



l'Assemblée générale de l'ARRAD au CERN



Les aspects environnementaux radiologiques des accélérateurs du CERN

Pavol Vojtyla

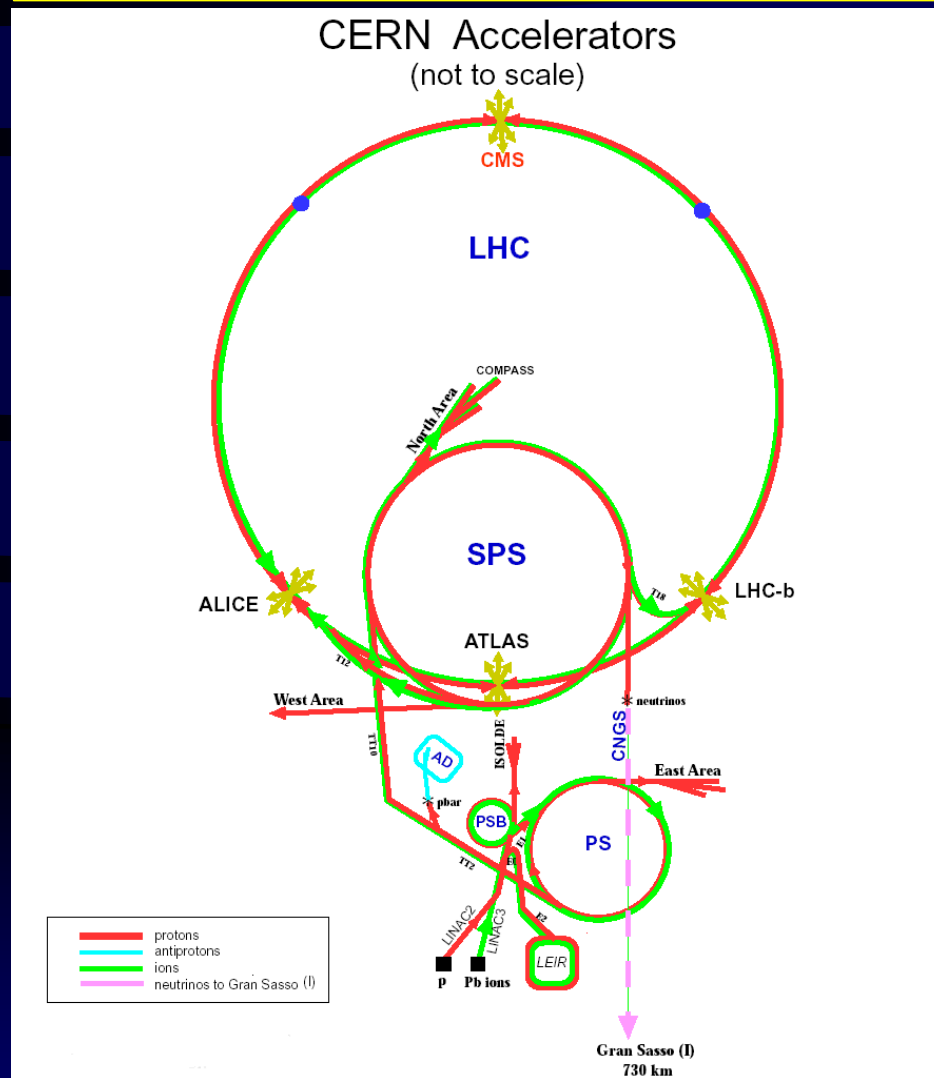
CERN, Commission de Sécurité

<http://www.cern.ch/environment>

Résumé

- Les accélérateurs du CERN
- La source : pertes de faisceau
- Rayonnements et activation
- Surveillance
- Evaluation de l'impact radiologique
- L'impact réel (2007)
- Perspective

Les accélérateurs du CERN



- Linacs
- PSB
- PS
- SPS
- (LHC)
- Zones d'expérience
 - ISOLDE
 - AD, LEIR, n-TOF
 - East Hall
 - Prévessin
 - CNGS
 - CTF3

La source : Pertes de faisceau

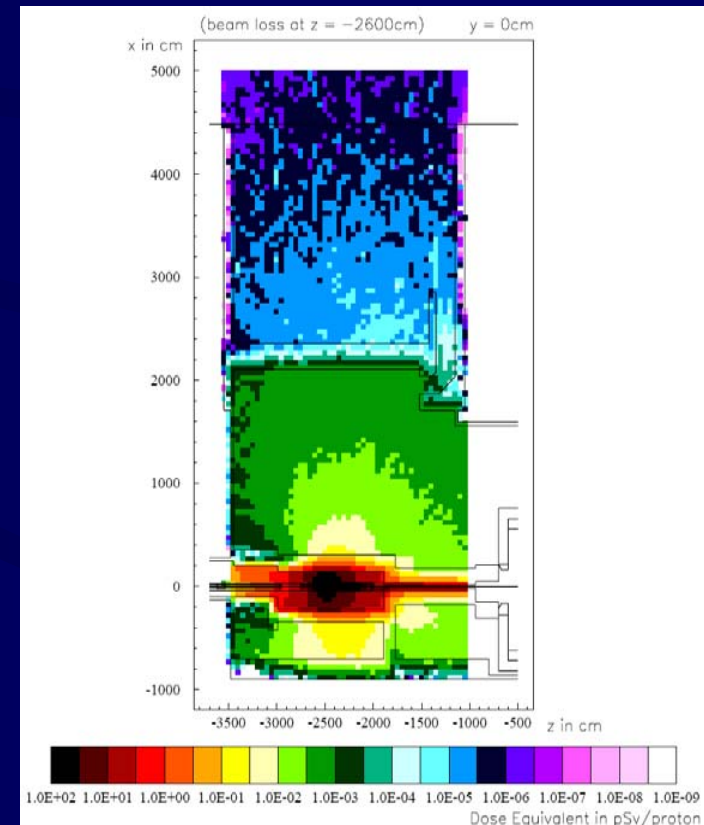
- Les particules de haute énergie doivent interagir avec la matière pour générer les rayonnements et pour activer les matériaux
 - Collimateurs
 - Les éléments d'extraction de faisceau (kicker)
 - Cibles
 - Détecteurs
 - Arrêts de faisceau (beam dump)

La différence fondamentale

- Accélérateurs à hadrons (p, IL)
 - Cascades de hadrons (p, n, n-bar, p-bar, $\pi^{0,\pm}$, K, γ , $e^\pm$, $\mu^\pm$)
 - Activation des matériaux
 - Rayonnement synchrotrique négligeable
- Ex. : SPS, LHC
- Accélérateurs à leptons (e^+e^-)
 - Seulement cascades électromagnétiques (γ , $e^\pm$, $\mu^\pm$)
 - Rayonnement synchrotrique
 - Activation des matériaux négligeable
- Ex. : LEP, CLIC

Rayonnements diffusés (RD)

- Pour diffuser dans l'environnement RD doivent passer des couches épaisses de matériaux
 - Blindage (fin)
 - Terre (installations souterraines)
- Doivent être **pénétrants**
 - Neutrons
 - Muons
 - Photons



Simulation FLUKA (Roesler et al.)

Rayonnements diffusés: Neutrons

- Evaporation à partir des noyaux hautement excités
- Modération dans le blindage
- Gamme d'énergie de la région thermique jusqu'à ~ 10 MeV (E_B d'un nucléon)
- Diffusion forte (p. e. couloirs et galeries)
- Ils activent les matériaux [p. e. réactions (n,γ)]

Rayonnements diffusés: Muons

- Progéniture de $\pi^\pm$ (K)
- Toutes les énergies
- D'habitude particules à ionisation minimale ($\sim \text{GeV}/c$)
- Difficile à arrêter par un blindage «raisonnable»
- Restent bien focalisés
 - Dans le plan d'un accélérateur souterrain (SPS, LHC)
 - Les faire dévier par un aimant dans la terre ou dans le ciel (expériences avec des cibles fixes)

Rayonnements diffusés : Photons

- Cascade électromagnétique, qui se propage
- Mélange de γ et $e^\pm$
- Spectre équilibré : Apport de photons à partir de la région d'énergies hautes dans la région d'énergies basses par la diffusion Compton
- Jusqu'à 10 MeV (épaule neutronique)

RD : Structure dans le temps

- Caractéristique importante : Rayonnement pulsé
- Deux cas extrêmes :
 - Super-cycle du PS : $\sim 0.1 \mu\text{s}$ chaque 12 s
 - Collisionneurs : Série des paquets / quelques dizaines de ns entre deux paquets $\rightarrow$ Structure quasi-continue
- **Neutrons** sont désynchronisés pendant leur modération
- **Photons** et **muons** suivent la structure

Substances radioactives (1)

- Réactions de spallation (radionucléides avec déficit en n, β^+ , EC)
- Capture de n thermiques (radionucléides avec excès de n, β^-)
- Emetteurs β/γ , pas d' α contrairement aux CN
- Le matériel de la cible : A plus grand $\Rightarrow$ plus de possibilités $\Rightarrow$ plus d'espèces dans le zoo
- Grande gamme des périodes radioactives
- Plus est la période courte, plus est l'activité haute : $A = \lambda N$
- Mais, les radionucléides avec des périodes très courtes se désintègrent avant arriver à l'environnement et leurs restes sont radiologiquement peu importants

Substances radioactives (2)

- Transport dans l'environnement par les fluides
 - Air
 - Ventilation des zones avec faisceaux (refroidissement par air)
 - Eau
 - Circuits de refroidissement (d'habitude fermés, circuits primaires équipés par échangeurs d'ions, qui retiennent les ions, p. e. $^7\text{Be}^+$, $^{24}\text{Na}^+$)
 - Fuites diverses
 - Infiltration de l'eau pluviale dans les tunnels
 - Particules de terre et de béton, poussières, fragments de corrosion

Substances radioactives : l'air

- Activation directe
 - Noyaux cible dans l'air pure :
 O_2 , N_2 , Ar, CO_2
- Poussières
 - Comme terre et béton
 - A discuter plus tard
- HTO évaporée
- Principaux avec périodes courtes
 - ^{11}C , ^{13}N , $^{14,15}O$ (β^+)
 - ^{41}Ar [β^- , (n, γ) sur ^{40}Ar]
- Principaux avec périodes longues
 - 7Be (EC)
 - 3H (HT), ^{22}Na
- Autres
 - ^{10}Be , ^{14}C , ^{19}O , ^{18}F , $^{23,24}Ne$, ^{24}Na ,
 ^{25}Na , $^{27,28}Mg$, $^{26,28,29}Al$, $^{31,32}Si$,
 $^{30,35,32,33}P$, $^{37,38}S$, $^{34m,36,38,39,40}Cl$,
 $^{37,39}Ar$, $^{38,40}K$

Substances radioactives : l'eau

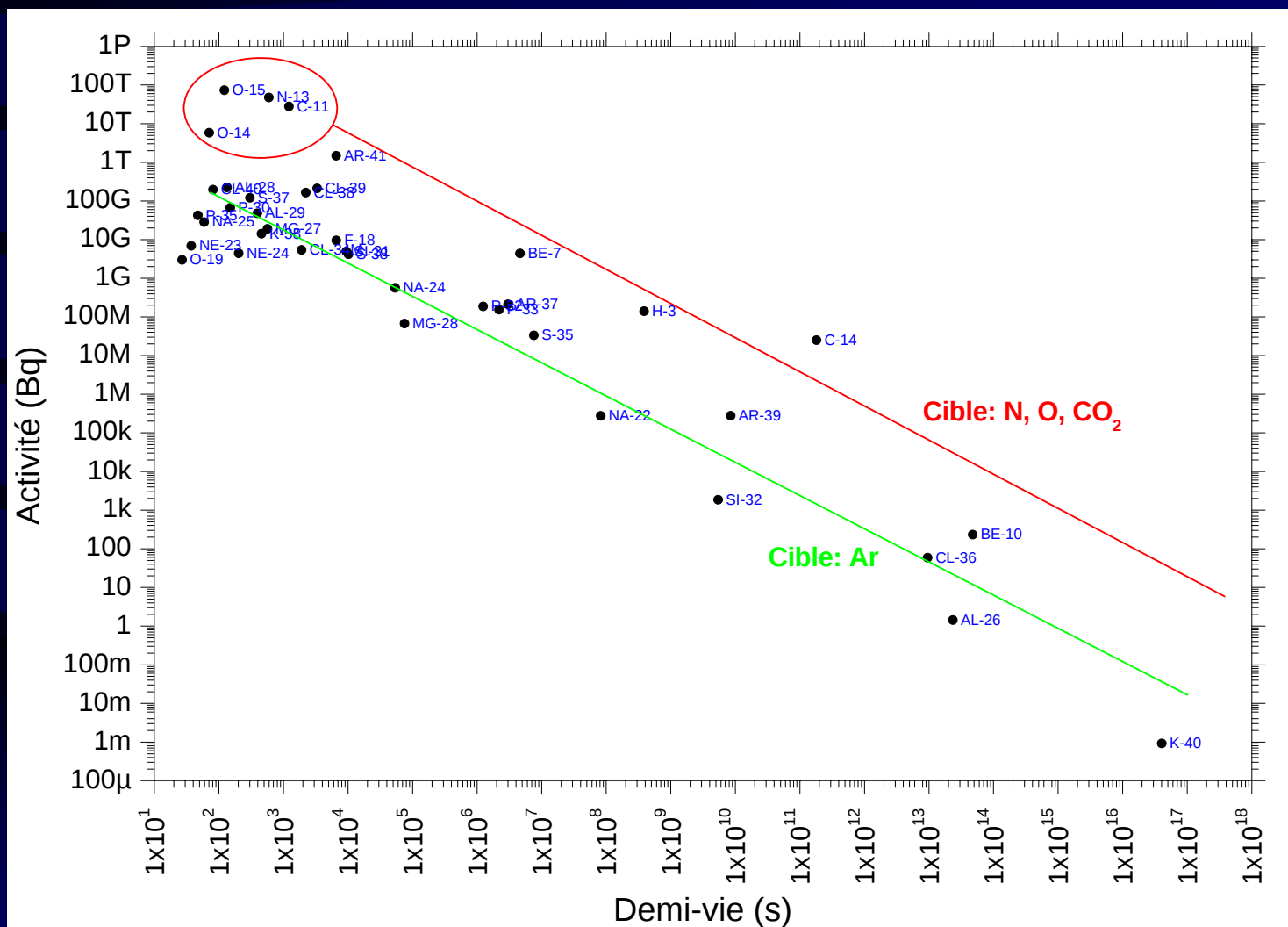
- Activation direct
 - Noyaux cible : H_2O
- Particules
 - Comme terre et béton
 - A discuter plus tard
- Minéraux et additifs
 - ^{24}Na
- Lixiviation
 - ^3H , ^{24}Na , ^{22}Na (solubles)
- Principaux avec périodes courtes
 - ^{11}C , ^{13}N , $^{14,15}\text{O}$ (β^+)
- Principaux avec périodes longues
 - ^3H (HTO)
 - ^7Be (EC)

Substances radioactives : particules

- Noyaux cible avec A élevés
 - Désintégration radioactive versus mobilité
 - Sélection
 - Parfois radionucléides inattendus
- ^3H , ^7Be ,
 - ^{22}Na , ^{24}Na
 - ^{46}Sc , ^{48}V , ^{54}Mn ,
 - ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co
 - ^{65}Zn
 - ^{134}Cs (!)
 - ^{152}Eu (!)

A part le ^3H , ses activités sont 2 – 3 ordres de grandeur au dessous de celle du ^7Be , mais ils sont à considérer.

Simulation : Rejets d'air du LHC PA7 (collimateurs)



Surveillance

- Rejets des substances radioactives (l'air, l'eau)
- Rayonnements diffusés
- Mesures de la radioactivité dans des échantillons d'environnement divers
- Impacts environnemental et radiologique
- Rapports
 - Management du CERN
 - Autorités des Etats Hôtes
 - Publique

Surveillance : stations de ventilation



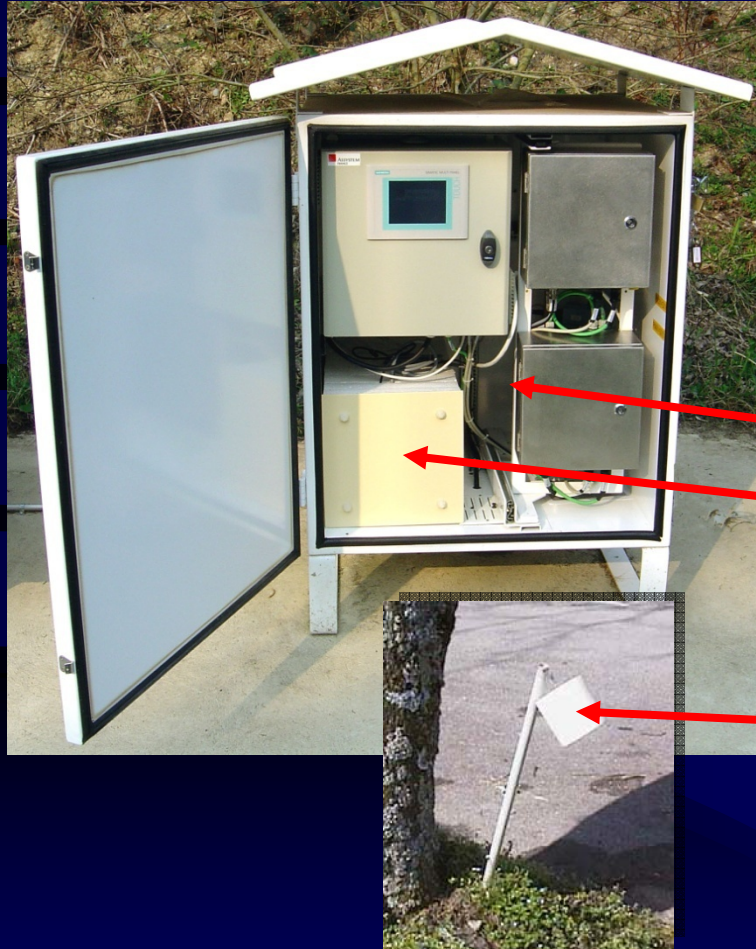
- Détecteurs à Si de grand surf.
 - Gaz de périodes courtes
 - ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar
 - Données en temps réel (on-line)
- Filtre à aérosols
 - Analyse dans le laboratoire
 - ^7Be , ^{22}Na , ^{46}Sc , ^{48}V , ^{54}Mn , ^{60}Co ...
- Débit d'air dans la cheminée
 - Données en temps réel (on-line)
- Bilans mensuels de l'activité rejetée

Surveillance : stations de rejet d'eau



- A la fin du réseau de canalisation
- Moniteur
 - Sonde NaI dans blindage
 - Spectrométrie pour les radionucléides de périodes courtes (^{11}C , ^{13}N , ^{24}Na)
 - Données en temps réel (on-line)
- Echantillonneur
 - Analyse dans le laboratoire
 - ^3H , ^7Be , ^{22}Na , bêta global
- Débit d'eau
- Bilans mensuels des activités rejetées

Surveillance : rayonnements diffusés



- Deux types de rayonnement
 - Neutrons
 - Photons et particules chargées pénétrantes (μ)
- Deux types d'instrument
 - Compteur-rem (n)
 - Chambre à ionisation (20 atm. Ar)
- Débit de dose en temps réel
- ~ 400 TLD ($^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$)
- Doses trimestrielles

Surveillance : Dispersion atmosphérique



- 5 anémomètres à ultrason sur 100 km²
- Moyens sur 10 min
- Paramètres de turbulence atmosphérique (class de stabilité inclus)
- Précision de la vitesse : 0,01 m/s
- 2 pluviomètres (pour deposition)
- Données en temps réel (on-line)

Surveillance : Echantillons d'environnement

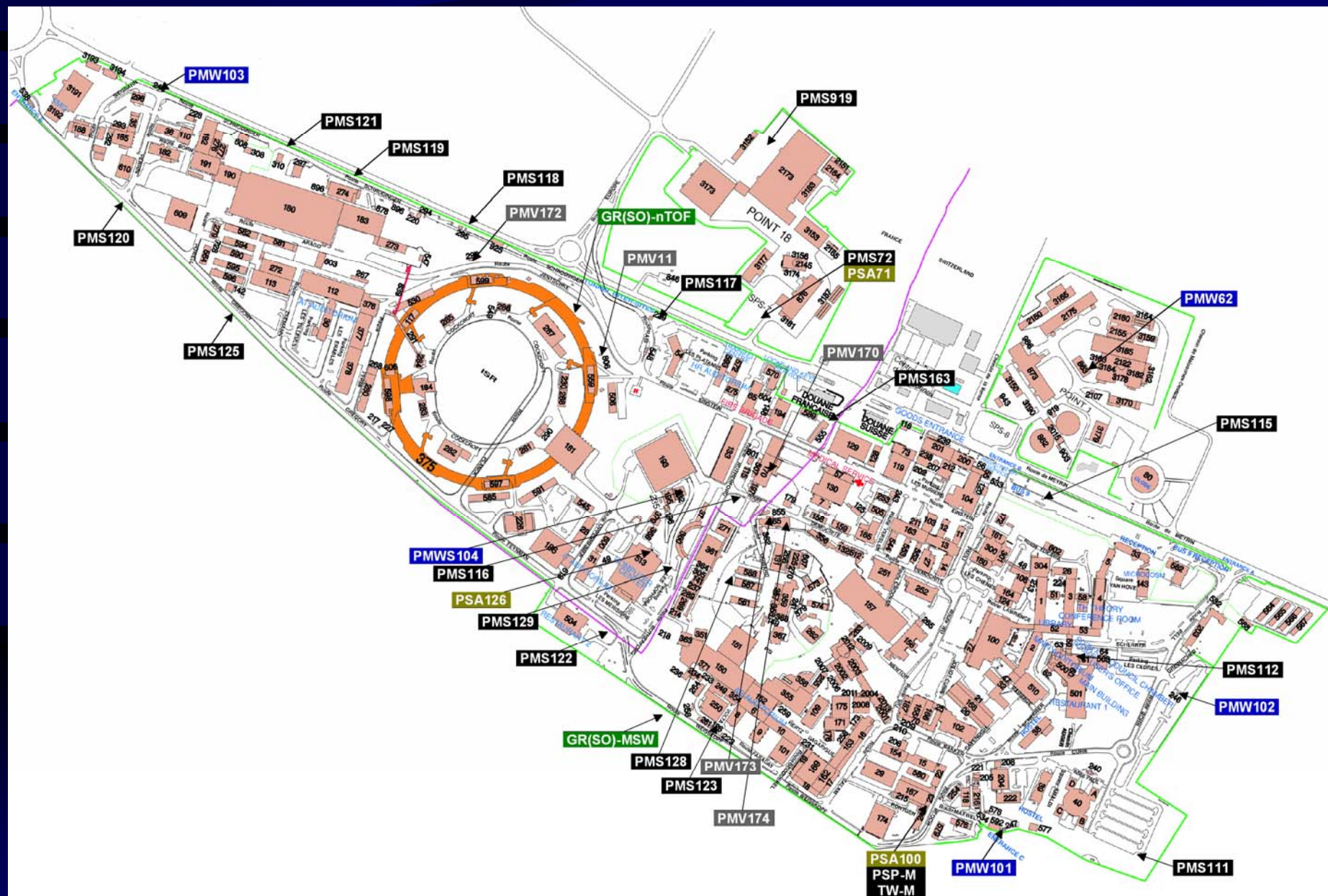


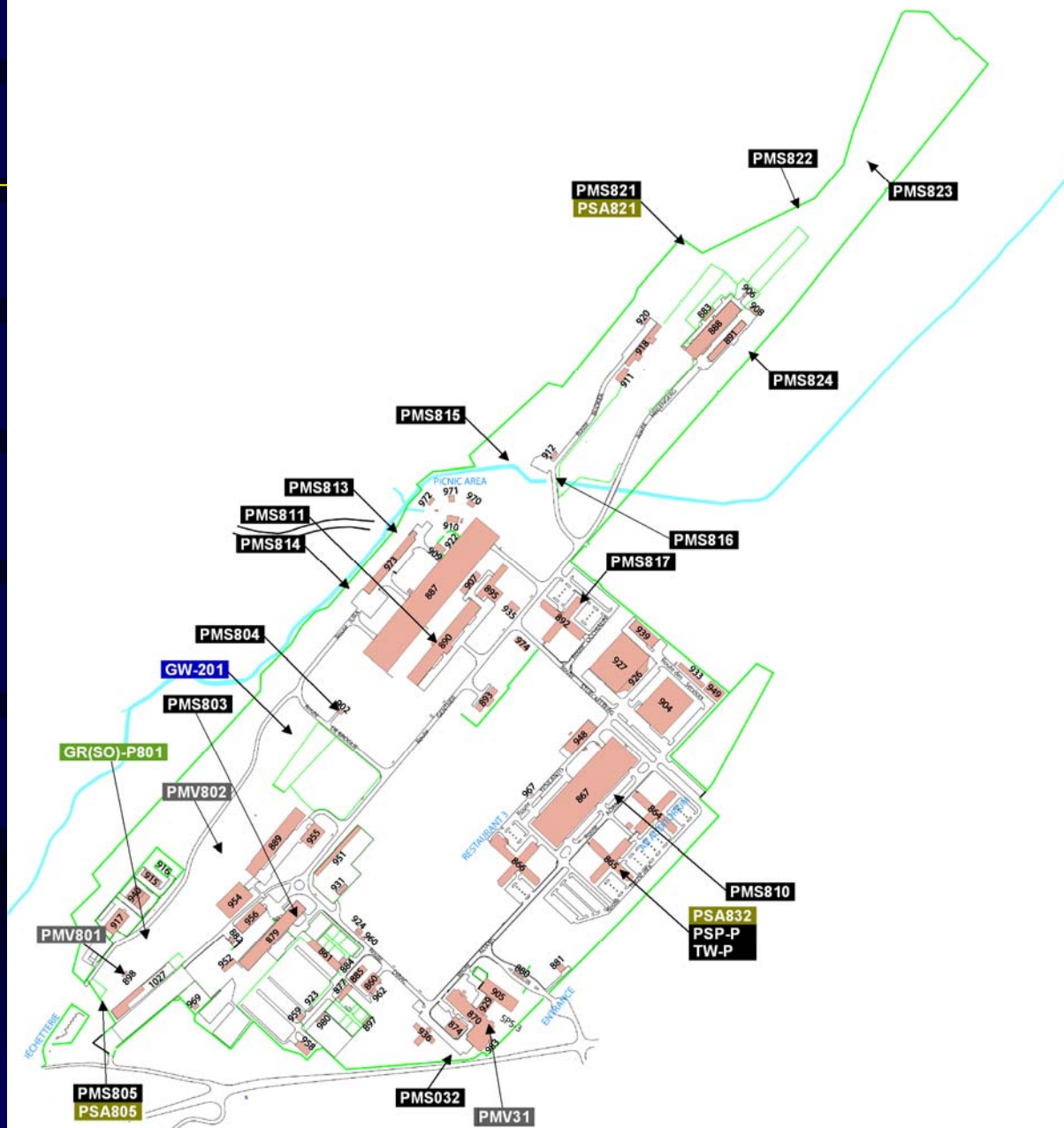
- Filtres à aérosol
- Herbe / terre
- Précipitations
- Coures d'eau
 - Eau
 - Sédiment
 - Mouse (bryophytes)
- Eau souterraine
- Produits agricoles
- Analyse dans le laboratoire

Surveillance : laboratoire d'environnement



- Spectrométrie gamma
 - 5 détecteurs HPGe
- Mesures α/β
 - Compteur proportionnel avec échangeur d'échantillons
- Compteur à scintillation liquide (^3H)
- Divers analyseurs chimiques
- Dispositifs pour traitement des échantillons





Evaluation de l'impact sur l'environnement (1)

- Doctrine CIRP (ICRP, 1991, mais à réviser)
- L'environnement est suffisamment protégé quand l'homme est suffisamment protégé
- La limite annuelle pour les membres du publique = 1 mSv
- Mais ALARA exige l'optimisation pour minimiser l'exposition
- Approche pragmatique au CERN : Une installation est considérée comme optimisée si la dose efficace à chaque individu $< 0,01$ mSv

Evaluation de l'impact sur l'environnement (2)

- Rayonnements diffusés
 - Directement a partir des valeurs mesurées par les moniteur de site
 - L'exposition naturelle mesurée pendant le grand arrêt des accélérateurs (typiquement hiver/printemps)
- Bilans des rejets des substances radioactives
 - Modèles radioécologiques reconnus
 - Directive suisse HSK-R-41
 - La situation du CERN est spécifique $\Rightarrow$ Propre programme de calcul

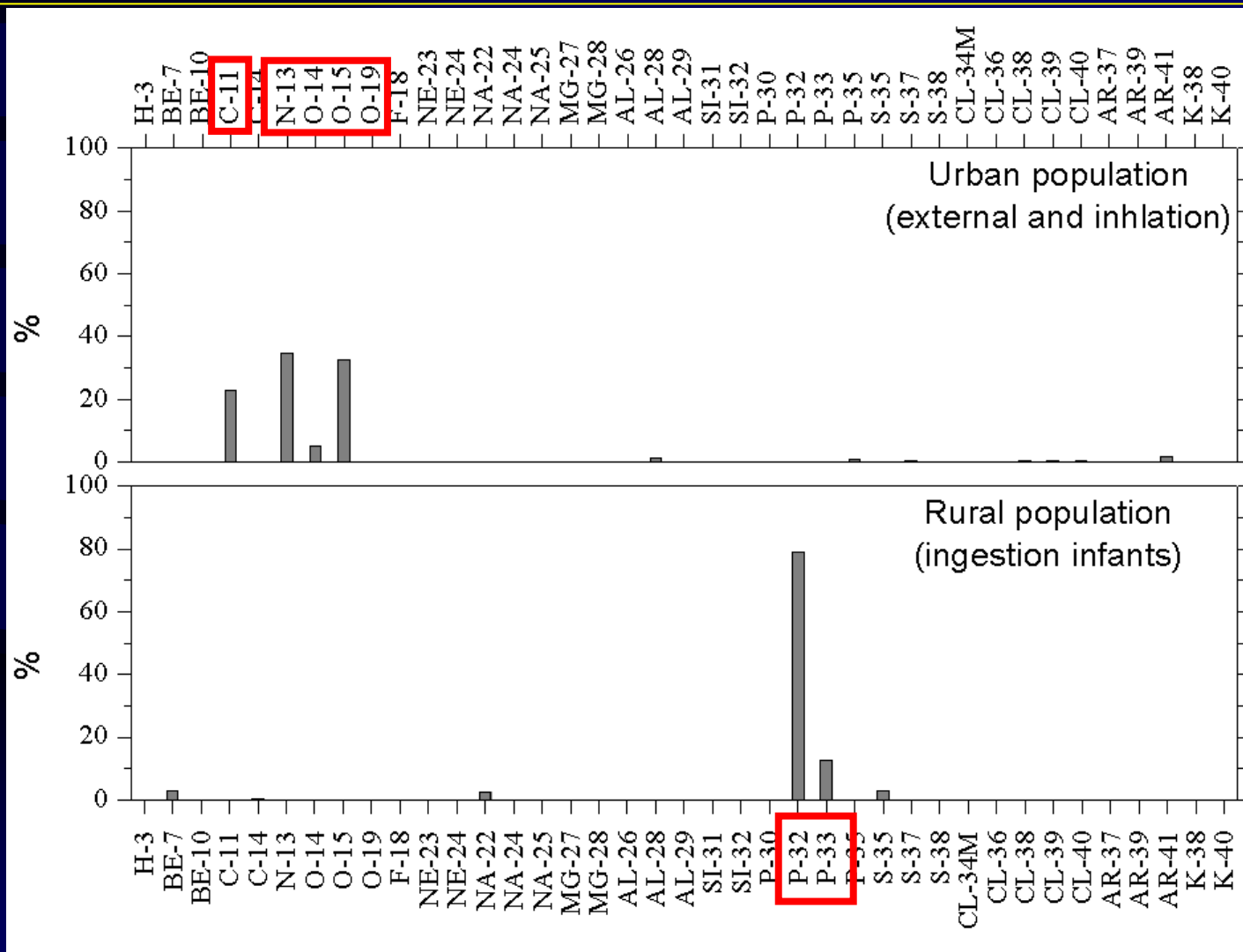
Evaluation de l'impact sur l'environnement (3)

- L'exposition externe au nuage radioactif prédomine dans la dose efficace
- Les cheminées sont court et trop près des récepteurs
- Solution : intégration Monte Carlo du kernel de dose

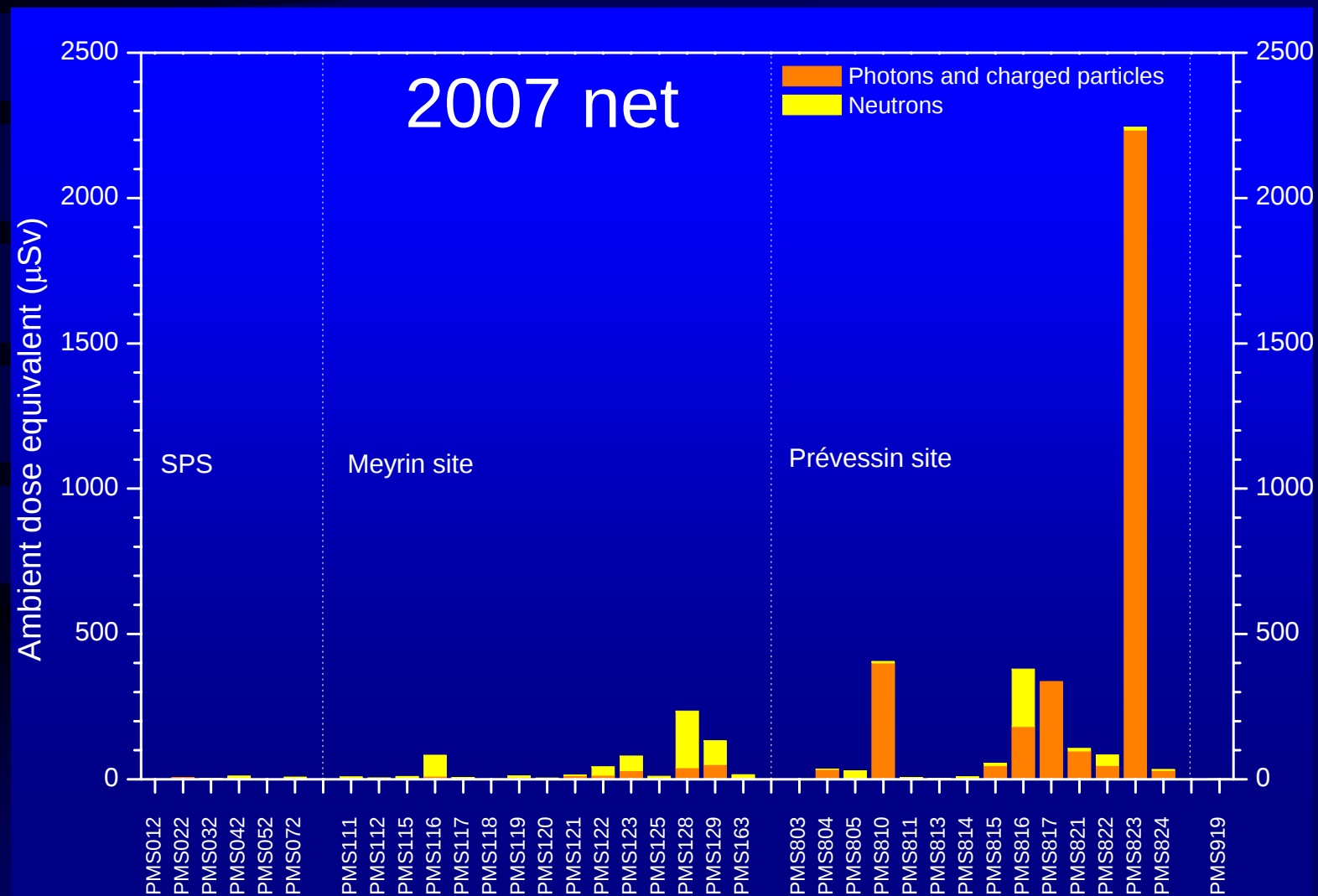
$$D_{S(L),p\gamma}(a,i) = \frac{Q}{T_1} \cdot \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{air}}} k_s \frac{1}{4\pi} \sum_i e_{\text{kerma}}(E_i, a, i) \mu_{a,i} E_i Y_i \int \frac{B(E_i, \mu_i r) \exp(-\mu_i r) \chi(\mathbf{r})}{r^2} d^3\mathbf{r}$$

Just pour illustrer

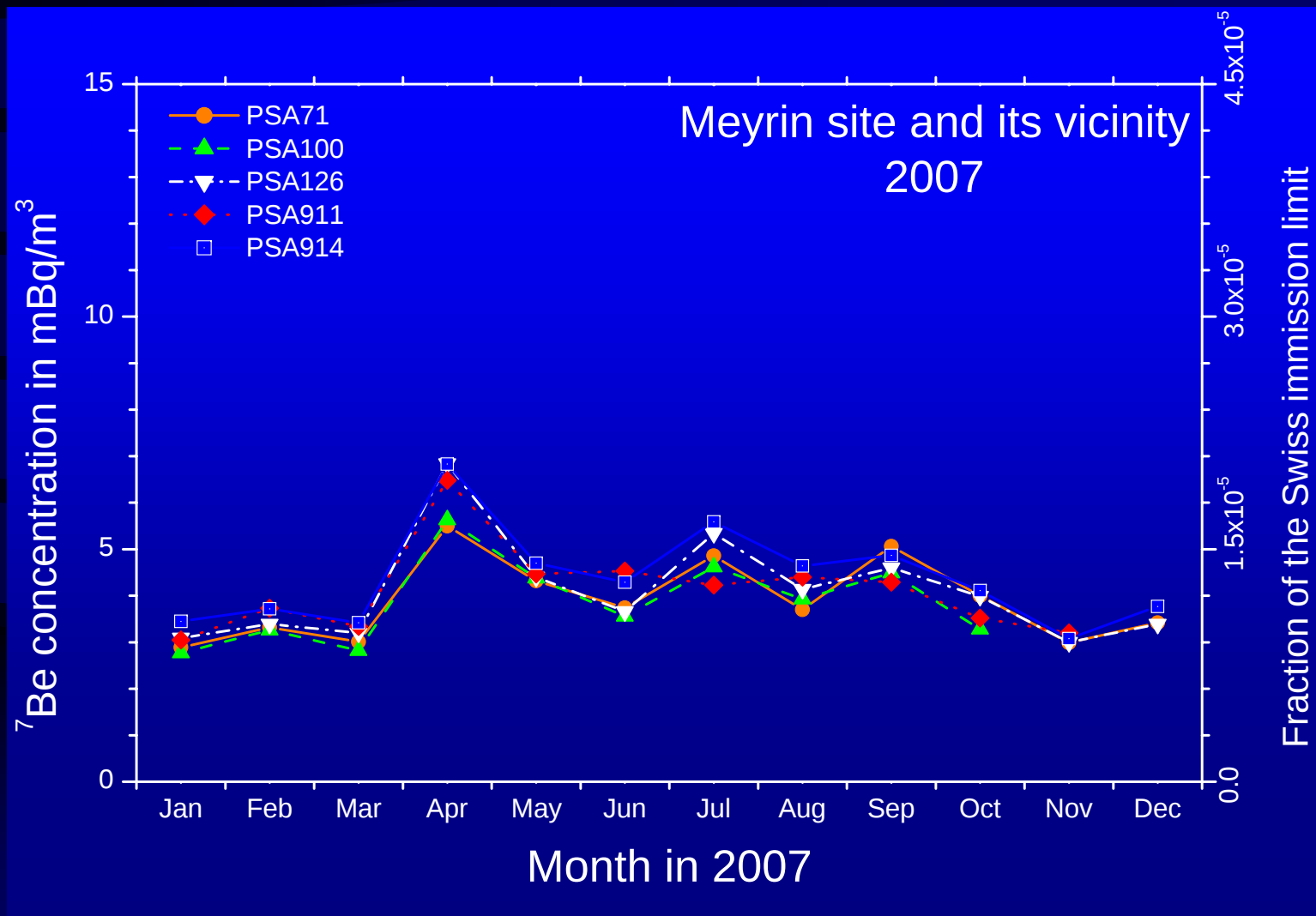
L'impact dosimétrique : exemple



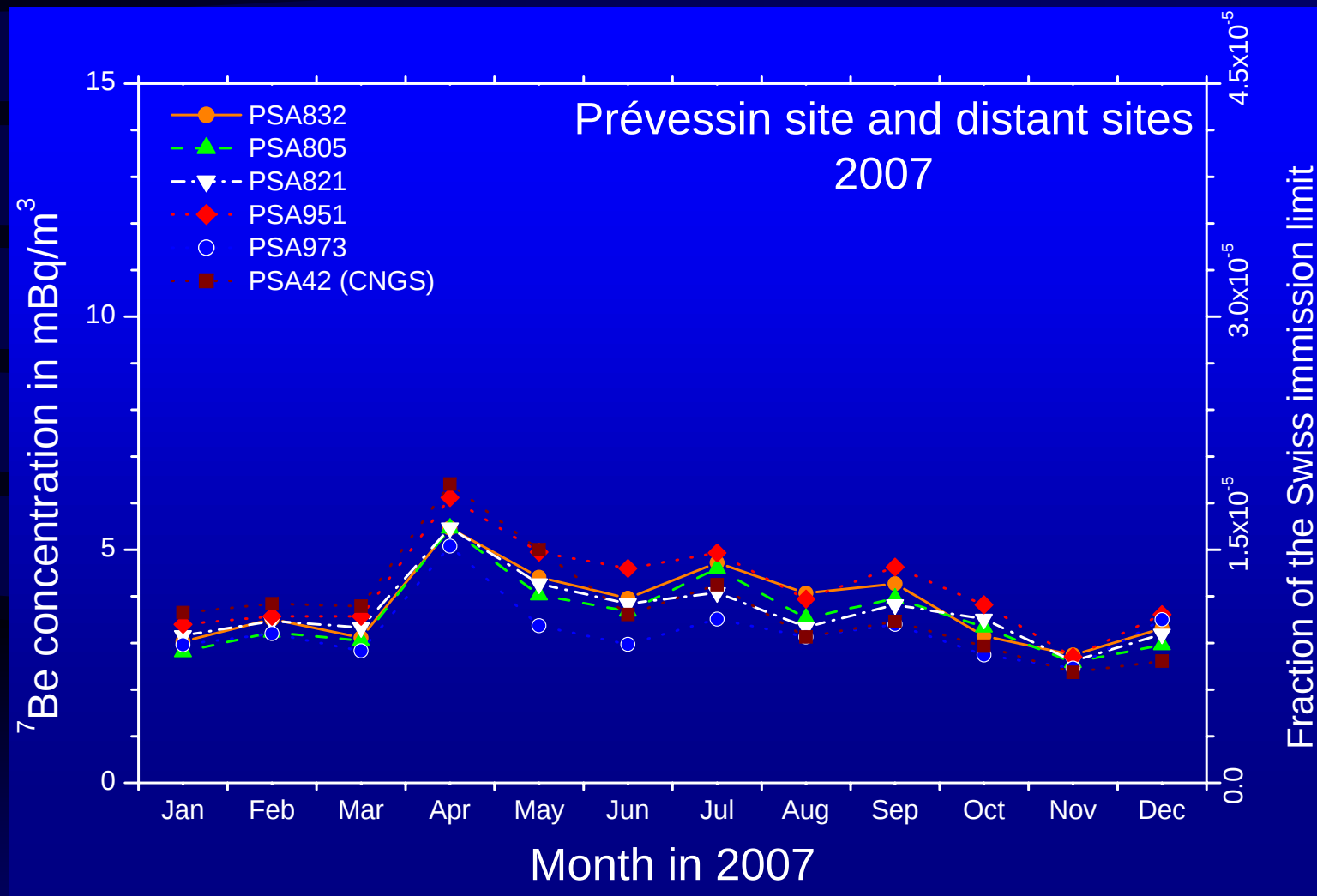
Rayonnements diffusés en 2007



^7Be dans l'air ambiant en 2007 (1)



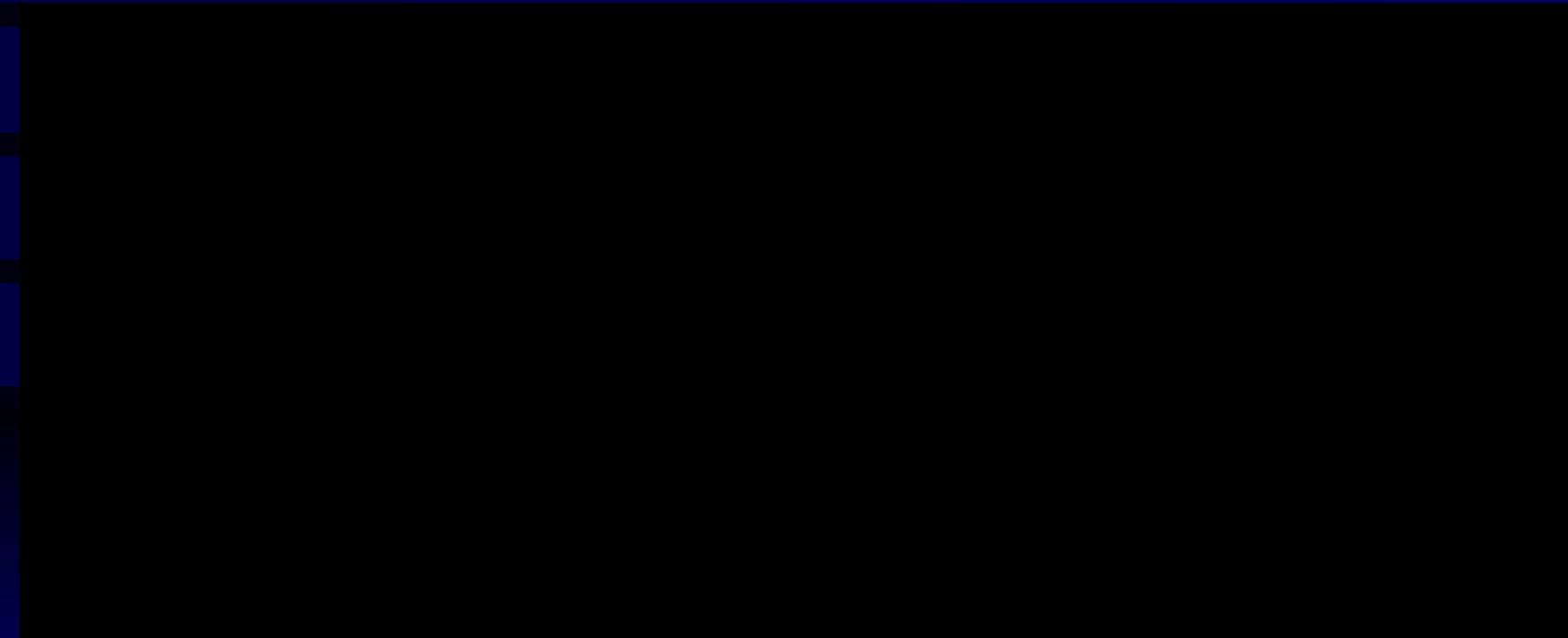
^7Be dans l'air ambiant en 2007 (2)



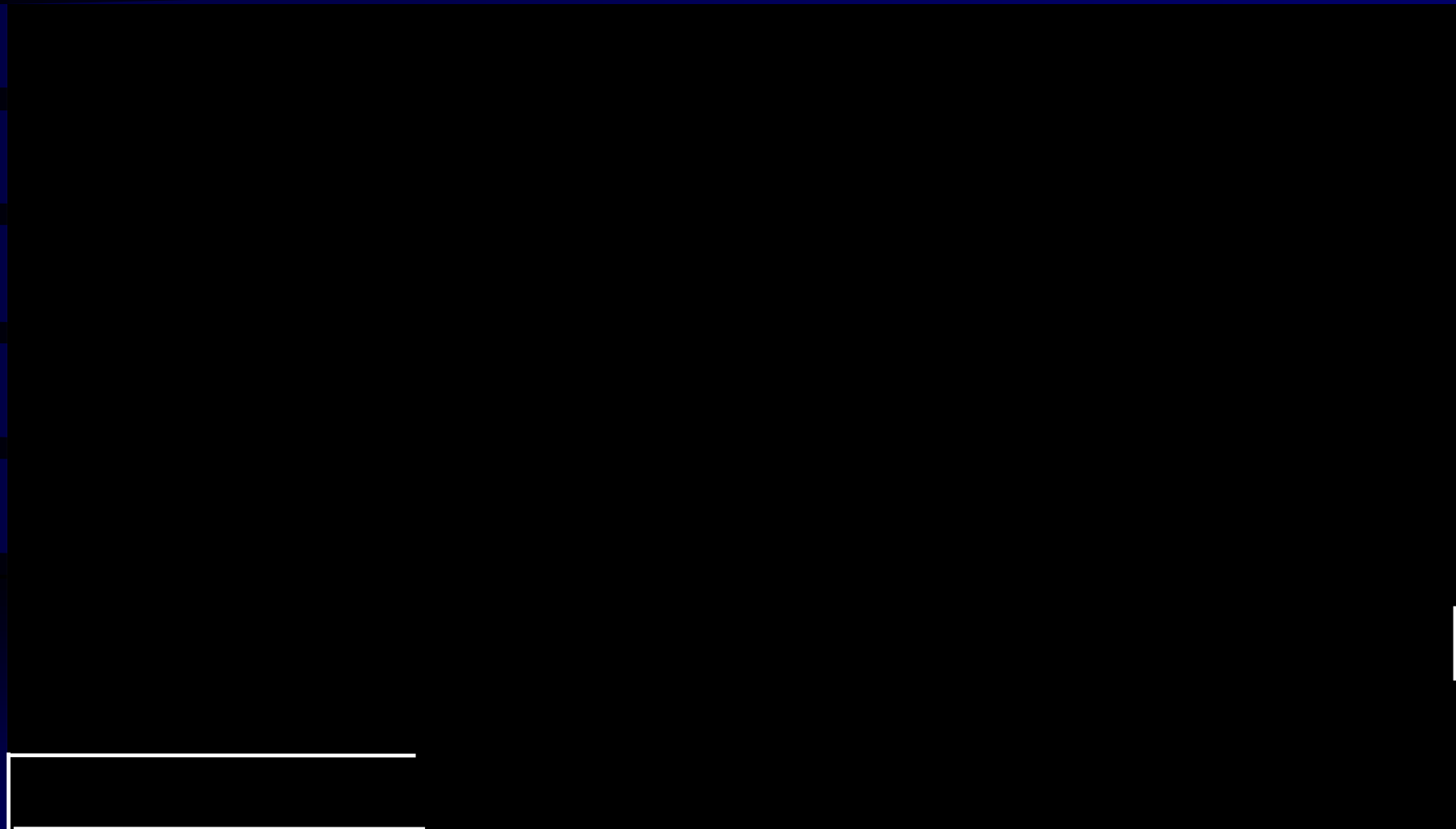
Mousse (bryophytes) dans les rivières en 2007

Bq/kg m.s.

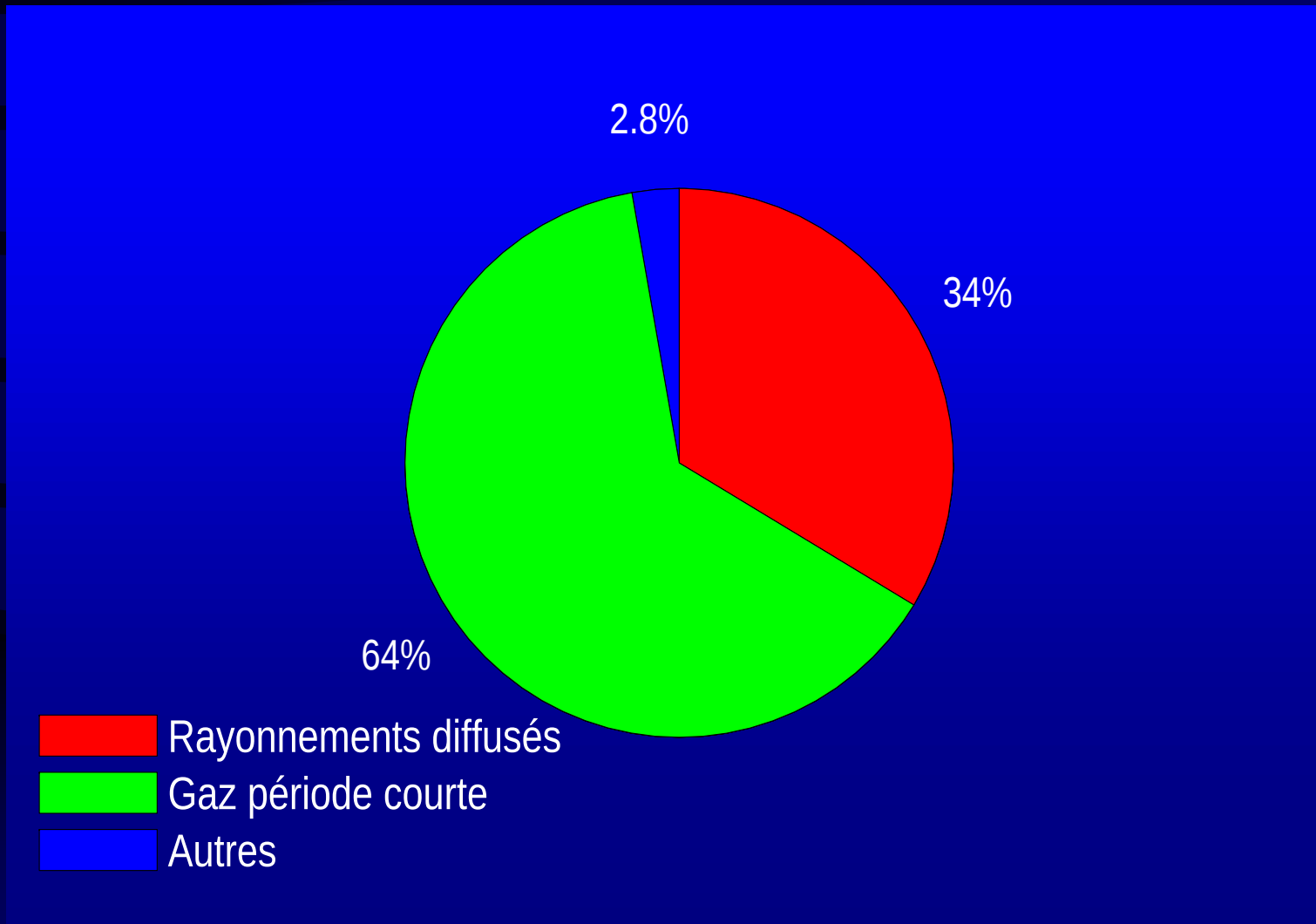
Rivière de référence



Rejets et doses efficaces en 2007



Composition de la dose efficace (2007)



Perspectives (1)

- CLIC – Compact Linear Collider ($e^\pm$; pur comme LEP)
- LINAC 4
- PS2 – Proton Synchrotron 2
- SPL – Super Proton LINAC

Perspectives (2)

- Défis futurs pour la radioprotection
 - Usines à neutrinos
 - Faisceaux de protons de puissance MW
 - PBq de radioéléments dans la cible
 - Faisceaux radioactifs (source focalisée des neutrinos électronique)
 - Collisionneurs à muons
 - Exposition par les neutrinos
 - Dosimétrie de neutrinos
 - Les groups critiques très loin de la source (Pacifique?)

Ce dimanche 6 avril!

LHC 2008 – Journée Portes Ouvertes

<http://lhc2008.web.cern.ch/LHC2008/>

