Présentation de la version 8 de la plate-forme CERES

« du Bq au Sv »

CEA, DAM/DIF/DASE

1 Introduction

Pourquoi développer un outil de calcul de conséquences sanitaires ?

Besoins rencontrés

Un outil qui permette le calcul des conséquences sur la population de rejets émis dans l'environnement en situation accidentelle et en fonctionnement normal

Calcul de l'impact à court, moyen et à long termes pour toutes les installations ainsi que pour les accidents de transport

Un outil qui prenne en charge l'ensemble des étapes du calcul d'impact

Outil modulaire, associé à des bases de données

Radionucléides : plus de 900 aujourd'hui

Sites

Dont on maîtrise le contenu (modèle et sources informatiques)

Sources maîtrisées : évolutions possibles pour suivre les exigences réglementaires / amélioration des connaissances

Assurance qualité : évolution des versions en **protégeant** les bases de données ⇒ participe à **l'assurance qualité**

Documentation – validation

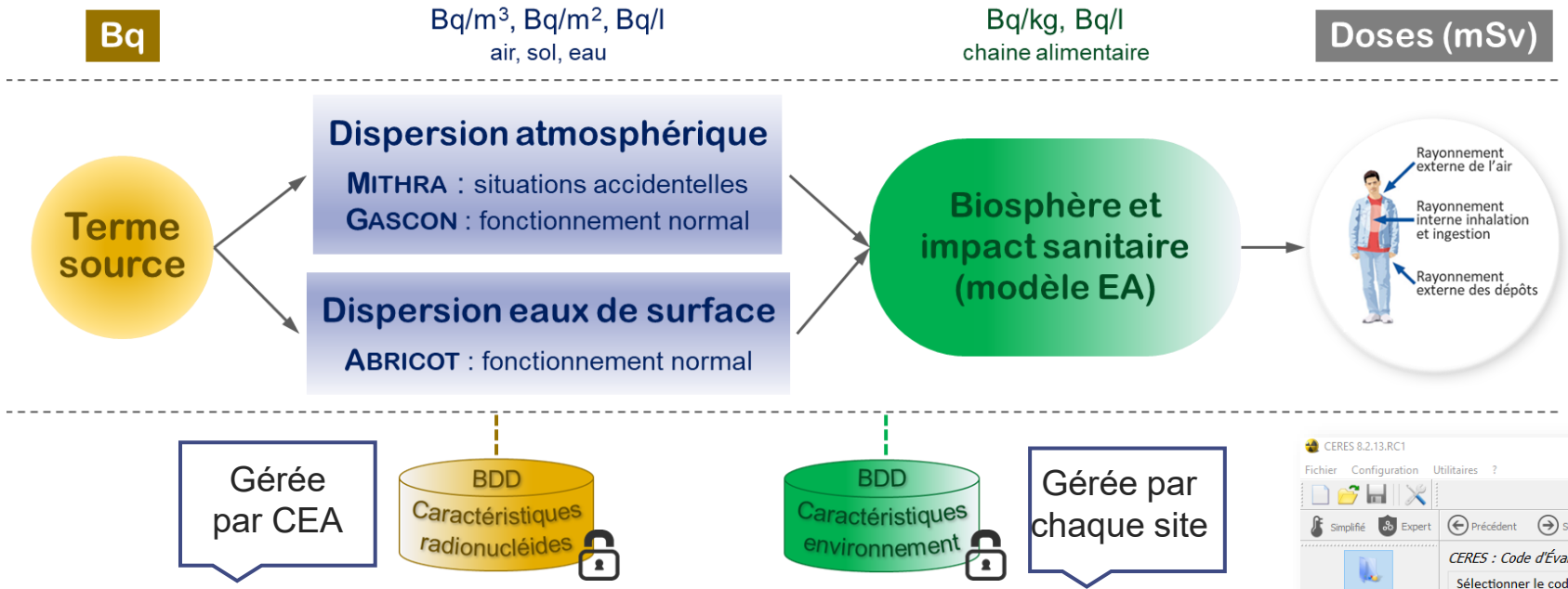
Développement d'un outil pour l'évaluation des conséquences sanitaires de rejets de radionucléides, utilisable quelle que soit l'installation *(au départ, uniquement pour les acteurs CEA)* et le type de rejet
Mêmes données de base quel que soit le scénario / l'installation

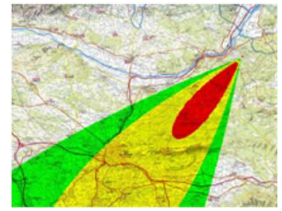
2 Plate-forme CERES

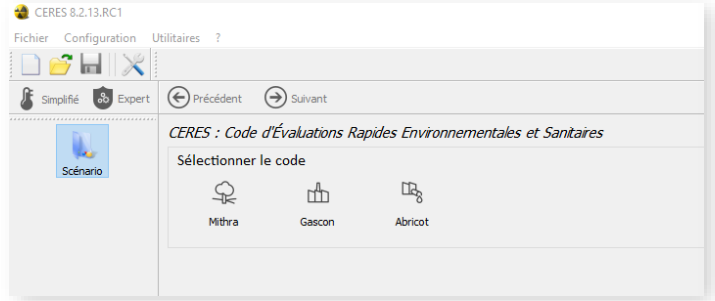
Code d'Evaluations Rapides Environnementales et Sanitaires

Plate-forme CERES

- **Jouvence nécessaire car outil existant ancien, évolutions impossibles**
- Outil modulaire intégré « **du Bq au mSv** »



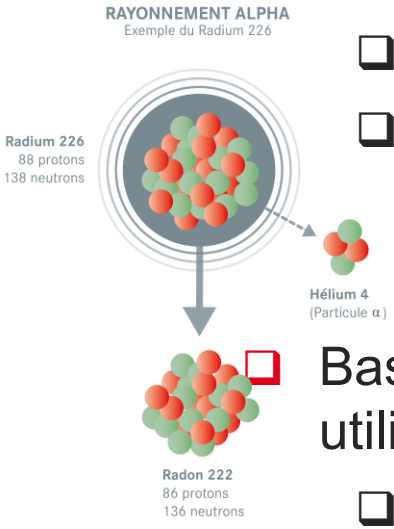




- Modèles et BDD versionnés, protégés, dépôt GIT (gestion de configuration) : démarche AQ

Données de la plate-forme CERES

- **Base de données des radionucléides, présents dans la publication 107(1) de la CIPR(2)**
  - ***Données nucléaires*** **:** période radioactive, filiations …
  - ***Coefficients de dose*** : externe et interne, efficace et à la thyroïde
  - ***Facteurs de transfert*** : produits de la chaîne alimentaire (végétaux et animaux) consommés par la population, coefficients de distribution dans l'environnement



- Base de données gérée par **un administrateur unique** et mise à disposition de **tous** les utilisateurs
  - données non modifiables
  - référence bibliographique indiquée

⇨ COHERENCE ENTRE DOSSIERS

(1) ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
(2) Commission internationale de protection radiologique

Données de la plate-forme CERES

- **Bases de données dites « sites »** :
  - ***Caractéristiques des installations :*** émissaires (position, hauteur)
  - ***Caractéristiques de l'environnement :*** cultures et élevages, nature des sols …
  - ***Caractéristiques des populations*** : localisation, rations alimentaires d'origine locale
- Bases gérées par un **responsable** sur **chaque site** et mises à disposition des utilisateurs du site
  - Données proposées par défaut dans l'interface, modifiables pour la plupart pour le calcul en cours (hauteur de rejet, débit rivière, consommation population et animaux)

  → **Cohérence** entre utilisateurs d'un même site

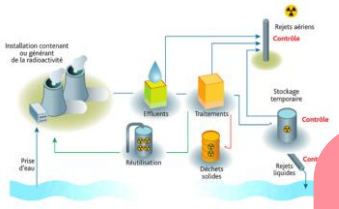
→ **Traçabilité** (versions des bases de données indiquées sur sorties Word® et Excel®). Éventuelles modifications des données « sites » indiquées dans les sorties.

Origine des données

- Données nucléaires : Publication 107[1] de la CIPR – seule une partie des RN présents dans cette publication est intégrée
- Coefficients de dose
  - Irradiation externe :
    - Arrêté 16/11/2023 (gaz rares) et publication 144[2] de la CIPR pour irradiation panache et irradiation par les dépôts surfaciques
    - Federal Guidance 15[3] pour irradiation par les dépôts suite aux rejets liquides
  - Efficace interne : arrêté du 16 novembre 2023 (diamètre aérosol 1 µm pour public)
    - Efficace (autres diamètres) et organe (thyroïde) : publication 72[4] de la CIPR
- Débit respiratoire : publication 66[5] de la CIPR, selon l'activité physique et l'âge
- Coefficients de transfert dans la chaîne alimentaire
  - TRS 472 (AIEA, 2010) si disponible (selon éléments et aliments)
  - Biblio internationale : AIEA, UIR, CEE, NRPB …
- Modèle spécifique pour HTO (Belot et Chamberlain) et radon (fonctionnement normal)

[1] ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
[2] ICRP, 2020. Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources. ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49(2).
[3] M. B. Bellamy, S. A. Dewji, R. W. Leggett, M. Hiller, K. Veinot, R. P. Manger, K. F. Eckerman, J. C. Ryman, C. E. Easterly, N. E. Hertel & D. J. Stewart - External Exposure External exposure to radionuclides in air, water and soil. Rapport EPA-402/R19/002, 2019
[4] ICRP, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 – Compilation of ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
[5] ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3).

Étapes de calcul



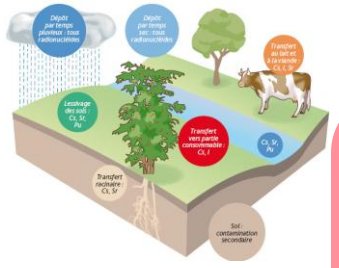
1. Évaluation de l'activité émise à l'environnement (Bq rejetés, durée) **ETAPE CLÉ**

En situation accidentelle :

À partir de l'inventaire d'activité présent dans l'installation (nature, localisation ...), définition de scénarios prenant en compte les rétentions, les voies de filtration, …

En fonctionnement normal :

Selon opérations réalisées, utilisation du débit de ventilation pour rejets atmosphériques



2. Évaluation de la dispersion atmosphérique ou liquide (Bq/m^3 et Bq/m^2)

→ concentrations dans l'air, sur le sol et dans l'eau (rejets liquides) aux points d'intérêt

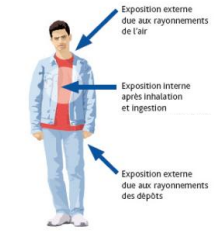
En situation accidentelle :

Population dans l'axe du vent, à des distances caractéristiques des groupes de population pour des conditions météorologiques représentatives du site, voire du moment de l'accident

En fonctionnement normal :

Pour les rejets atmosphériques, à la personne représentative, positionnée à sa vraie localisation dans l'espace, à l'aide avec la rose des vents du site

concentration dans l'eau en zone de bon mélange



Les voies d'exposition aux rayonnements

3. Évaluation de l'impact (mSv – accident - ou mSv/an – fonctionnement normal) : dose efficace et, si de l'iode est présent dans le rejet en situation accidentelle, dose équivalente à la thyroïde

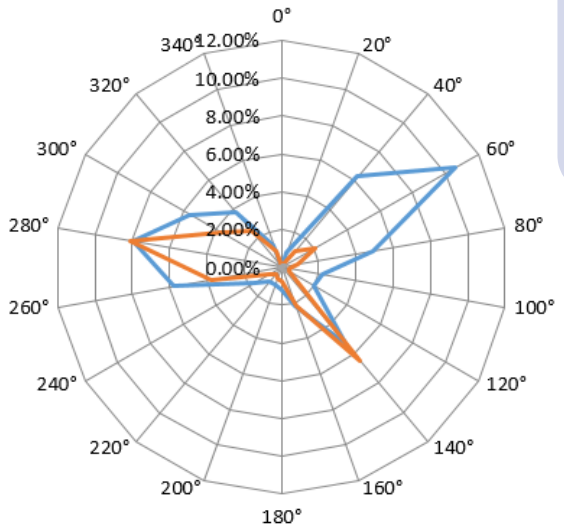
Dispersion dans l'atmosphère

- **Dispersion atmosphérique** : modèle gaussien de première génération > proportionnalité aux enjeux
- **Résultats** : **ordres de grandeur**, valables quelle que soit la direction d'où vient le vent : simplification des résultats présentés dans les dossiers
- Écarts-types de diffusion développés par A. Doury proposés par défaut mais utilisation possible d'écarts-types de type Briggs / Turner

En situation accidentelle :

Conditions météorologiques pouvant **varier dans le temps** (crise) **et constantes** dans **l'espace** : hypothèse valable vu la taille maximale du domaine d'étude (qques dizaines de km)

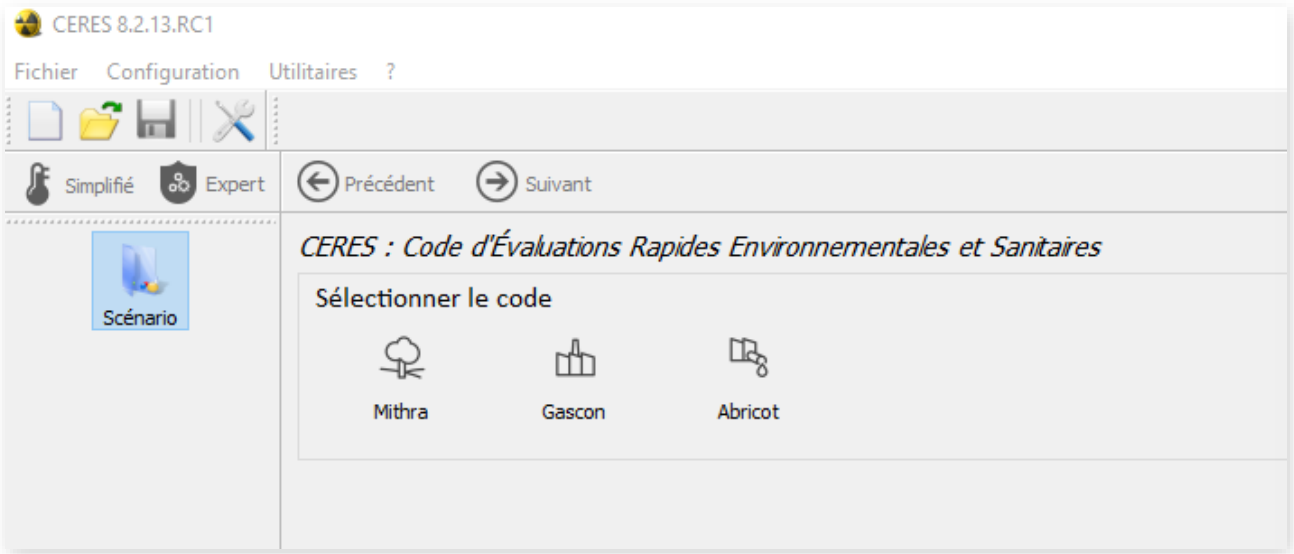
Battement de vent possible selon durée et cinétique de rejet

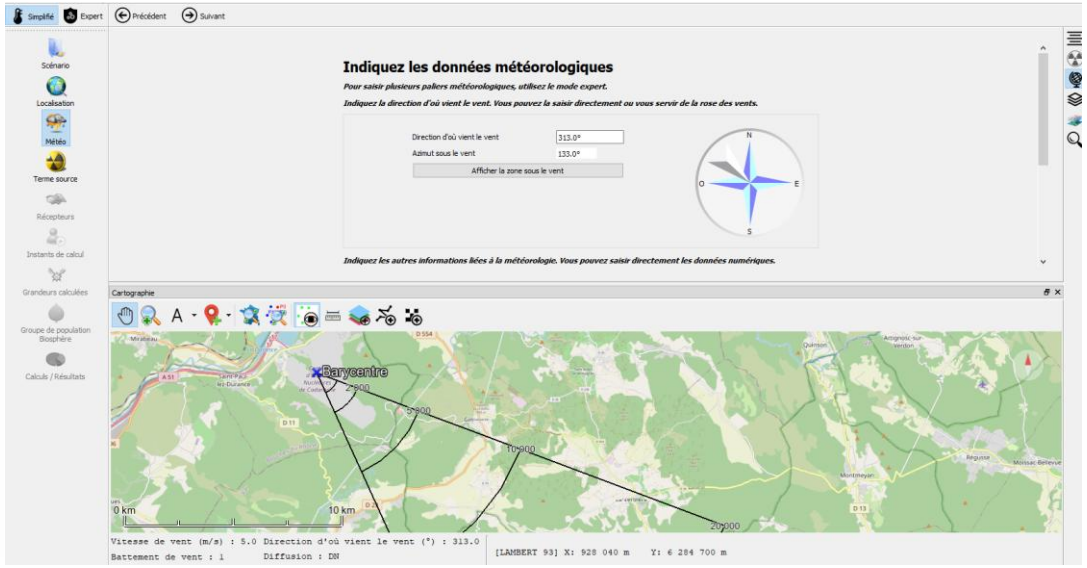


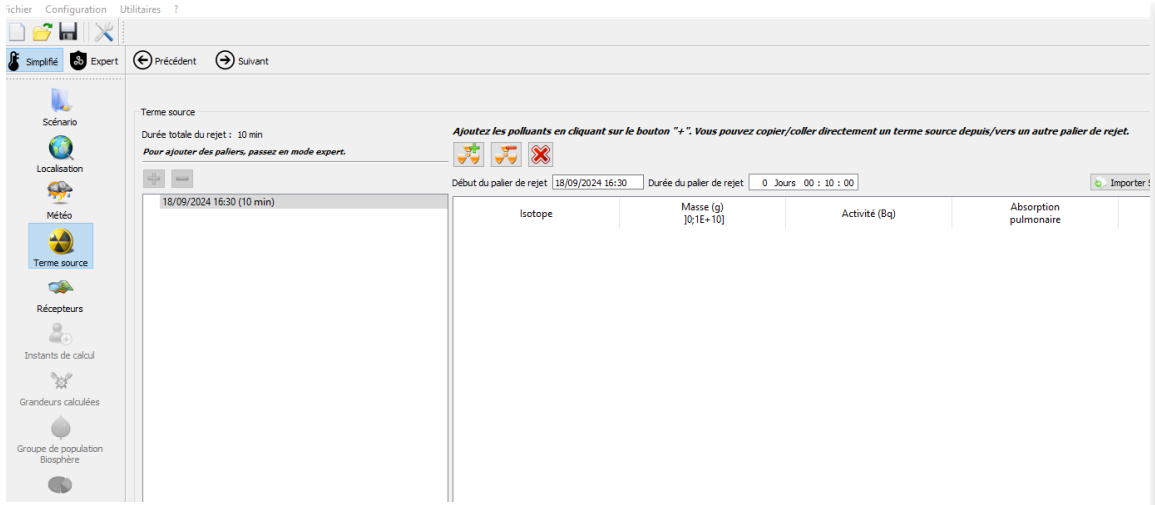
En fonctionnement normal :

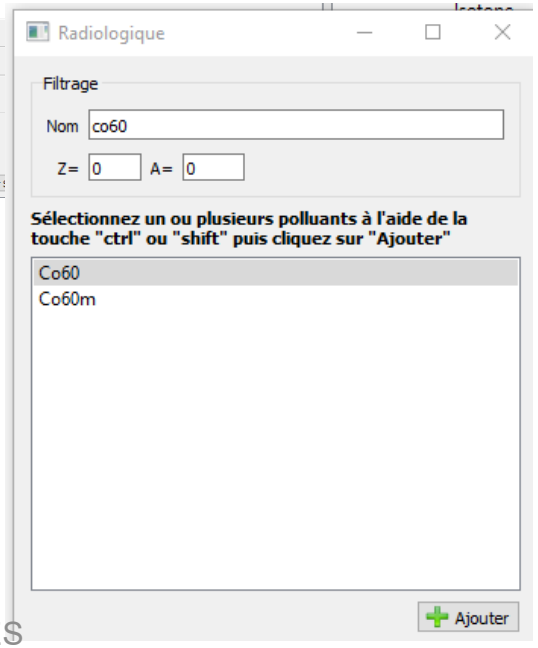
Utilisation des observations mesurées sur site ou à proximité

Jouvence de la plateforme : CERES 8

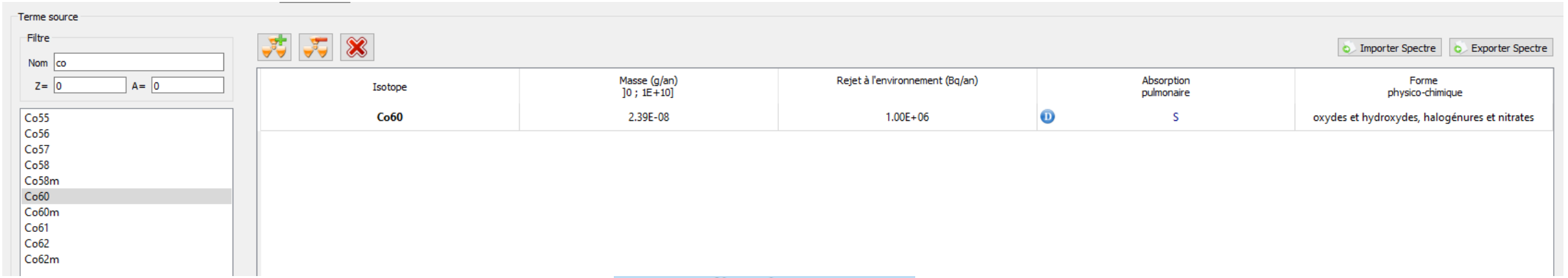


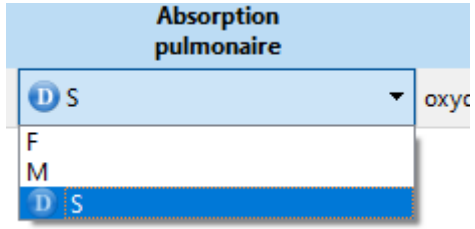






Jouvence de la plateforme : CERES 8





Absorption pulmonaire	Forme physico-chimique
M	composés non spécifiés

Dispersion dans l’eau

En fonctionnement normal – Code ABRICOT :

- ❑ Dispersion dans une « boîte » en zone de bon mélange
- ❑ La longueur de bon mélange est la distance, comptée depuis la source, à partir de laquelle l’activité volumique dans l’eau est homogène.

En situation accidentelle :

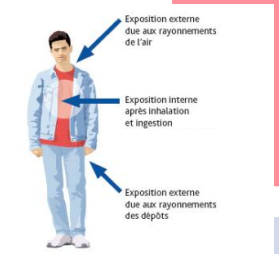
- ❑ Calculs de dispersion faits avec des outils complexes
- ❑ Activités ajoutées dans l’eau transférées à ABRICOT pour évaluation impact sanitaire en retenant les voies d’exposition pertinentes par rapport à la durée de passage du « panache » radioactif

Impact sanitaire

En situation accidentelle :

Dose efficace et dose équivalente à la thyroïde (si présence d'iode), intégrées pour différentes durées d'exposition

- ❑ Pour un scénario et des conditions météorologiques représentatives du site
- ❑ En intégrant sur **quelques heures / jours** (court terme), **1 an** (moyen terme) et **50** ou **70 ans** (vie entière pour adultes ou enfants – long terme)
  - ❑ sans l'ingestion à court terme
  - ❑ avec l'ingestion pour moyen et long termes si pertinent selon population étudiée, en utilisant une ration alimentaire d'origine locale, définie par classe d'âge, représentative du site



Les voies d'exposition aux rayonnements

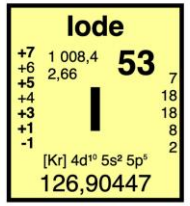
En fonctionnement normal :

Evaluation de la dose efficace annuelle, prenant en compte l'accumulation des dépôts dans l'environnement en fonction du nombre d'années de fonctionnement de l'installation

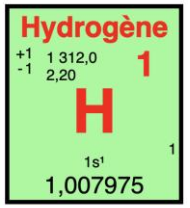
- ❑ Avec le même rejet à débit moyen annuel et les mêmes conditions de dispersion (météo ou débit du milieu récepteur)
- ❑ Prise en compte de la voie « ingestion » si pertinent selon groupe de population étudié, en utilisant une ration alimentaire d'origine locale, définie par classe d'âge, représentative du site

Phénomènes particuliers

- Différentes formes physico-chimiques à l'émission pour la plupart des radionucléides de l'iode
  - Élément pouvant être présent sous forme aérosol, vapeur, organique
  - Comportement différent dans l'installation (dépôts dans l'enceinte, rétention par THE ou piège à iode)
  - Vitesse de dépôt par temps sec et appauvrissement associé lors de la dispersion atmosphérique fonction de la forme à l'émission
  - Taux de lavage par la pluie fonction de la forme à l'émission
  - Coefficients de dose interne par inhalation fonction de la forme à l'émission



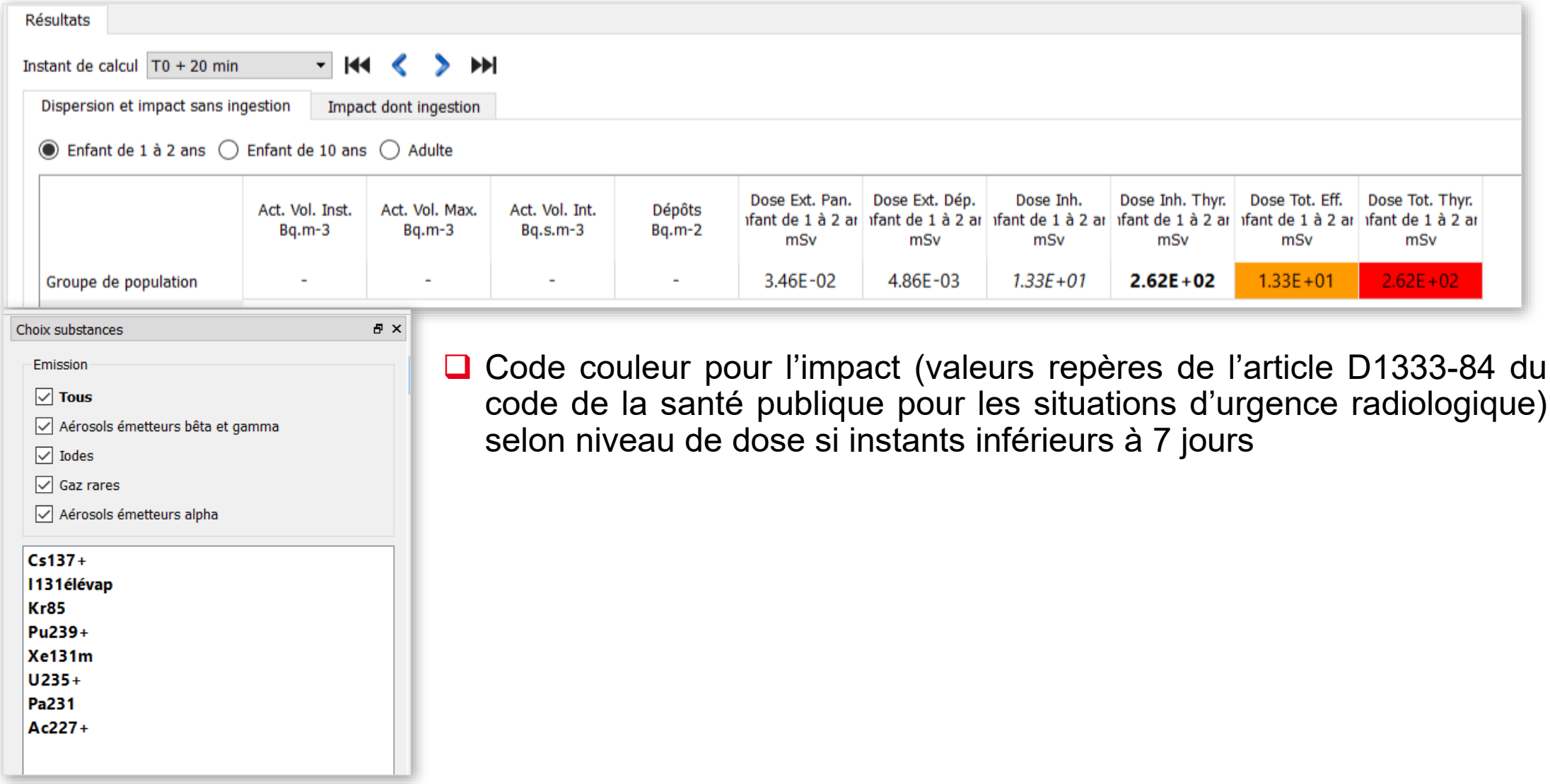
- Modèle spécifique pour le tritium
  - Émission sous forme gaz (HT) ou eau tritiée (HTO)
  - Dispersion atmosphérique différentes, transfert dans les végétaux pour HTO
  - Dans le sol, transformation HT en HTO, plus pénalisant pour l'impact sanitaire
  - Dose transcutanée due à l'eau tritiée = 50% de la dose par inhalation pour les rejets atmosphériques
  - Transformation de l'eau tritiée en tritium organique (TOL) dans la chaîne alimentaire



DPUI : dose par unité d'incorporation – Sv/Bq

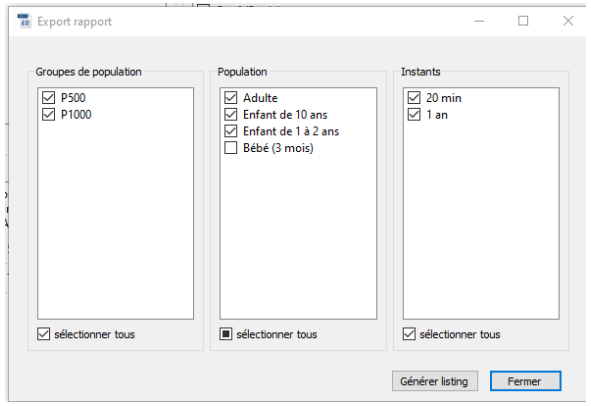
3. Résultats

Résultats en situation accidentelle : interface



- Code couleur pour l'impact (valeurs repères de l'article D1333-84 du code de la santé publique pour les situations d'urgence radiologique) selon niveau de dose si instants inférieurs à 7 jours

Édition des résultats – sortie Word®



En situation accidentelle :

- pour des instants inférieurs à 7 jours, comparaison des doses efficaces hors ingestion et, le cas échéant, des doses équivalentes à la thyroïde, aux valeurs repères présentées dans le code de la santé publique
  - vert : doses inférieures aux valeurs repères
  - orange : dose efficace comprise entre 10 et 50 mSv,
  - rouge : dose efficace ou dose équivalente à la thyroïde supérieure à 50 mSv
- 2 tableaux : dose efficace - dose équivalente à la thyroïde (seulement si rejet d'iode en situation accidentelle) par classe d'âge

Sortie Word® en situation accidentelle

Adulte

Exposition pour les différentes voies d'atteinte (mSv)

Nom	pt500 (500 ; 0)	pt2000 (2000 ; 0)	pt5000 (5000 ; 0)
Irradiation panache			
2 jours	3.3E-01	3.0E-02	5.5E-03
Inhalation			
2 jours	1.2E+01	1.0E+00	1.9E-01
Exposition aux dépôts			
2 jours	3.1E+00	2.8E-01	5.0E-02
Totaux			
Total 2 jours	1.5E+01	1.4E+00	2.5E-01

+ la plupart des hypothèses du cas

Dose à la thyroïde

Interprétation des résultats de doses à la thyroïde

<50 mSv Aucune mesure prise	≥50 mSv Ingestion d'iode stable

Enfant de 1 à 2 ans

Exposition pour les différentes voies d'atteinte (mSv)

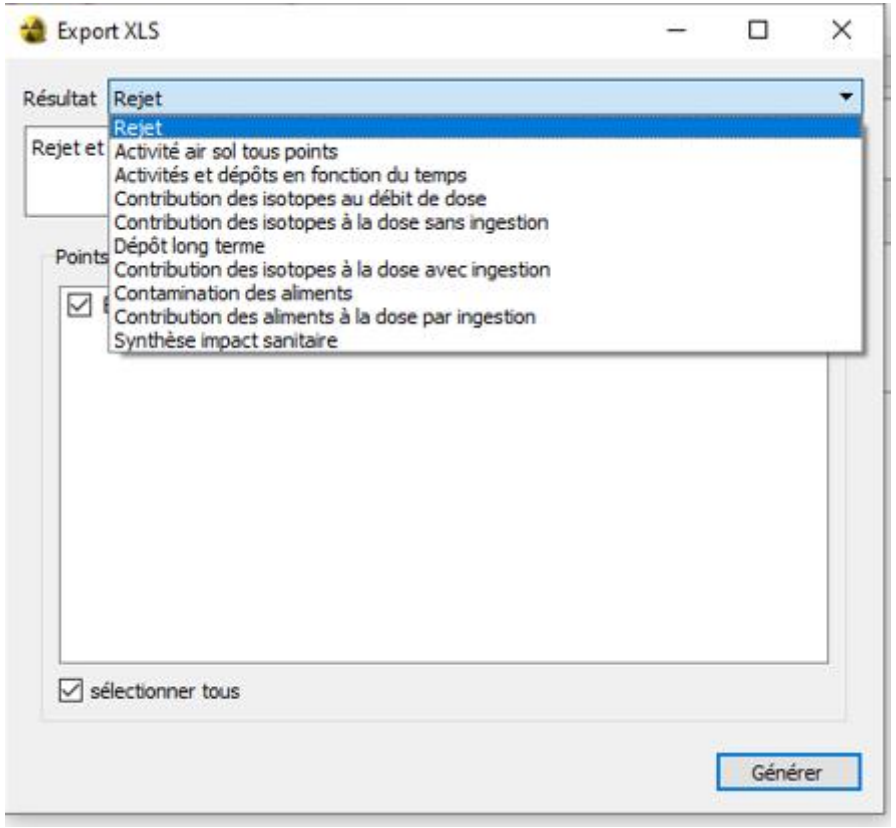
Nom	pt500 (500 ; 0)	pt2000 (2000 ; 0)	pt5000 (5000 ; 0)
Irradiation panache			
2 jours	3.3E-01	3.0E-02	5.5E-03
Inhalation			
2 jours	1.4E+02	1.3E+01	2.3E+00
Exposition aux dépôts			
2 jours	3.1E+00	2.8E-01	5.0E-02
Totaux			
Total 2 jours	1.5E+02	1.3E+01	2.4E+00

Adulte

Exposition pour les différentes voies d'atteinte (mSv)

Nom	pt500 (500 ; 0)	pt2000 (2000 ; 0)	pt5000 (5000 ; 0)
Irradiation panache			
2 jours	3.3E-01	3.0E-02	5.5E-03
Inhalation			
2 jours	6.7E+01	5.9E+00	1.1E+00
Exposition aux dépôts			
2 jours	3.1E+00	2.8E-01	5.0E-02
Totaux			
Total 2 jours	7.1E+01	6.2E+00	1.1E+00

Résultats sous forme de tableaux en situation accidentelle



Résultat en situation accidentelle : contamination des aliments

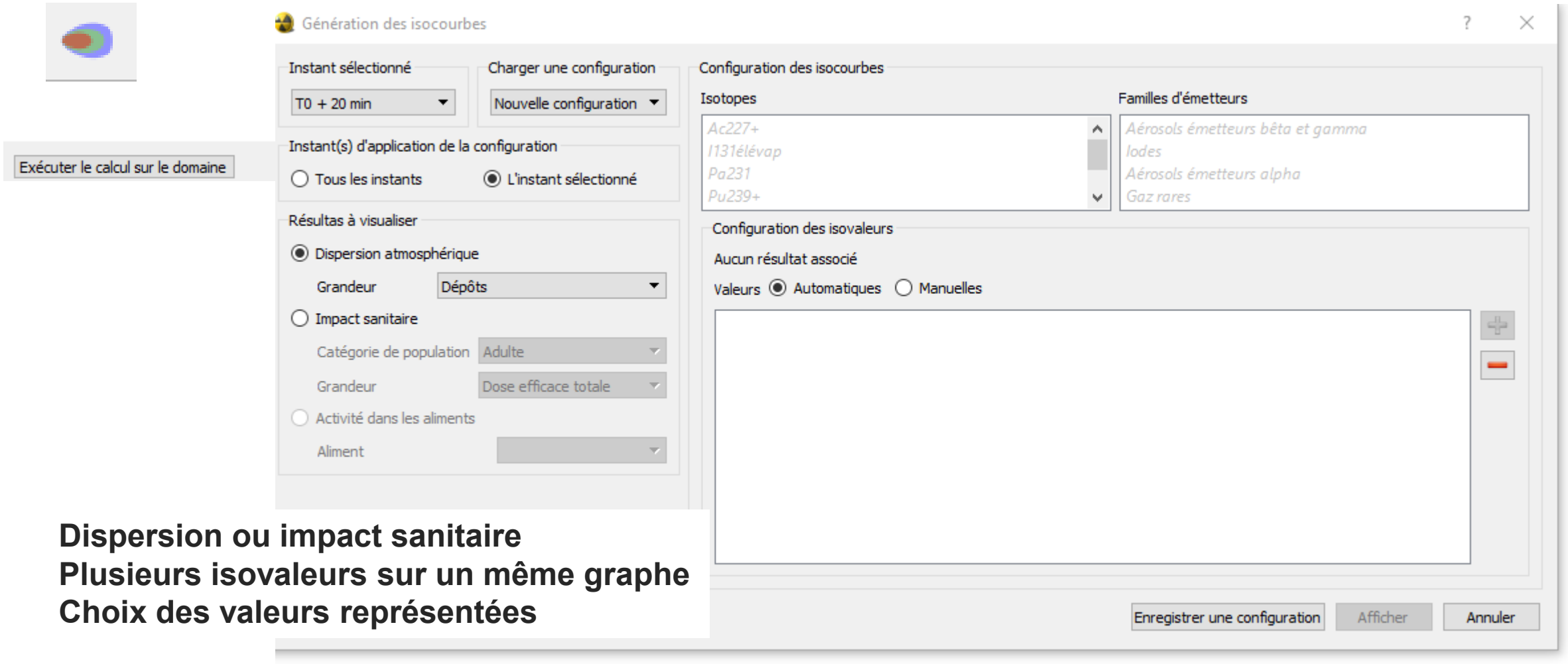
P1000 (1000m, 0m)

Isotope	Activité ajoutée dans les aliments (Bq.kg-1 ou Bq.L-1)					
	5.58E-27	4.81E-27	3.29E-25	4.65E-24	5.49E-25	2.20E-25
	3.77E+04	6.84E+02	3.58E+04	3.14E+05	5.97E+04	2.90E+04
	1.23E-20	1.06E-20	7.25E-19	1.02E-17	1.21E-18	4.84E-19
	6.25E-02	3.91E-03	3.13E-01	5.21E+00	5.68E-01	1.88E-01
	1.74E-16	1.50E-16	1.03E-14	1.45E-13	1.71E-14	6.87E-15
	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Isotopes de l'iode	3.77E+04	6.84E+02	3.58E+04	3.14E+05	5.97E+04	2.90E+04
Isotopes de période supérieure à 10 jours (sauf H3, C14 et K40)	1.74E-16	1.50E-16	1.03E-14	1.45E-13	1.71E-14	6.87E-15
Isotopes du plutonium et transplutoniens émetteurs alpha	6.25E-02	3.91E-03	3.13E-01	5.21E+00	5.68E-01	1.88E-01
Limites de commercialisation (Bq.kg-1)						
Isotopes de l'iode	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03
Isotopes de période supérieure à 10 jours (sauf H3, C14 et K40)	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03
Isotopes du plutonium et transplutoniens émetteurs alpha	8.00E+01	8.00E+01	8.00E+01	8.00E+01	8.00E+01	8.00E+01

En situation accidentelle, codes couleur pour vérifier le positionnement des activités ajoutées par rapport aux niveaux maximums admissibles dans les aliments (cf. règlement 2016/52/Euratom du Conseil du 15 janvier 2016), y compris pour la somme du ^{134}Cs et du ^{137}Cs dans les aliments pour animaux
Même type de résultats en fonctionnement normal, sans tests couleur

Résultats

Cartographie : isovaleurs de dispersion et de doses : gestion de crise – utilisation possible de fonds de carte osm



Dispersion ou impact sanitaire
Plusieurs isovaleurs sur un même graphe
Choix des valeurs représentées

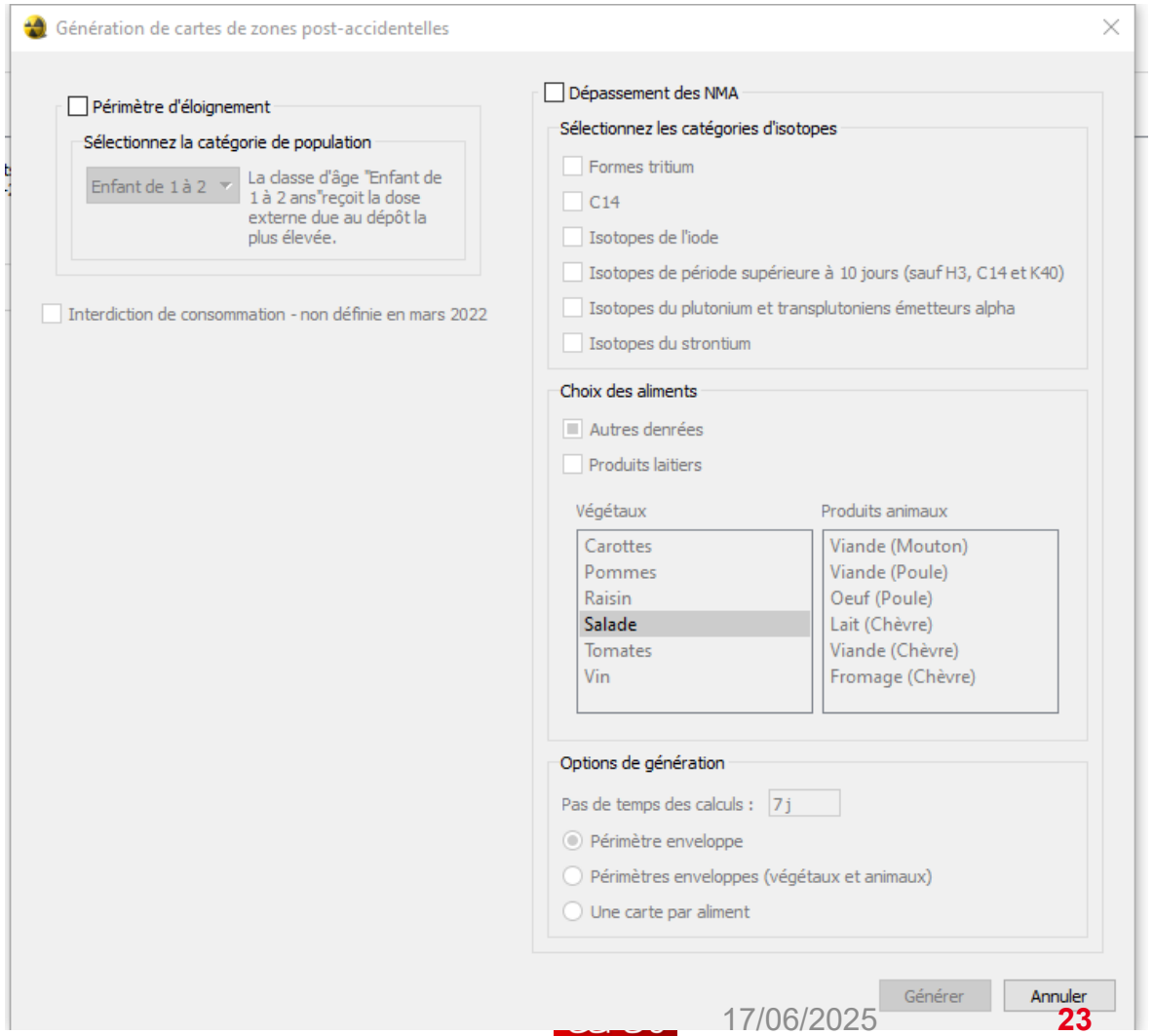
Résultats

Zonage post accidentel

Gestion de crise

Périmètre d’éloignement : enfants de 1 à 2 ans par défaut

Dépassement des NMA



4. Validation

Validation des modèles

- Dispersion atmosphérique en situation accidentelle : comparaison des résultats fournis par MITHRA avec ceux fournis par SIROCCO (ex code « IPSN ») et code de crise IRSN (krX de la plate-forme C3X)

- Impact à court terme (hors ingestion) des rejets accidentels : comparaison des résultats fournis par MITHRA-EA avec ceux fournis par le code de crise IRSN (krX) : *différences liées aux débits respiratoires et aux coefficients de dose externe*

- Dispersion atmosphérique fonctionnement normal : comparaison des résultats de CTA fournis par GASCON avec ceux fournis par COTRAM (IPSN) sur sites CEA

- Rejets émis à l'environnement en situation accidentelle : comparaison des résultats fournis par ERASTEM avec ceux fournis par le code CASIMIR (IRSN)

5. Améliorations apportées

Améliorations

- Langage de programmation plus moderne :
  - Possibilités d'évolution
  - Installation simplifiée
  - Rapidité des calculs et de l'édition des résultats
  - Augmentation du nombre d'isotopes possible dans un même calcul
  - Licences dédiées à un poste, à durée limitée
- Coefficients de dose externe fonction de l'âge
- Cartographie intégrée
- Prise en compte du zonage post-accidentel

Merci

Mise à jour le 16/06/2025

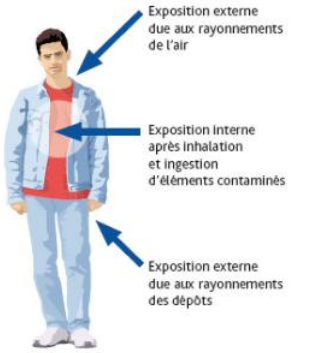
5. Au cas où

Impact sanitaire – voies d'exposition prises en compte

1. **Irradiation par le panache :** pour les rejets atmosphériques uniquement
2. **Irradiation par les dépôts** formés suite aux rejets atmosphériques ou liquides (suite à irrigation)
3. **Inhalation :** lors de la dispersion atmosphérique ou suite à la remise en suspension des dépôts apportés par irrigation (rejets liquides → besoin de connaître la teneur en poussières, le temps de présence par lieu et les débits respiratoires, par classe d'âge)
   - ❑ Débit respiratoire, fonction de l'âge et de la situation (activité physique modérée / moyenne journalière)
   - ❑ Pour les aérosols, coefficients de dose par inhalation fonctions de la forme physico-chimique et de la granulométrie (par défaut, 1 µm pour le public)
   - ❑ Calcul de doses efficaces et de doses équivalentes à la thyroïde si de l'iode est présent dans les rejets atmosphériques en situation accidentelle

   Si eau tritiée, dose transcutanée = 50% de la dose par inhalation due à HTO (rejets atmosphériques)
4. **Ingestion**
   - ❑ Rations alimentaires, fonction de l'âge et du site – enquêtes sur le terrain : consommation de végétaux et de produits animaux d'origine locale (aliments en base de données RN)
   - ❑ Pour les rejets liquides, consommation d'eau, par les humains et les animaux, ainsi que de poisson
   - ❑ Calcul de doses efficaces et de doses équivalentes à la thyroïde si de l'iode est présent dans les rejets atmosphériques en situation accidentelle

Population étudiée



Les voies d'exposition aux rayonnements

- **Personne représentative – cf. Directive Européenne 2013-59**

  « Personne recevant une dose qui est représentative des personnes les plus exposées au sein de la population, à l'exclusion des personnes ayant des habitudes extrêmes ou rares »

- Caractérisée par :
  - Son âge (3 classes d'âge – cf. publication 101(*) de la CIPR)
  - Son débit respiratoire (en fonction de son activité)
  - Les rations alimentaires d'origine locale par classe d'âge

- Sur un site, plusieurs personnes représentatives peuvent être définies en fonction de leurs habitudes de vie, de la nature des rejets ou des conditions de dispersion

(*) ICRP, 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public, ICRP Publication 101 a, Ann. ICRP 36 (3) - ICRP, 2006. The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process. ICRP Publication 101 b, Ann. ICRP 36 (3)

Interprétation de l'impact sanitaire

En situation accidentelle :

Dose efficace, à comparer avec :

- ❑ les objectifs de sûreté définis pour l'installation selon la fréquence d'occurrence de la situation étudiée
- ❑ les valeurs repères présentées dans l'article D.1333-84 du code de la santé publique (urgence) (**court terme** – pas d'ingestion)
  - ❑ 10 mSv : recommandation de mise à l'abri
  - ❑ 50 mSv : recommandation d'évacuation

Dose équivalente à la thyroïde à comparer avec :

- ❑ la recommandation d'administration d'iode stable pour les situations susceptibles d'être à l'origine d'émissions d'iode radioactif si **la dose équivalente à la thyroïde dépasse 50 mSv** (valeur repère présentée dans l'article D.1333-84 du code de la santé publique)

En fonctionnement normal :

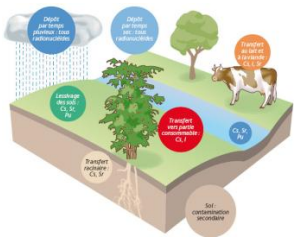
Dose efficace : à comparer à la limite de dose de 1 mSv par an résultant de l'ensemble des activités nucléaires, définie dans l'article R1333-11 du code de la santé publique (toutes voies, rejets atmosphériques et liquides et toutes origines, sauf diagnostic thérapeutique, situations d'urgence radiologique et exposition professionnelle)

6. Sources d’incertitudes

Sources d'incertitudes

Incertitudes à toutes les étapes du calcul : rejet, dispersion, impact

- Rejet : calculé, composition isotopique fournie par l'installation
- Transfert dans l'environnement :
  - Hauteur de rejet
  - Conditions météo, vitesse de vent, pluie, stabilité atmosphérique ?
  - Forme physico-chimique : transfert, vitesse de dépôt par temps sec
  - Granulométrie des aérosols → vitesse de dépôt par temps sec



- Impact
  - Débits respiratoires
  - Transfert dans la chaîne alimentaire et coefficients de distribution dans les sols : données génériques AIEA
  - Rations des humains et des animaux : Origine ? Représentativité ?
    - Enquête sur une courte période, en période de pleine production / consommation, extrapolée à l'année

Les voies d'exposition aux rayonnements