Installations nucléaires
Quelle surveillance environnementale ?

Suzanne GAZAL
Présidente du Comité Scientifique de
l'Association Nationale des Comités et Commissions locales d'information auprès des INB (ANCCLI)

Sommaire

- **Les rejets des installations nucléaires**
  - **Les catégories de rejets**
  - **Les milieux impactés par les rejets : une réalité complexe**
  - **Voies et processus de transfert des radionucléides entre les milieux atmosphérique, aquatique et terrestre et entre les constituants de l'écosystème terrestre**
- **Pourquoi et comment surveiller l'environnement des sites nucléaires ?**
- **Les mesures d'irradiation et de contamination**
  - **La qualité radiologique de l'environnement physique**
  - **La qualité chimique et biologique de l'environnement physique**
  - **La qualité radiologique des organismes vivant dans ces milieux**
  - **Quelle surveillance par les CLI ?**
- **L'observation des organisations biologiques**
  - **Les marqueurs biologiques**
  - **Les indicateurs d'exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants**
- **Conclusion**

Les rejets
des installations nucléaires

Les catégories de rejets[1]

- **Les radionucléides**
  - **Artificiels (produits de fission : ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{131}I, ^{85}Kr… et d'activation : $^{58,60}Co$, ^{110m}Ag, ^{63}Ni, ^{3}H…, transuraniens : $^{239,241,238,240,242}Pu$, ^{241}Am…)**
  - **Naturels (chaînes de l'uranium et du thorium)**
  - ➔ ***Rayonnements alpha, bêta, gamma et/ou neutrons…*** **+ toxicité chimique**
- **Les substances non radioactives (métaux : Zn, Cu, Mn, Ni…et autres éléments et leurs composés : Na^+, Cl^-, $SO_4^=$, NO_3^-, chlore libre…) à toxicité variable**
- **Les colonies bactériennes *(Legionella species)* et les amibes (*Naegleria fowleri, Acanthamoeba*) pathogènes pour l'homme**
- **La vapeur d'eau (~ 25.10^6 m^3/an à puissance nominale pour un REP de 1300 MWe)**
- **La pollution thermique (potentiellement préjudiciable à la faune aquatique)**
- **Les composés chlorés formés à l'extérieur du site (AOX, THM) (conséquᶜᵉ traitement biocide)**

[1]susceptibles d'être effectués selon le type d'installation nucléaire

Les milieux impactés par les rejets : une réalité complexe[1]

- **Les entrées directes : les rejets dans**
  - **le milieu atmosphérique et/ou**
  - **le milieu aquatique et/ou**
  - **les sols**

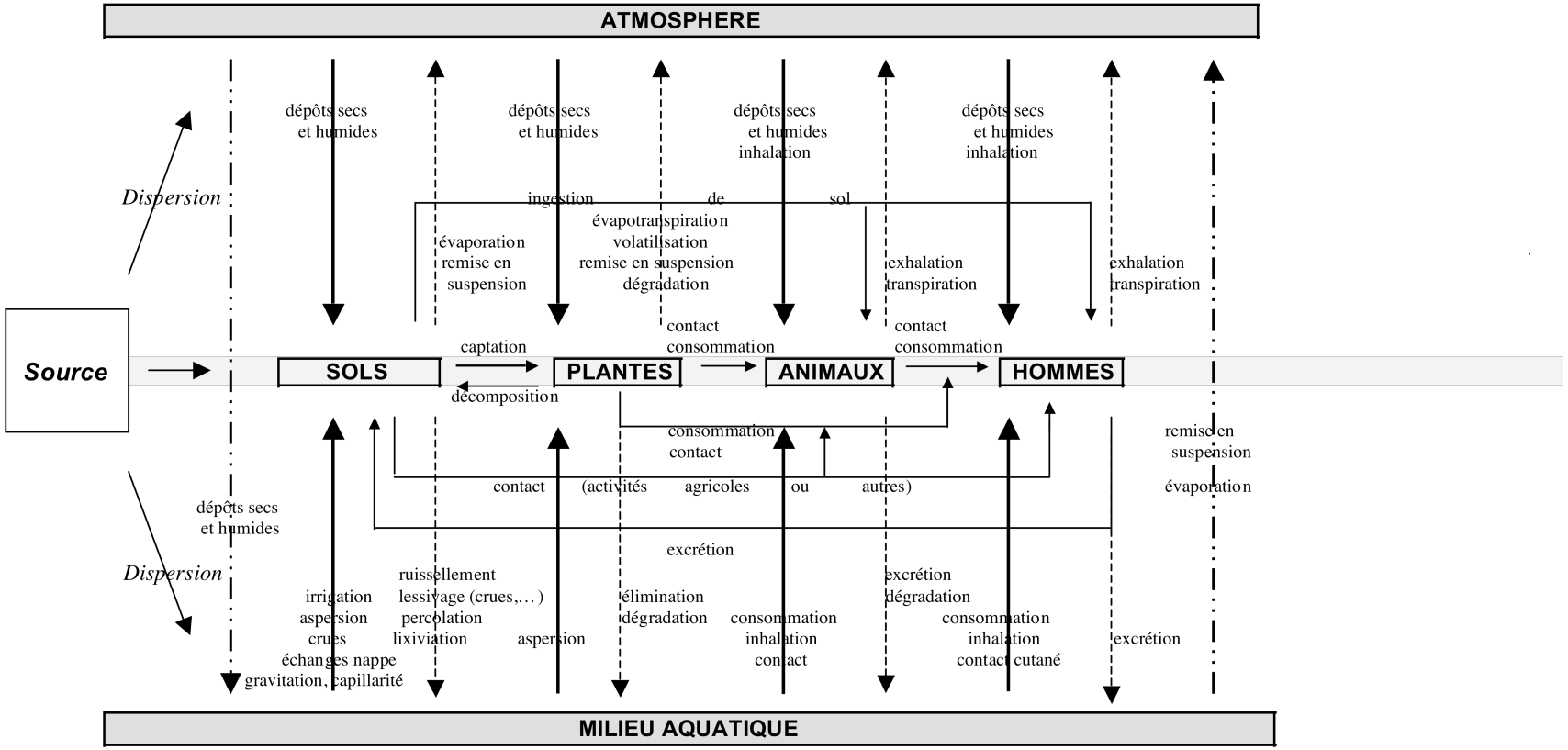
  variables selon les types de sites (sites miniers : pollution du milieu aquatique et des sols / site militaire de Valduc : pollution atmosphérique dominantes)

- **Les modalités du rejet**
  - **permanents ou épisodiques / en routine ou en situation accidentelle**
  - **composition, modalités (activité volumique, activité annuelle, concentration, débit…) en général réglementées pour les INB**

- **Les entrées indirectes : les transferts**
  - **au sein / entre ces différents milieux**
  - **vers les organismes vivant dans ces milieux (flore et faune aquat[ques] et terrestres, Homme)**
  - **des organismes vers ces milieux / entre les organismes eux-mêmes**

[1] transparent 6 pour une présentation synoptique

Voies et Processus de transfert des radionucléides
entre les milieux atmosphérique, aquatique et terrestre
et entre les constituants de l'écosystème terrestre (adapté de Coughtrey et Thorne, 1983)



Source : S. Gazal, J. C. Amiard, C. Chenal. Les méthodes de surveillance de la qualité de l'environnement et leur application aux rayonnements ionisants (à paraître).

Pourquoi et comment surveiller l'environnement des sites nucléaires ?

❑ Pourquoi ?

- **suivre les rejets d'une installation et le respect de la réglementation**
- **connaître l'état des milieux et des organismes vivants (biosphère)**
- **connaître les niveaux d'irradiation et de contamination (chaîne alimentaire notamment) auxquels les êtres vivants peuvent être exposés**
- **identifier l'impact éventuel de l'exposition aux rejets de l'installation sur les organismes vivants**
- **surveiller la qualité des produits d'intérêt économique**

❑ Comment ?

- **Les *mesures de rayonnement et de contamination***
  - **sur l'environnement physique (air, eau, sol)**
  - **sur les organismes vivant dans ces milieux**
- ***L'observation des organisations biologiques* (témoins de la qualité des milieux et de la biosphère, prédicteurs des effets sur l'homme ?)**

❑ Par qui ?

- **les *exploitants* (principe de responsabilité) (limites de rejets / surveillance environnement)**
- **l'*ASN* (prescripteur et contrôleur)**
- **l'*IRSN* (appui technique ASN : mission générale de surveillance de l'environnement notamment des installations nucléaires)**
- **de nombreux *réseaux institutionnels* (ADEME, LCSQA, IFREMER, BRGM…)**
- **les *Laboratoires vétérinaires départementaux***
- **les *Laboratoires universitaires et de recherche***
- **les *associations* (ACRO, CRIIRAD…)**

et …

- **les *Commissions locales d'information* (CLI)**

Les mesures de rayonnement et de contamination

La qualité radiologique de l'environnement physique

❑ Le milieu atmosphérique (air extérieur, air intérieur)[1]

- **Rayonnement ambiant (β, γ, neutrons)**
- **Activité volumique de l'air (activité totale α, β et/ou γ, activités d'origines naturelle et anthropique séparément : radon / iode / tritium…), spectrométrie γ…**
- **Activité de l'eau de pluie**

❑ Le milieu aquatique

➢ Les milieux

- ***continentaux (eaux douces)* : eaux de surface, eaux souterraines (cours d'eau, eaux lacustres, nappes, eau potable distribuée…)**
  ***marins* : mers, estuaires…**
- **l'eau / les matières en suspension et les sédiments**

➢ L'évaluation de l'activité

- **Mesures activité totale α, β et/ou γ ,^{40}K, spectrométrie α, γ et/ou β (recherche de radionucléides β pur : tritium,^{14}C, ^{90}Sr, ^{63}Ni, ^{36}Cl…)**
- **Ratio isotopique (ex : ratio ^{238}Pu / $^{239+240}$Pu, *cf.* CNPE St-Laurent-des-Eaux 1980)**
- **Calcul (activité effluent rejeté *x* débit de rejet *x* débit du cours d'eau)**

[1]sont mentionnées dans l'ensemble de cette présentation les stratégies de surveillance de l'environnement qui *peuvent* être mises en oeuvre

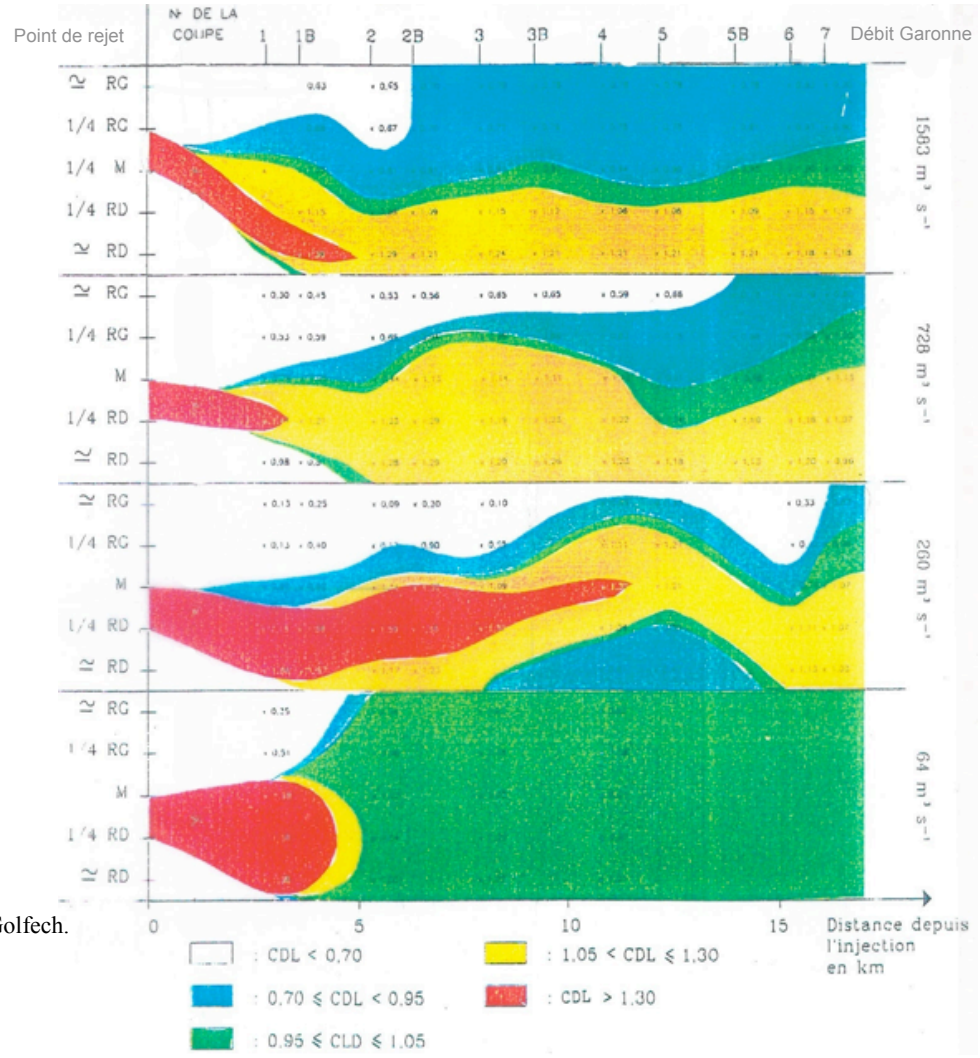
- **Les sols (extérieurs, intérieurs)**
  - **Contamination surfacique**
  - **Activité échantillons (mêmes modalités que pour les sédiments)**

- **Les difficultés**
  - **Pour les milieux aquatiques et les sols**
    - ***hétérogénéité spatio-temporelle*** **des contaminations (*ex.* transparents 14 et 15)**
    - ***variabilité*** **du partage des radioéléments entre *phase liquide* et *matières en suspension ou sédiments* / du comportement des radionucléides dans les *sols***
  - **Dans tous les cas**
    - ***faibles teneurs*** **en polluants (en situation de routine) (risque de contamination secondaire de l'échantillon, seuils de détection)**
  - **⇨ Exigences concernant**

    les *méthodes d'échantillonnage et d'analyse / l'interprétation des résultats*

Traçage des rejets effectués dans la Garonne par la centrale nucléaire de Golfech (Tarn-et-Garonne)

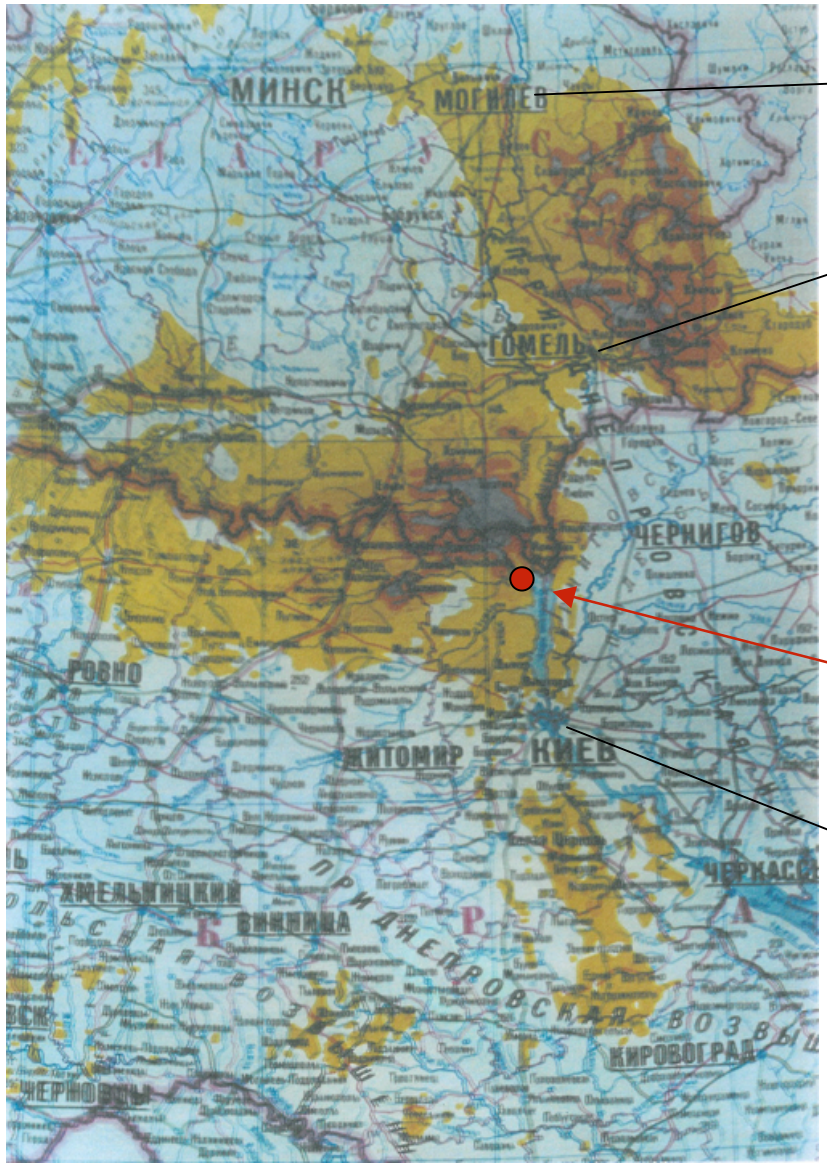
Ci-contre :
Pour un débit de 64 m³/s proche du débit d'alerte, le mélange est effectif à 5,2km.
Il n'est pas réalisé à 17km (limite de l'étude) dans les trois autres scénarios (260, 728 et 1583 m³/s).
Dans ces trois scénarios, le comportement de la veine de rejet est différent sur la portion de rivière étudiée, et le mélange n'affecte pas de la même manière les rives droite et gauche.



Légende

CDL = coefficient de dispersion liquide
tel que
Ci = concentration en un point quelconque
= CDL *x* concentration en zone de bon mélange

Source : CEA (IPSN) (1988).
Traçage des rejets de la centrale de Golfech.
DERS-SERE. Note SRP 88/20



Mogilev (Bélarus), 280 km

Gomel (Bélarus), 130 km

Carte des dépôts de césium 137 autour de Tchernobyl suite à l'accident du 26 avril 1986

réacteur accidenté

Légende

- < 37 kBq/m^2
- 37 à 555 kBq/m^2
- 555 à 1480 kBq/m^2
- > 1480 kBq/m^2

Kiev (Ukraine), 80 km

Source : Ministère Ukrainien de Tchernobyl (1996).
Ten years of overcome. *Tchernobyl Information*

❑ Quelques exemples d'actions de surveillance radiologique de l'environnement physique

➢ Atmosphère

- **Mesures réglementaires par les exploitants**
- **Observatoires de surveillance de l'air (ALQUA…)**
- **Conseil Général Tarn-et-Garonne, villes Gravelines, Orléans, Montauban…**

➢ Eau (filtrée ou brute)

- **CLI Golfech, SEIVA, CLI Blayais, Gravelines…**

➢ Milieu hydro sédimentaire

- **Mesures réglementaires par les exploitants : EDF CNPE, ANDRA Site de Soulaines depuis 2006…**
- **Mesures Associations (ACRO, CRIIRAD…)**
- **Référentiel hydrosédimentaire : CG[l] Tarn-et-Garonne (1989)[1], CSPI La Hague (1999)[3], CLI Soulaines (2007)[2], CLIS Fessenheim (2009)[2]…**

➢ Sols

- **Référentiel pédologique : CG[l] Tarn-et-Garonne (1989)[1], CLI de Soulaines (2007)[2]**

[1]avant ou [2]après la mise en service / [3]avant une modification de l'installation

La qualité chimique et biologique de l'environnement physique

Atmosphérique

- **Substances halogénées volatiles : trihalométhanes (THM), hydro(chloro)fluorocarbures (fréons)..**
- **Mesure concentrations en *Legionella species* (notamment *L. pneumophila*)**

(recherche et dénombrement de *legionella spp* et de *legionella pneumophila* suivant la norme NF T90-431/A1, méthode par PCR (Polymerase Chain Reaction))

Aquatique

- **Concentrations en substances stables (hydrazine, morpholine, acide borique… et autres substances classiques : sulfates, chlorures…, métaux)**

(techniques classiques)

- **Mesure concentrations en AOX (composés organiques adsorbables halogénés)**
- **Dénombrement des amibes (*Naegleria fowleri, Acanthamoeba)***

(préconcentration par filtration, filtration tangentielle, identification génétique)

- **Mesure de l'échauffement**

(modèle de simulation tridimensionnel, mesures de température en plusieurs points et à différents niveaux, détermination de la température dans le canal de rejet, thermographie aérienne)

- **Mesure du débit d'eau prélevé / évaporé**

Exigence

Adapter les *stratégies d'échantillonnage* spatio-temporelles à la variabilité écologique des systèmes impactés

La qualité radiologique des organismes vivant dans les milieux physiques

Mesures

- **Mêmes types de mesures que dans le milieu aquatique**
- **Toutes matrices : flore, faune, produits transformés**
- **Choix des matrices**
  - **usage (santé publique, intérêt économique)**
  - **potentiel de bioaccumulation (question du seuil de détection de la mesure en routine)**

Bioaccumulation

⇨ ***l'accumulation de substances données par les organismes aquatiques ou terrestres, directement à partir de l'eau, de l'air, du sol et/ou à partir de nourriture contaminée***

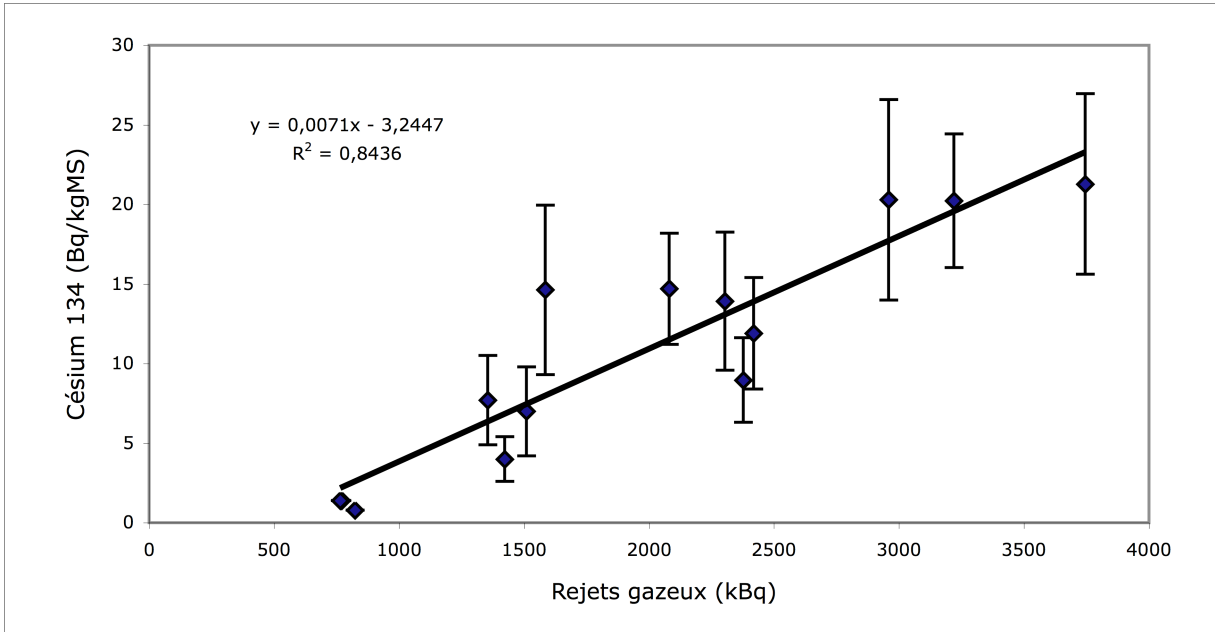
Les bioaccumulateurs

- **atmosphère et milieu terrestre : lichens, bryophytes[1], pollens, abeilles…**
- **eaux continentales : macrophytes, bryophytes, poissons**
- **eaux marines : algues benthiques, mollusques bivalves**

[1] *exemple* transparent 21

Spectrométries γ réalisées par le Laboratoire Vétérinaire Départemental sur des bryophytes terrestres dans l'environnement du CNPE de Golfech (Tarn-et-Garonne)

Activité des mousses terrestres en césium 134 / Rejets gazeux par le CNPE
Site de Lamagistère may 90-dec.91



Adapté de Gazal S., Prangé R. (2005). Assessment of the terrestrial impact of a nuclear power plant caesium 137 and caesium 134 atmospheric releases. *In* Proceedings of the 2004 ECORAD International Congress *The Scientific Basis for Environment Protection Against Radioactivity*. *Radioprotection*, EDP Science, **40** (Suppl.1) : 747-752.

Correctement sélectionnées, les mousses terrestres permettent de suivre l'évolution de faibles niveaux de rejet dans l'environnement. Ci-dessus : on observe une forte corrélation entre l'activité en césium 134 mesurée dans les mousses terrestres prélevées chaque mois sous les vents dominants et les rejets gazeux mensuels réalisés par le site pendant la même période.

❑ Les difficultés

➢ Les facteurs qui jouent sur la bioaccumulation

- **les caractéristiques morphologiques et métaboliques des organismes**
- **la nature et la forme physico-chimique du radionucléide**
- **les caractéristiques du milieu**

➢ Les facteurs liés à la mesure (protocoles de prélèvement, de transport, de préparation des échantillons / la qualité des appareils)

❑ D'où des exigences méthodologiques

- ***sélection des espèces et des parties des organismes[1] les plus représentatives en termes de santé publique, d'intérêt économique et de bioconcentration***
- ***choix des stratégies d'échantillonnage et d'analyse***
- ***interprétation des résultats***

[1]***exemple*** **pour le strontium 90**

rousses > brèmes > goujons > brochets

raffle > pellicule > grappe > jus > pulpe (raisin noir)

Quelle surveillance de l'environnement par les Commissions Locales d'Information ?

- **Ponctuelle ou permanente**

  Compétences développées en interne / prestataire / laborat^re^ vétér^re^ départ^l^

  Etudes de terrain / examen de dossiers

- **Ponctuelle**
  - **Établir un *référentiel* (avant/après la mise en service ou la modification de l'installation, *cf. Contrôle* n°188, pp.35 et 37)**
  - **Reconstruire un *historique des rejets* (SEIVA 2001, marquage des lichens par le tritium) ou *du marquage de l'environnement par les rejets* (Dampierre-en-Burly et Saint-Laurent-des-Eaux)**
  - ***Evaluer* la surveillance de l'environnement mise en oeuvre par l'exploitant (Fessenheim 2000, Blayais 2001-2002, Cadarache 2006)**
  - **Emettre un *avis sur l'opportunité d'un projet ou d'une décision* (révision des autorisations de rejets…) (Golfech 2005, Saclay 2009, Penly 2011, Cruas 2012…)**
- **Permanente**
  - **Suivi des rejets et/ou de l'état de l'environnement du site (Golfech, SEIVA)**

La détection d'effets biologiques dus à l'action des polluants sur les organismes vivants

Les biomarqueurs

❑ L'organisation du monde vivant

Molécule ⇨ organite cellulaire ⇨ cellule ⇨ tissu ⇨ organe ⇨ individu ⇨ population ⇨ communauté ⇨ écosystème

❑ L'objet de la surveillance par les biomarqueurs

- **Identifier et quantifier les *modifications* survenant éventuellement à tous les niveaux d'organisation sur les espèces végétales ou animales**
- **Certaines modifications sont *révélatrices* de la présence (excessive) d'un polluant[1] dans l'environnement**
- **Biomarqueurs de *dommage* (témoignent d'une atteinte aux organismes) *versus* biomarqueurs de *défense* (témoignent d'une adaptation des organismes)**

❑ Exemples d'organismes (bioindicateurs) fréquemment utilisés

- **en milieu atmosphérique : les lichens**
- **en milieu dulçaquicole : les invertébrés / les poissons**

[1] ou de la carence (relative) de certaines substances

❑ Les biomarqueurs d'exposition aux rayonnements ionisants

⇨ ***de nombreux travaux témoignent de l'impact biologique d'une exposition à de faibles doses d'irradiation, et ce aux différents niveaux d'organisation***

❑ Les limites de l'utilisation des biomarqueurs

- **Le rôle de l'environnement naturel (sol, microclimats, prédateurs…)**
- **La non spécificité de nombreux biomarqueurs (« spécifiques » *versus* « généralistes » : quel(s) est (sont) le(s) polluants impliqué(s) ?)**
- **La faible pertinence écologique des biomarqueurs (quelle extrapolation à l'Homme ?)**
- **La mobilité des organismes animaux**

❑ D'où une exigence concernant l'*échantillonnage* et l'*interprétation des résultats*

❑ Peu mis en oeuvre en matière de surveillance radioécologique - *Exemples :*

- **EDF - CNPE (macro invertébrés de fond, plancton, périphyton, poissons : diversité spécifique et répartition spatio-temporelle, dénombrement, examens visuels et comptages)**
- **Conseil Général de Tarn-et-Garonne (1988-1991) : *Nicotiana tabacum* L. et apparition de mutations réverses sur les gènes impliqués dans la synthèse chlorophyllienne**

Conclusion
sur les méthodes de surveillance de l'environnement

- **La réalisation de mesures dans l'environnement physique**
  - ⇨ **exposition des êtres vivants susceptibles d'y être présents**
- **Les mesures sur les bioaccumulateurs**
  - ⇒ **matrices les plus sensibles à la contamination / imprégnation** ***mais***
  - **absence d'indication sur les effets éventuels de l'exposition aux polluants**
- **Les indices biotiques (communautés, populations)**
  - ⇒ **indications sur d'éventuels déséquilibres** ***mais***
  - **temps de latence souvent important**
- **Les autres biomarqueurs**
  - ⇒ **systèmes d'alerte sensibles et précoces** ***mais***
    - **question de leur pertinence écologique**
    - **mise en oeuvre peu répandue en matière de pollution radioactive**

Références bibliographiques

S. Gazal, J.C. Amiard, C. Chenal (à paraître). Les Méthodes de surveillance de la qualité de l'environnement et leur application aux rayonnements ionisants (45 pages).

S. Gazal, M. Sené (2010). Enjeux de la surveillance de l'environnement et action des commissions locales d'information. Revue *Contrôle* 188. Juin 2010 (6 pages).

S. Gazal et J.C. Amiard (dir.) (2010). Le tritium – Actualité d'aujourd'hui et de demain, Lavoisier (165 pages).

et les précieuses suggestions
des membres du Comité Scientifique de l'ANCCLI