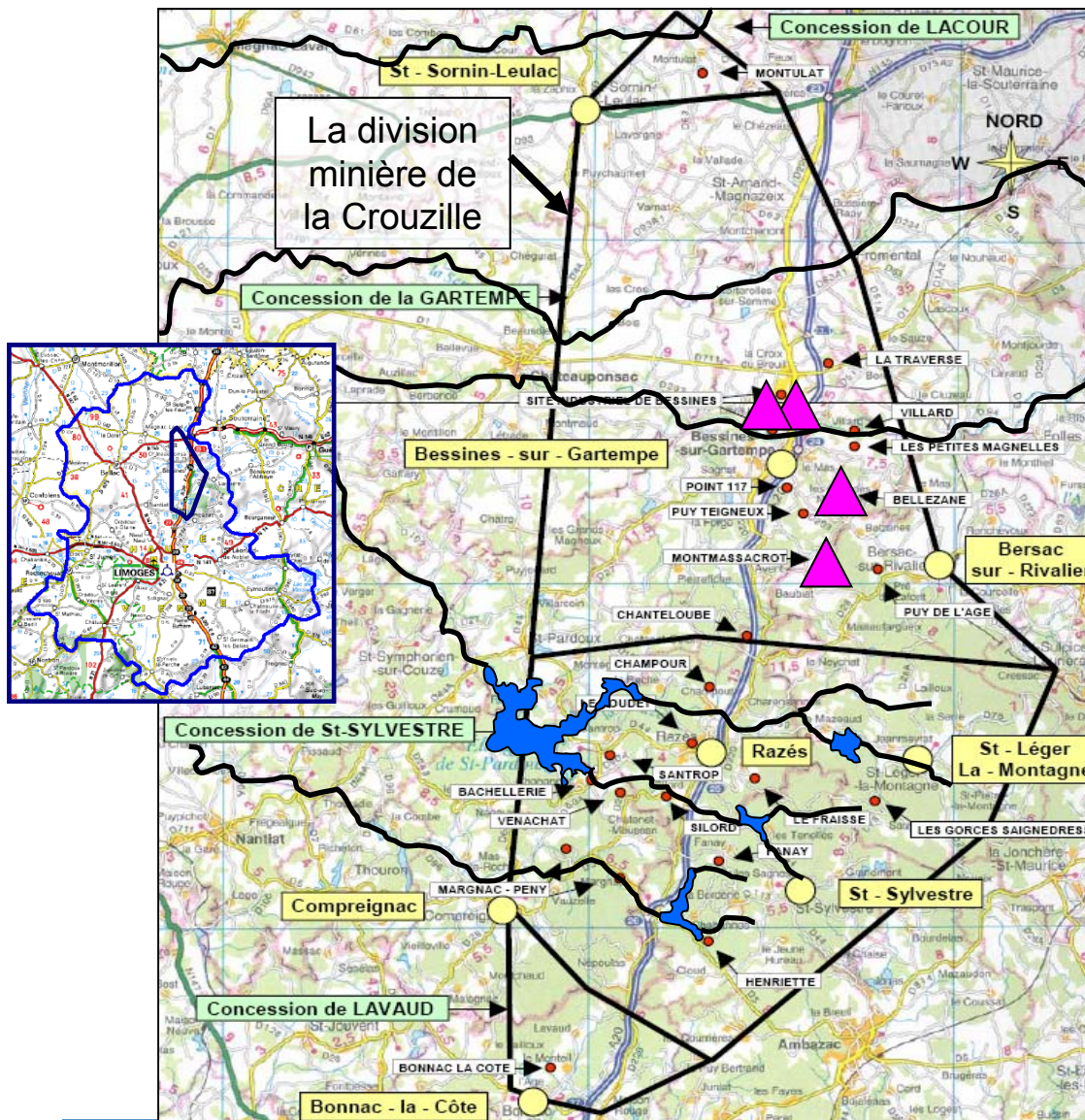
- Point de départ : remise en état des sites conforme aux objectifs de protection des populations et de l'environnement associée à des analyses divergentes sur les conditions de cette remise en état avec des développements judiciaires et médiatiques importants
- Novembre 2005 : création par le ministère de l'écologie d'un Groupe d'Expertise Pluraliste (GEP) sur les sites miniers d'uranium du Limousin: Plus de vingt experts de disciplines et d'origines diverses, incluant des institutionnels français et étrangers, des associatifs, des experts indépendants, et l'industriel
- Mission : examen critique des documents techniques fournis par l'opérateur minier AREVA NC (Cogema) pour les sites de la Haute-Vienne, afin d'éclairer l'administration et l'exploitant sur les options de gestion et de surveillance à long terme des installations

(GEP mines, <http://www.gep-nucleaire.org/gep>)



Le retour d'expériences du GEP Mines en France

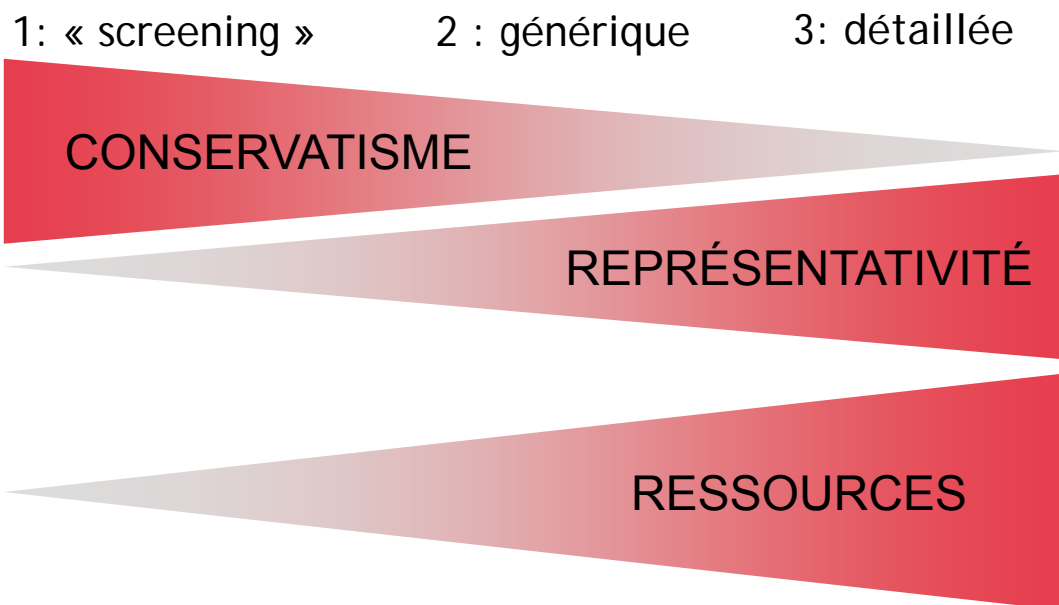
Application des ERE dans des cas complexes



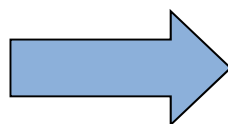
- 24 sites miniers (23 kt d'U produites / 58 Mt de stériles ; teneur 100 ppm)
- 4 stockages de résidus de traitement (20 Mt ; teneur moyenne de l'ordre de 30 Bq/g en Ra226)
- 7 bassins versants
- marquages observés sur certains sédiments (jusqu'à 10 Bq/g)
- eaux collectées et parfois traitées avant rejet (jusqu'à ~1Bq/l en Ra226 et 1mg/l en U)
- doses à l'homme ajoutées estimées à partir des résultats de surveillance proches de 1 mSv/an

Recommandations suite au déploiement dans le cadre du GEP Mines

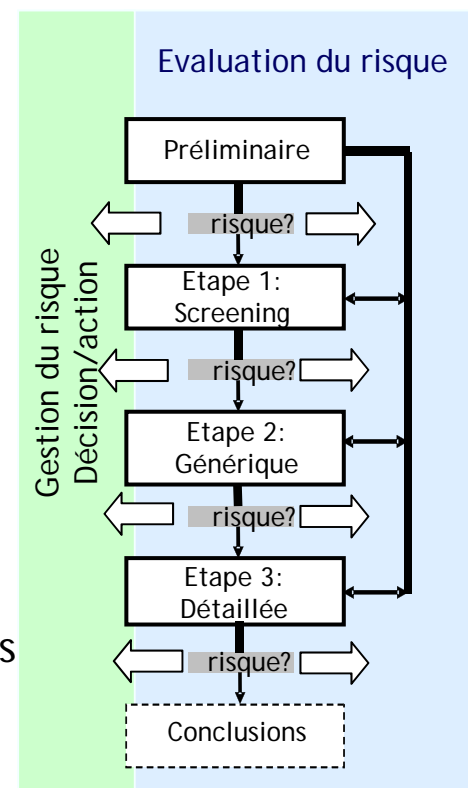
Impact environnemental à évaluer sur l'ensemble des sites selon une approche graduée (chimique et radiologique)



données génériques,
conservatives,
calcul déterministe.



données site-spécifiques
incertitudes,
calcul probabiliste.



Dernière étape associée à des preuves supplémentaires:
surveillance écologique, données d'écotoxicité
spécifiques

■ Réduire les incertitudes relatives à l'isotopie et descendants

Acquérir les données permettant de mieux caractériser les bruits de fond (chimique et radiologique) et les équilibres au sein des familles de l'uranium 235 et 238 (radiologique);

Abaisser autant que possible les limites de détection;

■ Plans de surveillance écologique

Quantifier l'impact réel par des outils de bioindication

Caractériser l'évolution des conditions physico-chimiques des milieux

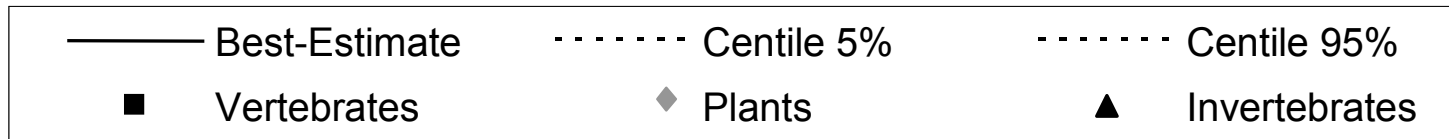
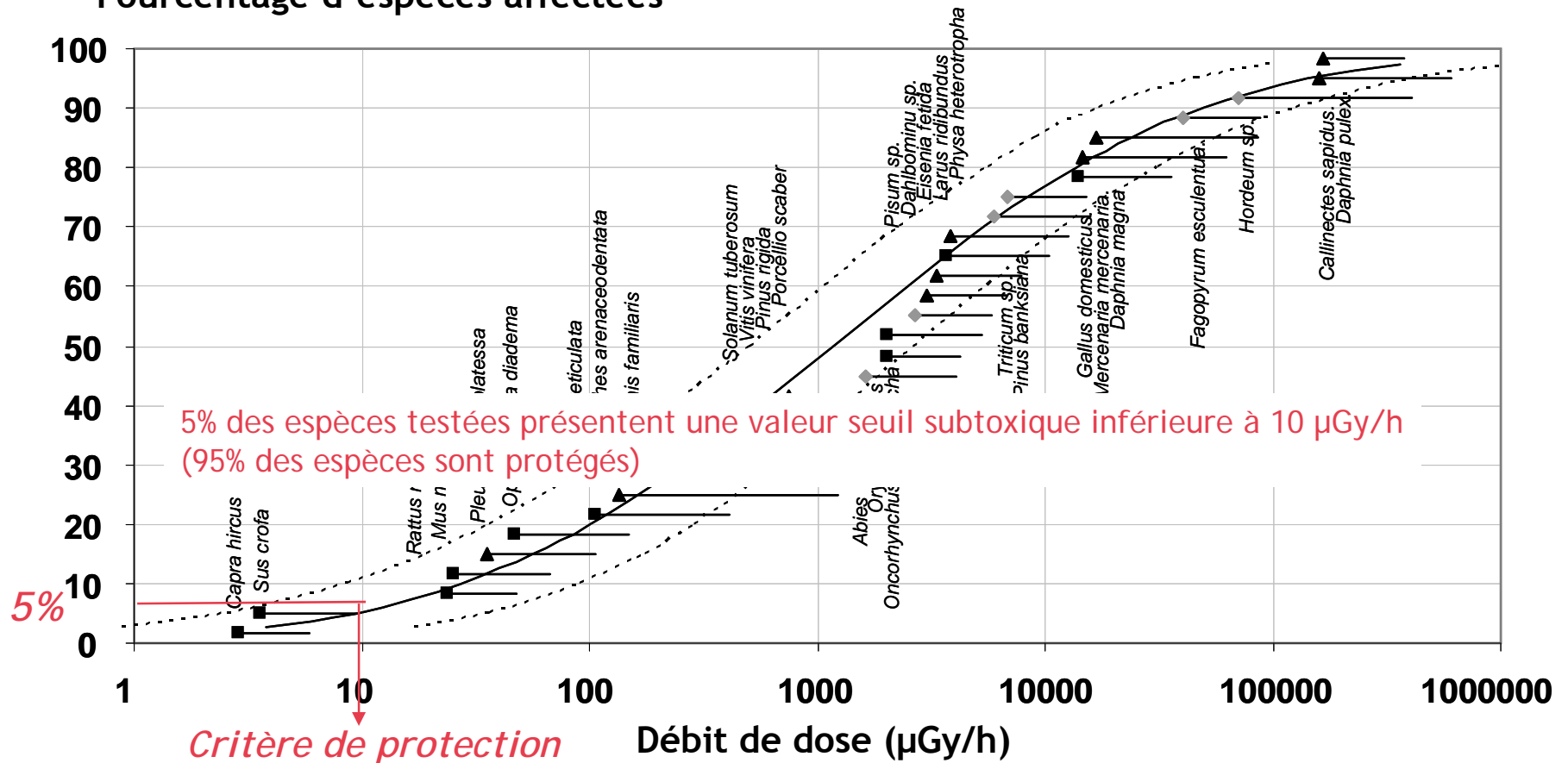
Actuellement poursuite des réflexions sur le contexte de multipollution (Ba, Al, Fe, Mn....)





Radiosensibilité des espèces lors d'exposition γ externe chronique

Pourcentage d'espèces affectées



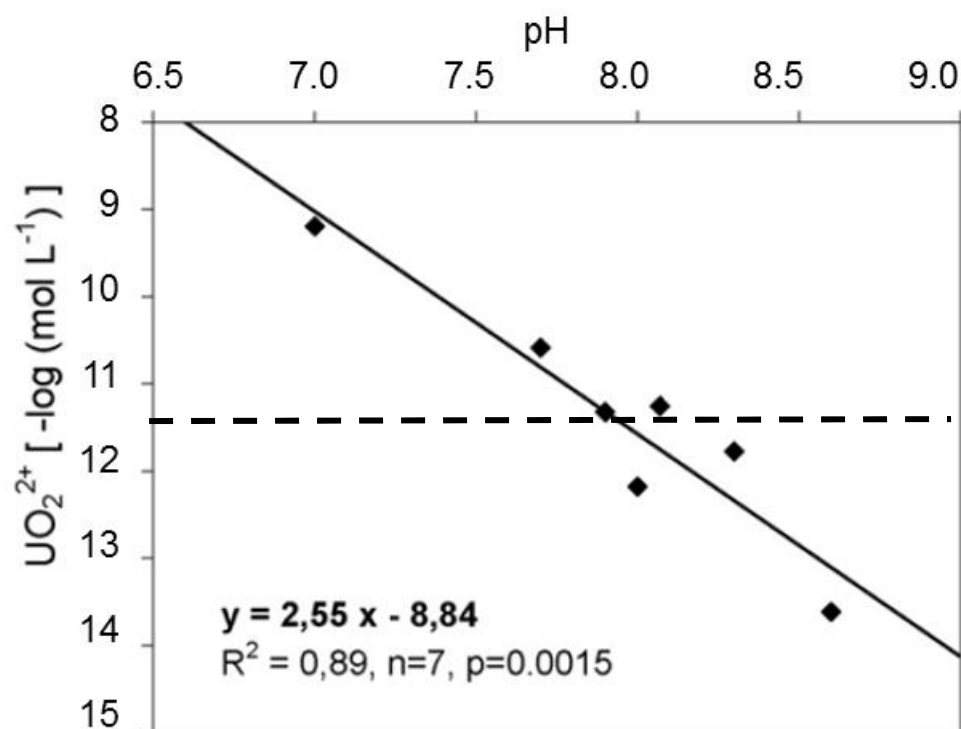
Espèces chimiques biodisponibles de l'U

- Un certain nombre d'exceptions ont été reportées quand le pH varie : différentes hypothèses quant aux espèces chimiques pouvant être considérées comme biodisponibles en + de l'ion libre (complexes hydroxylés, carbonatés)

- Exemple

Concentration en UO_2^{2+} calculé pour une même toxicité (CE_{50} -48h immobilisation *D. magna*) en fonction du pH

(Zeman et al., 2008)



Derivation des PNECs conditionnelles

- 4 formes chimiques considérées biodisponibles (selon résultat en laboratoire) (U_{bio})
 - UO_2^{2+} , $\text{UO}_2(\text{OH})^+$, $\text{UO}_2(\text{OH})_2$, UO_2CO_3
- 4 paramètres physico-chimiques influant U_{bio}
 - pH, Alcalinité, COD, dureté ($[\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{Mg}^{2+}]$)
- Calcul de U_{total} conduisant à $U_{\text{bio}} = \text{PNEC}$ générique par modélisation thermodynamique dans les eaux françaises (Vminteq code; FOREGS - European Geochemical Atlas (Salminen, 2005) : 119 rivières françaises)
 - $6.4 \leq \text{pH} \leq 8.8$
 - $9 \text{ mg.L}^{-1} \leq \text{HCO}_3 \leq 421 \text{ mg.L}^{-1}$
 - $11 \text{ mg CaCO}_3.\text{L}^{-1} \leq \text{Hardness} \leq 1091 \text{ mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$
 - $0.3 \text{ mg.L}^{-1} \leq \text{COD} \leq 23.4 \text{ mg.L}^{-1}$
- Régressions statistiques et arbre d'analyse (RPART library - Therneau et al., 2014 - on R software)