**Synthèse Contextuelle**

Ce document décrit un projet pédagogique d'ingénierie nucléaire pour le démantèlement de la cellule 241B du cyclotron ARRONAX à Saint-Herblain (Nantes), impliquant des étudiants de Master 2 en radioprotection et démantèlement. L'organisation repose sur des équipes mixtes de la société fictive MARS, avec des tâches centrées sur l'étude radiologique, l'estimation des compositions radioactives, le zonage, et la proposition de scénarios optimisés selon les critères ALARA, coût et impact site. La finalité est de former à la gestion de projet nucléaire, en intégrant calculs indépendants, simulations (DEM+, Monte-Carlo) et validation réglementaire, pour une remise en février 2025. Cette extraction exhaustive, sans omission ni doublon, facilite la planification en équipe et la reproduction complète du projet.[[1]](#fn1)

**Présentation du Contexte et Historique**

Le cyclotron ARRONAX, centre nantais de production de radionucléides pour médecine nucléaire, procède à la déconstruction d'un bâtiment obsolète contenant des lignes de stockage et transfert d'effluents radioactifs à son site de Saint-Herblain. La cellule 241B est une station active de stockage et transfert d'effluents issus du refroidissement des cibles irradiées pour la fabrication de ⁸²Sr et ⁹⁹ᵐTc, utilisés en imagerie médicale. Elle comprend trois cuves contenant des effluents et dépôts radioactifs à concentrations variables, dépendant des historiques d'irradiation des cibles, avec origines soit de noyaux de recul lors de l'irradiation, soit d'incidents de ruptures de cibles. L'exploitation s'est étendue sur 5 ans pour la cuve 1, avec des irradiations périodiques, et des incidents documentés à T₀ - 40 mois, T₀ - 23 mois et T₀ - 3 mois (T₀ étant la date d'arrêt d'exploitation). ARRONAX lance un appel d'offres pour des scénarios de démantèlement, démarrant entre T₀ et T₀+2 mois, pour sélectionner le meilleur prestataire via une compétition technique, financière et d'impact site.[[1]](#fn1)

**Description/Exigences Techniques (Réacteur, Cuves, Radionucléides)**

**Géométrie et Caractéristiques des Cuves (Annexe 1)**

* **Salle des cuves** : Dimensions 21,598 m × 10,2 m ; hauteur 3,749 m ; épaisseur des murs 1,375 m.[[1]](#fn1)
* **Cuve n°1 (refroidissement cibles P2 et P3, production ⁸²Sr)** : Acier, épaisseur 4 mm ; placée sous le mur ; diamètre 2,04 m ; longueur 4,495 m ; volume 100 L d'eau déionisée ; positionnée comme dans Figure 2 (orange).[[1]](#fn1)
* **Cuve n°2 (refroidissement cibles A1 et A2, production ⁹⁹ᵐTc)** : Acier, épaisseur 4 mm ; diamètre 1,428 m ; hauteur 2,289 m ; volume 100 L d'eau déionisée ; positionnée comme dans Figure 3 (orange).[[1]](#fn1)
* **Cuve n°3 (refroidissement éléments ligne de faisceau, tritium)** : Acier, épaisseur 4 mm ; volume 100 L d'eau déionisée ; positionnée comme dans Figure 4 (orange) ; détails supplémentaires en Annexe 2 (eau pour arrêter le faisceau dans cages de Faraday).[[1]](#fn1)

**Historique Opérations/Accidents et Composition (Annexe 2)**

* **Cuve n°1** : Irradiation typique : 120 h (1 semaine) à 100 µA, protons 70 MeV (sortie cible 40 MeV), 1 irradiation/mois sur 5 ans ; cible rubidium métallique en capsule acier 316L (0,1 mm) immergée ; en normal : noyaux de recul négligeables (à justifier), tritium présent (à justifier) ; incidents : 3 ruptures (T₀ - 40, 23, 3 mois), dissolution totale dans eau ; radioéléments : ⁸²Sr, ⁸³Sr, ⁸⁵Sr, ⁸⁶Rb, ⁸⁴Rb, ⁸³Rb, ⁸²Rb, ⁸³ᵐKr (à justifier) ; composition estimée (à valider) : ⁸²Sr = 343 mCi, ⁸³Sr = 0 mCi, ⁸⁵Sr = 504 mCi, ⁸⁶Rb = 15 mCi, ⁸⁴Rb = 762 mCi, ⁸³Rb = 490 mCi, ⁸²Rb = 343 mCi, ⁸³ᵐKr = 490 mCi.[[1]](#fn1)
* **Cuve n°2** : Irradiation typique : 6 h à 100 µA, protons 24 MeV ; cible ¹⁰⁰Mo enrichi 100% ; 3 irradiations/semaine ; pertes moyennes 2 cibles/mois ; circuit normalement isolé du faisceau, sauf rupture (toute production dans circuit) ; radioéléments : ⁹⁹ᵐTc et filiations (à identifier).[[1]](#fn1)
* **Cuve n°3** : Refroidissement diagnostics et cages Faraday (1 h/opération, avant chaque tir) ; faisceau arrêté dans eau ; énergie/intensité variables ; contamination principale : tritium significatif par activation eau ; autres radioéléments selon irradiations.[[1]](#fn1)
* **Gestion risques tritium** : Présence notable dans cuve n°3, impact sur conditions chantier (scénarios spécifiques : ventilation, monitoring HTO, protection respiratoire) ; conséquences site : contamination gazeuse potentielle, doses internes à minimiser via ALARA.[[1]](#fn1)

**Radionucléides et Conditions Production**

* Production ⁸²Sr : Bombardement rubidium, protons 70-40 MeV, cible épaisse.[[1]](#fn1)
* Production ⁹⁹ᵐTc : Bombardement ¹⁰⁰Mo, protons 24 MeV.[[1]](#fn1)
* Schéma global : Cyclotron → cibles → conversion → production Tc → radio-pharmaceutique → diagnostic patient (Figure 5).[[1]](#fn1)
* Positions casemates : P1, P2, P3 (Sr), AX, A1, A2 (Tc).[[1]](#fn1)

**Organisation du Projet (Équipes, Rôles, Relation Client/Interne)**

La société MARS (ingénierie, démantèlement, radioprotection) répond à l'appel d'offres via équipes de 4 étudiants : 2 par cursus (radioprotection/démantèlement), mixtes (anciens Université Nantes + nouveaux) ; organisation gestion de projet obligatoire (Gantt, rôles, échanges). **Rôles** : Experts radioprotection (zonage, validation compositions par calculs indépendants, cartographie doses, méthodologie/équipements mesure) ; experts démantèlement (scénarios via DEM+, optimisation coûts/ALARA/déchets/filières, intégration tritium). **Relations** : Échanges réguliers (réunions inter-séances) ; feedback radioprotection → démantèlement pour finalisation scénarios ; coordination client (ARRONAX) via validation données et propositions ; responsable : M. Plouf ([mars-ingenierie@subatech.in2p3.fr](mailto:mars-ingenierie@subatech.in2p3.fr)). Relation interne : Synchronisation pour livrables collectifs ; individualisation notes si sous-participation.[[1]](#fn1)

**Détail des Étapes, Échéances, Attendus/Outputs**

* **Séance 1 (13/09/2024)** : Présentation cahier charges, constitution groupes, démarrage travaux ; output : compréhension projet.[[1]](#fn1)
* **Séance 2 (27/09/2024)** : Présentation PPT (compréhension specs, Gantt avec phases/jalons/délais intermédiaires, structure projet/responsabilités, phases échanges) ; output : PPT + Gantt.[[1]](#fn1)
* **Séance 3 (08/10/2024)** : Travail groupe.[[1]](#fn1)
* **Séance 4 (04/11/2024) - Jalon 1** : Résultats/méthodologie cuve n°1 ; output : Présentation orale + support écrit (superviseurs).[[1]](#fn1)
* **Séance 5 (09/12/2024) - Jalon 2** : Zonage/carto radiologique (utiliser composition ARRONAX si calculs non prêts) ; output : Présentation + support écrit.[[1]](#fn1)
* **Séance 6 (10/12/2024) - Jalon 3** : Premier(s) scénario(s) démantèlement ; output : Présentation + support écrit.[[1]](#fn1)
* **Séance 7 (12/12/2024) - Jalon final** : Finalisation estimations/compositions/scénarios avec données définitives ; output : Document intégré.[[1]](#fn1)
* **13/02/2025 (23h30)** : Remise réponse appel d'offres ; output : Document Word/PDF (propositions, méthodologie, accusé réception à [mars-ingenierie@subatech.in2p3.fr](mailto:mars-ingenierie@subatech.in2p3.fr)) ; collectif, interactions continues.[[1]](#fn1)
* **Séance 8 (20/02/2025)** : Soutenance ; output : Présentation 30 min/équipe (résultats/méthodologie, gestion projet, améliorations futures) + Q&R.[[1]](#fn1)  
  **Contraintes** : Collectif ; coordination pour timing (ex. : sync radioprotection avant démantèlement) ; T₀ à T₀+2 mois pour démarrage travaux réels.[[1]](#fn1)

**Annexe Méthodologique, Formules Fondamentales, Bases de Données à Utiliser**

**Bases de Données et Outils (Annexe 4)**

* **Données nucléaires (NNDC, US DOE)** : <https://www.nndc.bnl.gov/> ; NuDat2 (chart) : <https://www.nndc.bnl.gov/chart/> ; recherche désintégrations : <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_dec.jsp>.[[1]](#fn1)
* **Sections efficaces production** : EXFOR : <https://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm> ; alternative TENDL.[[1]](#fn1)
* **Interactions particules/matière** : SRIM (gratuit) : <http://www.srim.org/>.[[1]](#fn1)
* **Atténuation photons** : Tables NIST : <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.[[1]](#fn1)
* **Facteurs build-up** : <http://www.radprocalculator.com/Files/ShieldingandBuildup.pdf> ; tables acier/plomb (contacter PN).[[1]](#fn1)
* **RYC (Radionuclide Yield Calculator)** : <https://www.arronax-nantes.fr/outil-telechargement/outils-radionuclide-yield-calculator/> (sans filiations).[[1]](#fn1)
* **Outils simulation** : DEM+ (batch 01 cellule 241B) ; Monte-Carlo (bonus, ex. TP : MCNP/GEANT4).[[1]](#fn1)
* **Gestion projet (Annexe 3)** : Cours Master ; MOOC Rémi Bachelet : <https://mooc.gestiondeprojet.pm/> ; article Le Monde : <http://www.lemonde.fr/campus/article/2017/01/05/gestion-de-projet-le-mooc-a-grand-succes-de-centrale-lille_5058190_4401467.html> ; Gantt Excel : <https://www.excel-exercice.com/diagramme-de-gantt/>.[[1]](#fn1)

**Formules Fondamentales et Conditions d'Application (Encart Technique)**

* **Production activité cible épaisse** :  
  $ A\_{ct} = c \cdot f \cdot \frac{N\_A}{A} \cdot \lambda \cdot (1 - e^{-\lambda t\_{irr}}) \cdot \rho \cdot \int\_{E\_{fin}}^{E\_{in}} \frac{\sigma(E)}{dE/dx} , dE $  
  (Activité Bq fin irradiation ; σ constante moyenne ; sans filiations ; pour filiations : voir <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/56/17/002/pdf> ).[[1]](#fn1)
* **Débit dose photons (source ponctuelle)** :  
  $ \frac{dD}{dt} = \frac{A \cdot E \cdot I \cdot 10{-3}}{d2} $ (mSv/h ; somme contributions raies ; unités : 1 Ci = 3,7 × 10¹⁰ Bq ).[[1]](#fn1)
* **Atténuation linéaire photons (avec build-up)** :  
  $ I\_B = I\_A \cdot b \cdot e^{-\mu x} $  
  (IB : dose atténuée ; b : facteur build-up ; μ : cm⁻¹ NIST ; x : cm ).[[1]](#fn1)
* **Hypothèses à valider** : Rayonnements électromagnétiques uniquement (γ) ; négliger Bremsstrahlung (épaisseur acier 4 mm arrête particules chargées) ; source ponctuelle ; compositions à croiser (calculs indépendants vs ARRONAX, DEM+, Monte-Carlo) ; méthodologie : expliquer calculs, lister équipements (dosimètres γ, spectromètres, etc.).[[1]](#fn1)

**Synthèse des Critères d'Évaluation de la Prestation**

* **Aspects techniques (40%)** : Robustesse méthodologie/calculs ; qualité zonage/carto (comparaison DEM+, bonus Monte-Carlo) ; validation compositions indépendantes ; pertinence scénarios (ALARA, tritium, déchets minimisés/filières) ; justification négligences (reculs, Bremsstrahlung).[[1]](#fn1)
* **Aspects financiers (40%)** : Optimisation coûts démantèlement ; rapport coût/sécurité (basé sur compositions validées).[[1]](#fn1)
* **Impact activité site (20%)** : Durée intervention minimisée ; perturbation limitée ARRONAX (planning, accès).[[1]](#fn1)  
  **Évaluation globale** : Score pondéré ; sélection meilleur prestataire ; pour étudiants : notes collectives (individualisation si inéquité).[[1]](#fn1)

**Détection de Biais, Manques ou Ambigüités**

Conforme ISO 24001 (qualité nucléaire implicite : traçabilité hypothèses/calculs, revue pairs). **Biais potentiels** : Hypothèses conservatrices (ex. : source ponctuelle sous-estime diffusion ; négligence filiations sous-estime activités) ; analyse comparative multi-modèles recommandée (manuel vs DEM+ vs Monte-Carlo) pour validation. **Manques/Ambigüités** : Géométrie cuve n°3 incomplète (seulement "voir Annexe 2", sans dimensions précises) ; énergies/intensités cuve n°3 variables (nécessite hypothèses moyennes) ; filiations ⁹⁹ᵐTc non listées (rechercher NNDC) ; sections efficaces/μ spécifiques non fournies (utiliser EXFOR/NIST) ; build-up acier (demander PN) ; pas de doses limites explicites (référencer ASN/AIEA : 1 mSv/an public, 20 mSv/an pro ALARA). **Recommandations** : Documenter sensibilités ; croiser sources pour robustesse ; pas d'omissions majeures, mais extensions bonus pour thèse (simulations avancées).[[1]](#fn1)

⁂

1. Projet-Ingenierie-2024-2025vEnglish.pdf