

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE

SESSION 2021

Durée : 4 heures
Coefficient : 3

ÉPREUVE E4 :
Modélisation et choix techniques
en environnement nucléaire

SOUS-ÉPREUVE U4.1 :
Pré-étude et modélisation

DOCUMENTS ET MATÉRIELS AUTORISÉS

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue », est autorisé.
Tout autre matériel est interdit.
Un formulaire de 6 pages est fourni, aucun autre document n'est autorisé.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet se compose de 16 pages, numérotées de 1/16 à 16/16.

Documents à rendre avec la copie :

- Document réponse n°1page 14/16
- Document réponse n°2page 15/16
- Document réponse n°3page 16/16

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 1/16

0. Problématique

Dans le cadre du projet dénommé « Grand Carénage » lancé par EDF, d'importants travaux de maintenance sont entrepris dans les centrales nucléaires.

L'étude proposée porte sur le remplacement de l'échangeur régénératif du circuit de contrôle volumétrique et chimique (RCV). Cette intervention bénéficie de retours d'expérience importants.

Schéma global de l'installation :

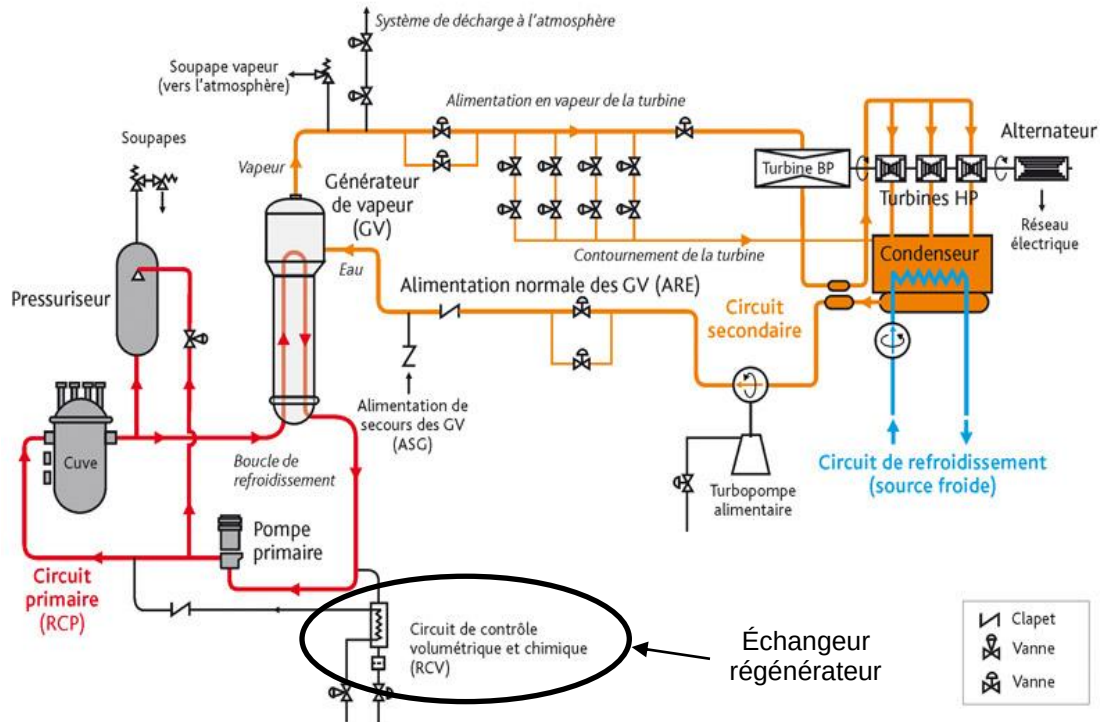
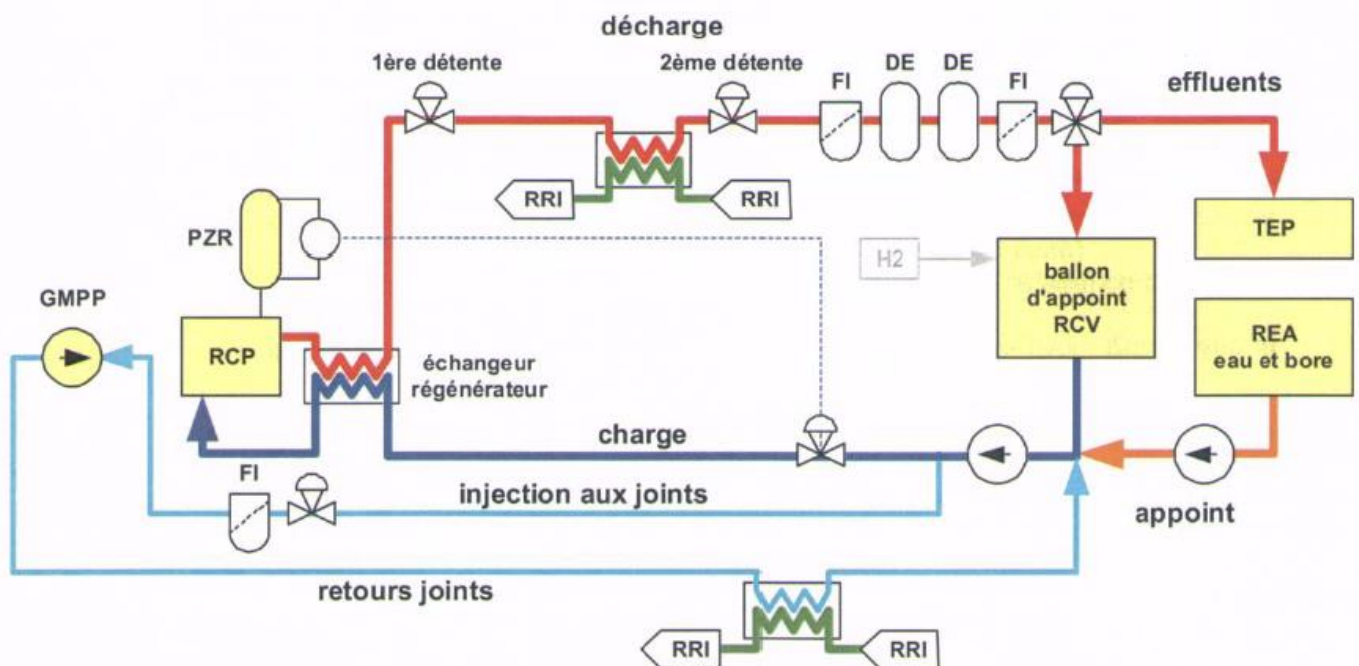
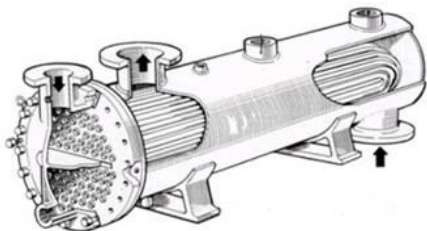


Schéma du circuit de contrôle volumétrique et chimique (RCV) :



BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 2/16



L'échangeur est devenu très irradiant par accumulation de contamination dans ses tubulures. L'intervention doit donc prendre en compte le risque de dispersion de contamination au démontage et au retrait de l'échangeur.

1. Étude dosimétrique prévisionnelle

Une cartographie des lieux cumulée à plusieurs retours d'expérience conduit à anticiper les évolutions des débits d'équivalent de dose (DED) de la façon suivante :

DED ambiant au poste de travail	
avant ouverture des circuits de l'échangeur	$H = 60 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
après ouverture des circuits de l'échangeur	$H = 115 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
après décontamination du sas	$H = 90 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
une fois l'échangeur évacué	$H = 3 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$

Deux plannings d'intervention sont proposés sur les **documents réponses n°1** et **n°2** :

- scénario n°1 : l'échangeur est confiné dans du vinyle,
- scénario n°2 : l'échangeur est confiné dans un sarcophage faisant écran $\frac{1}{10}$ au minimum.

Ces deux scénarios ne diffèrent qu'à partir de la phase 40.

1.1. Établir les prévisionnels dosimétriques en complétant ces deux **documents réponses**. Les expositions sont supposées globales dans tous les cas. Porter sur la copie la ou les relation(s) littérale(s) permettant de calculer les grandeurs demandées.

1.2. Renseigner la synthèse proposée sur le **document réponse n°3**. Analyser les résultats obtenus et proposer de façon argumentée le scénario qui vous semble le plus opportun à mettre en œuvre.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 3/16

2. Origine de la contamination

Les radionucléides essentiellement accumulés dans l'échangeur sont les suivants : ^{60}Co , ^{58}Co , et $^{110\text{m}}\text{Ag}$.

Leurs caractéristiques sont données en **annexe 1**.

Les phénomènes d'érosion et de corrosion dus au débit d'eau et à sa chimie dans le circuit primaire cumulés au flux neutronique sont à l'origine de ces radionucléides.

Les activations sont décrites de la façon suivante :

$^A\text{X}(\text{particule}_1 \text{ ou rayonnement}_1, \text{ particule}_2 \text{ ou rayonnement}_2)$ signifie que le nucléide ^AX capture la particule 1 ou le rayonnement 1 et émet la particule 2 ou le rayonnement 2.

2.1. Le ^{58}Co est créé par réaction $^{58}\text{Ni}(n,p)$. Écrire son équation de formation.

2.2. Le ^{58}Co se désintègre β . Préciser en justifiant la réponse s'il est β^- ou β^+ . Écrire son équation de désintégration.

2.3. Le ^{60}Co est créé par réaction $^{59}\text{Co}(n,\gamma)$. Écrire son équation de formation puis son équation de désintégration.

2.4. $^{110\text{m}}\text{Ag}$ est créé par réaction $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)$. Il se désexcite en ^{110}Ag . Expliquer ce qu'est un état métastable.

Justifier que concernant la formation de ^{110}Ag , l'état métastable $^{110\text{m}}\text{Ag}$ soit à prendre en considération.

3. Dimensionnement radiologique du sarcophage

Le dimensionnement radiologique du sarcophage est étudié dans l'hypothèse où le scénario 2 serait retenu.

Le sarcophage est en acier (fer) et son dimensionnement est fait en raisonnant sur l'énergie d'irradiation γ la plus pénalisante et d'intensité non négligeable pour l'ensemble des trois radionucléides cités en **annexe 1**.

3.1. Citer le radionucléide à considérer ainsi que l'énergie à prendre en compte pour les calculs.

3.2. À l'aide de la courbe d'atténuation massique donnée en **annexe 2**, évaluer la valeur de $\frac{\mu}{\rho}$.

3.3. En déduire l'épaisseur d'acier nécessaire pour atténuer ce rayonnement d'un facteur 10.

3.4. Déterminer pour cette épaisseur le facteur d'atténuation subi par le rayonnement de plus basse énergie pour l'ensemble des trois radionucléides.

3.5. Expliquer pourquoi la mesure pratique du DED au poste de travail après la pose du sarcophage devrait être inférieure à $9 \mu\text{Sv/h}$.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 4/16

4. Contrôle du confinement

Les descriptions des matériels cités sont données en **annexe 3**.

Afin de confiner la contamination à l'ouverture des circuits, certains travaux se font dans un sas ventilé par un déprimogène équipé d'un filtre très haute efficacité pour le rejet de l'air.

Le contrôle de la vitesse d'écoulement d'air est essentiel pour garantir un bon confinement.

Une éolienne, animée par la circulation d'air, entraîne une génératrice à courant continu à excitation permanente ou dynamo tachymétrique (DT) et permet de mesurer cette vitesse.

Un chargé de surveillance veut contrôler le bon fonctionnement de la ventilation dynamique. Il se rend sur le chantier au moment de la découpe d'une tuyauterie de liaison à l'échangeur.

4.1. Contrôle du confinement

La vitesse d'écoulement de l'air doit être égale à au moins $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour que le confinement soit correct.

L'afficheur du système de contrôle est défaillant.

Le chargé de surveillance positionne alors un voltmètre entre les points A et B du système et mesure la tension $U = 2,64 \text{ V}$.

4.1.1. Établir la relation entre la tension E et la tension U.

En déduire la fréquence de rotation n du ventilateur exprimée en $\text{tr}\cdot\text{s}^{-1}$.

On donne :

Puissance fournie par le vent au ventilateur

$$P_{\text{air}} = 0,29 \cdot D^2 \cdot v^3 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} P_{\text{air}} \text{ en W} \\ D = \text{diamètre de l'éolienne en m} \\ \quad = 60 \text{ mm} \\ v = \text{vitesse de l'air en } \text{m}\cdot\text{s}^{-1} \end{array}$$

Cette puissance est convertie avec un rendement $\eta = 80 \%$ en puissance cinétique de la DT.

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2 \quad \text{avec} \quad E_{\text{cinétique}} \text{ en J de l'hélice fonctionnant durant } 1 \text{ s}$$

$$\begin{array}{l} J = \text{moment d'inertie de la DT} \\ \quad = 1,00 \cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \\ \Omega = 2\pi \cdot n \text{ en } \text{rad}\cdot\text{s}^{-1} \end{array}$$

4.1.2. Calculer l'énergie cinétique de l'hélice pour un fonctionnement de 1 s.

En déduire la puissance cinétique $P_{\text{cinétique}}$.

4.1.3. Montrer que la vitesse d'écoulement de l'air est d'environ $v = 1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.1.4. Quelle information donnent les fils de laine (2^e et 3^e photographies de l'annexe 3) ?

4.1.5. Le confinement dynamique est-il conforme à l'attendu ?

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 5/16

4.2. Environnement bruyant

Lors du contrôle du bon fonctionnement de la ventilation, le chargé de surveillance ne porte pas de protections auditives.

- Le niveau sonore ambiant dû aux autres chantiers et au fonctionnement de certaines machines est $L_1 = 78$ dB au poste d'observation.
- La découpe se fera à l'aide d'une scie sabre qui génère un niveau sonore $L_2 = 98$ dB à 50 cm du lieu de découpe.
- Le poste d'observation est à 3,0 m du point de découpe.

On rappelle que :

- L (en dB) = $10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ où I = l'intensité sonore et I_0 l'intensité sonore de référence.
- Le rapport $\frac{I}{I_0}$ est inversement proportionnel au carré de la distance source - récepteur.

4.2.1. I_2 et I'_2 sont respectivement les intensités sonores générées par la scie sabre à 50 cm et à 3 m du lieu de découpe.

Calculer les rapports $\frac{I_2}{I_0}$ et $\frac{I'_2}{I_0}$.

4.2.2. I_{total} est l'intensité sonore totale au poste d'observation. Calculer $\frac{I_{\text{total}}}{I_0}$ puis en déduire le niveau sonore auquel est exposé le chargé de surveillance.

4.2.3. Dans ces conditions, l'absence de protections auditives est-elle préjudiciable ? Des informations utiles sont données en **annexe 4**.

5. Mise en place du sarcophage et levage

5.1. Préparation

Finalement, le scénario 2 est retenu et il faut procéder à la pose du sarcophage pour confiner l'échangeur à évacuer.

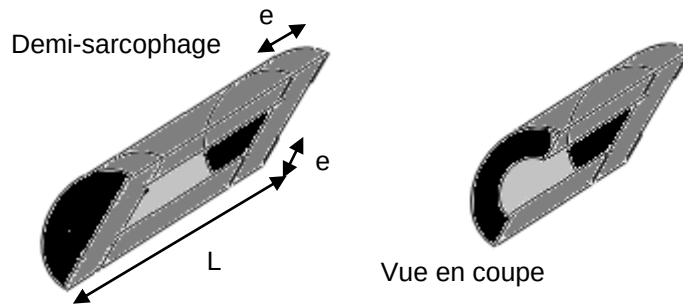
Le sarcophage se présente sous la forme de deux demi-cylindres fermés aux extrémités que l'on va assembler autour de l'échangeur.

L'ensemble formera un cylindre :

- de longueur extérieure $L = 2,920$ m,
- de diamètre extérieur $D = 0,922$ m,
- d'épaisseur en tout point $e = 60$ mm.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 6/16

Il est constitué en acier (fer) de masse volumique $7\,860\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et est assimilable, une fois assemblé, à un cylindre évidé d'un autre cylindre.



5.1.1. Montrer que la masse du sarcophage peut être estimée à $M_S = 4\,200\text{ kg}$.

5.1.2. La masse de l'échangeur est $M_E = 2\,480\text{ kg}$.

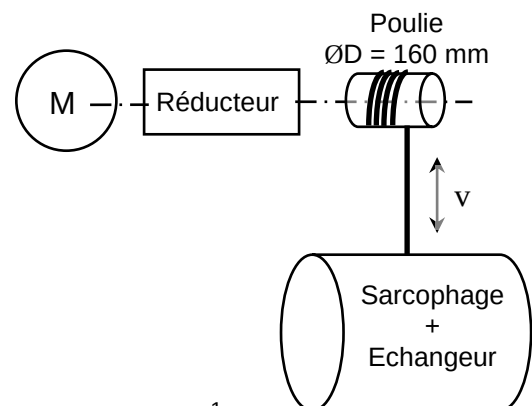
En déduire la masse M à lever et la force nécessaire au levage ($g = 9,81\text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$).

5.2. Aléa de levage

Au moment de lever le sarcophage contenant l'échangeur, le moteur de levage du pont roulant tombe en panne. Ce moteur était de puissance utile 15 kW et doit être remplacé. Le réducteur en sortie de moteur peut être conservé mais le moteur adaptable dans un délai raisonnable a les caractéristiques suivantes :

Moteur
230 V / 400 V – 50 Hz
11,3 A / 6,5 A
$\cos \varphi = 0,80$
$\eta = 80\%$
$1\,440\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$

Réducteur
1 : 2 500
$\eta = 90\%$



On donne :

Vitesse de levage $v = R \cdot \omega$ avec

Puissance de levage $P = F \cdot v$ avec

Intensité de la pesanteur $g = 9,81\text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$

v en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 R en m
 ω en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
 P en W
 F en N
 v en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Le réducteur reste inchangé.

Ce changement peut être validé temporairement pour cette manœuvre si les deux critères sont vérifiés :

- coefficient de sécurité de levage $C_s \geq 6$,
- vitesse de levage $v \leq 300\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 7/16

5.2.1. Calculer la fréquence de rotation en sortie de réducteur.
En déduire la vitesse v de levage.

5.2.2. Calculer la puissance absorbée P_A du moteur.
En déduire la puissance utile P_U en sortie de réducteur.

5.2.3. Calculer la force maximale de levage.

5.2.4. L'utilisation de ce moteur est-elle acceptable en dépannage ?

5.3. Déplacement de la charge

Le pont roulant est animé dans ses déplacements par un autre moteur pilotable à deux vitesses notées v_H (High) et v_L (Low) de la plus grande à la plus petite.

Ces deux vitesses sont :

0,054 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$

1,0 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

5.3.1. Exprimer les valeurs de v_H et v_L dans les unités légales avec 2 chiffres significatifs.

L'évacuation du sarcophage impose de passer la charge à proximité d'éléments importants pour la sûreté (IPS) dont l'intégrité doit être obligatoirement préservée.

La situation la plus contraignante est une distance de 17 cm entre un élément IPS et la charge.

À tout moment, le chef de manœuvre peut faire signe au pontier de stopper la manœuvre.

Le temps de réaction du pontier peut atteindre 1 s.

Le ballant engendré lors de l'arrêt d'une manœuvre peut atteindre une amplitude équivalente au trajet parcouru en 2 s.

Par sécurité, la charge ne doit en aucun cas approcher à moins de 10 cm un élément IPS.

5.3.2. Déterminer la ou les vitesses de déplacement que le chef de manœuvre peut autoriser au pontier.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 8/16

6. Mauvaise surprise

Alors que l'équipe de levage vient de terminer les phases 40 et 45 (scénario 2), l'un des intervenants se découvre contaminé au visage de façon quasi uniforme sur 1 cm^2 de peau par un graton (poussière radioactive).

Le service médical récupère le graton et procède à son analyse spectrale.

Les résultats sont les suivants :

^{58}Co	38,5 kBq
^{60}Co	276,5 kBq
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	31,5 kBq

L'incidence au contact de la peau pour chaque radionucléide est donnée dans le tableau ci-dessous en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$.

^{58}Co	$2,8\cdot 10^{-1} \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$
^{60}Co	$7,8\cdot 10^{-1} \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$6,8\cdot 10^{-1} \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$

Ne sachant pas exactement quand l'intervenant s'est contaminé, le temps d'exposition retenu sera le plus pénalisant.

6.1. Quelle durée d'exposition est retenue ?

6.2. Qualifier la dose reçue par la peau à quantifier : absorbée, équivalente ou efficace.

6.3. Renseigner le **document réponse n°3** et déterminer la dose reçue par la peau qui sera affectée à cet intervenant.

6.4. Commenter la dose estimée reçue par la peau.

Annexe 1

Cobalt - 58

70,8 jours

Principales émissions								
	Gamma / X		Beta (Emax)		Electrons		Alpha	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%
E1	511	30	475	15				
E2	811	99						
E3	1675	< 1						
% omis		< 1		0				

Cobalt - 60

5,27 ans

Principales émissions								
	Gamma / X		Beta (Emax)		Electrons		Alpha	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%
E1	1173	100	318	100				
E2	1333	100	1491	< 1				
E3								
% omis		< 1		0				

Argent - 110m / Argent - 110

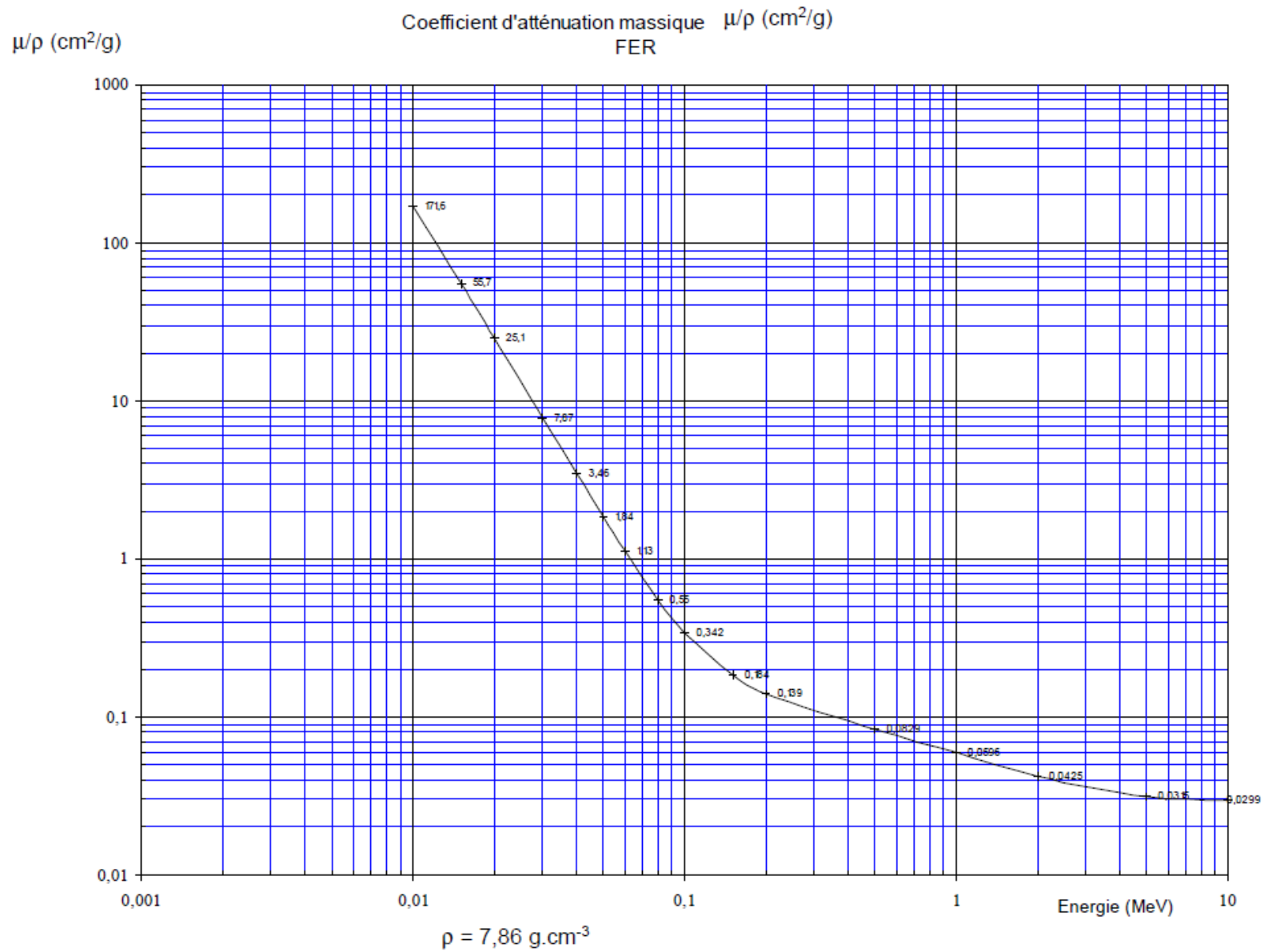
250 jours / 24,6 s

Principales émissions								
	Gamma / X		Beta (Emax)		Electrons		Alpha	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%
E1	658	99	531	31	91	1		
E2	885	73	2235	< 1	631	< 1		
E3	1505	13	2893	2				
% omis		139		67		< 1		

Radio-nucléide	Produit par l'activation de	Provenance
Cobalt 60 : ^{60}Co	^{59}Co	Activation du cobalt 59 stable (100 % du cobalt). Le cobalt est le constituant principal des stellites (60 %), il est présent à titre d'impureté dans les alliages.
Cobalt 58 : ^{58}Co	^{58}Ni	Activation du nickel 58 stable (68 % du nickel). Le nickel est le principal constituant des tubes d'inconel des générateurs de vapeur (72 % pour l'alliage 600, 58 % pour le 690). Il est utilisé en proportions variables dans les alliages inoxydables.
Argent 110 métastable : $^{110\text{m}}\text{Ag}$	^{109}Ag	Activation de l'argent 109 stable (48 % de l'argent). Grappes de contrôle constituées d'AIC (Argent, Indium, Cadmium), joints beurrés argent (type hélicoflex).

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 10/16

Annexe 2



BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 11/16

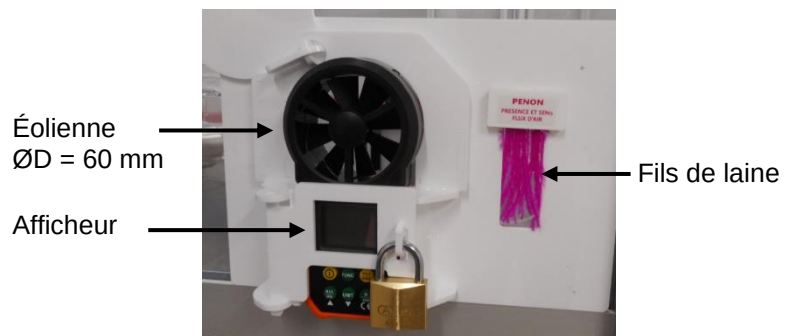
Annexe 3



Déprimogène

Sas

Face extérieure de la porte du sas

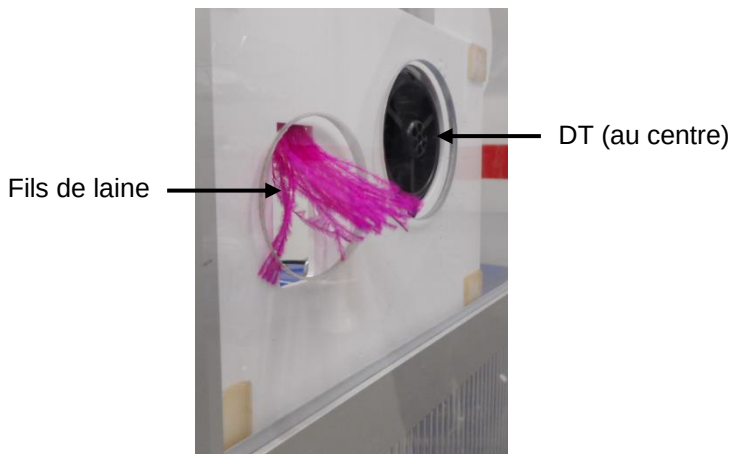


Éolienne
ØD = 60 mm

Afficheur

Fils de laine

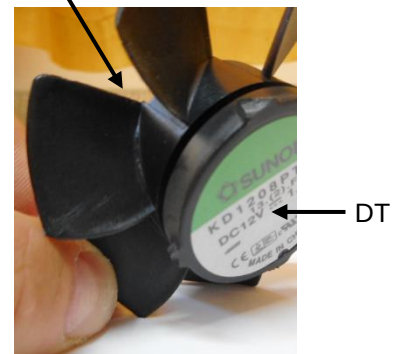
Face intérieure de la porte du sas



Fils de laine

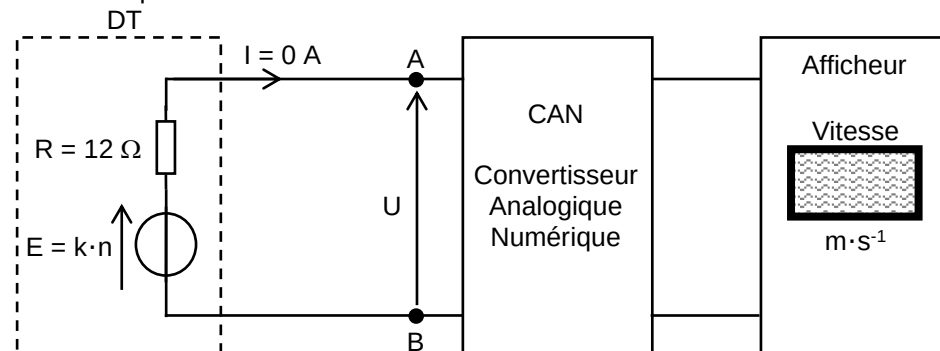
DT (au centre)

Éolienne



DT

Schéma équivalent



Avec $k = 3,40 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{min} \cdot \text{tr}^{-1}$

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 12/16

Annexe 4

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de niveaux sonores en dB et indique, pour certains d'entre eux, les effets connus sur l'homme.

Dans la vie quotidienne	Niveau sonore	Au travail	Les effets	
Décollage de la fusée Ariane	180			Risque avéré pour l'audition
Turbo réacteur	140			
Coup de fusil	130	Bancs d'essai des moteurs	Seuil de la douleur	
Passage d'une voiture Formule 1	120	Marteau piqueur		
Orchestre de musique pop	110	Atelier de chaudronnerie		
Passage d'un train en gare	100	Scie circulaire		
Baladeur, volume en maximum	90	Ponceuse		
	85		Présomption de risque pour l'audition	Pas de risque pour l'audition
Radio, volume au maximum	80	Machine à affuter		
Restaurant bruyant	70	Bureau avec imprimantes	Travail de bureau difficile	
Conversation animée	60	Bureau bruyant		
Conversation calme	50	Grand bureau calme	Travail intellectuel pénible	
Appartement tranquille	40	Petit bureau calme		
Promenade en forêt	30			
Campagne paisible	20			
Studio d'enregistrement	10			
Silence	0		Seuil d'audibilité	

Document réponse n°1 (à rendre avec la copie)

Partie 1

Question 1.1.

Scénario 1

Phase	Service (s)	Activité	Nombre d'intervenants	Durée en h	Volume de travail en H·h ⁽¹⁾	Coefficient d'exposition	H en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	E individuelle en μSv	Dose efficace collective S en H· μSv
10	Logistique	Montage du sas	3	3,0		0,5			
20	Mécanique Chaudronnerie	Activités réalisées circuits fermés	3	1,5		0,8			
25		Activités réalisées circuits ouverts		2,0		0,8			
30	Logistique	Décontamination du sas	2	1,5		0,9			
35		Démontage sas	2	1,5		0,5			
40	Levage	Emballage échangeur dans vinyle	3	0,25		0,9			
45		Évacuation échangeur	3	2,0		0,7			
50	Levage Mécanique	Mise en place échangeur neuf	5	2,0		0,7			
60	Mécanique	Raccordement échangeur neuf	3	4,0		0,8			
	Total								

⁽¹⁾ Volume de travail = Σ (nombre d'intervenants x temps de travail) en Hommes·heures.
Donne une indication du volume de travail à rémunérer.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 14/16

Document réponse n°2 (à rendre avec la copie)

Partie 1

Question 1.1.

Scénario 2

Phase	Service (s)	Activité	Nombre d'intervenants	Durée en h	Volume de travail en H·h ⁽¹⁾	Coefficient d'exposition	H en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	E individuelle en μSv	Dose efficace collective S en H· μSv
10	Logistique	Montage du sas	3	3,0		0,5			
20	Mécanique Chaudronnerie	Activités réalisées circuits fermés	3	1,5		0,8			
25		Activités réalisées circuits ouverts		2,0		0,8			
30	Logistique	Décontamination du sas	2	1,5		0,9			
35		Démontage sas	2	1,5		0,5			
40	Levage	Pose sarcophage	2	0,5		0,5			
45		Évacuation échangeur	3	2,0		0,7			
50	Levage Mécanique	Mise en place échangeur neuf	5	2,0		0,7			
60	Mécanique	Raccordement échangeur neuf	3	4,0		0,8			
Total				18	54,5				1 620

⁽¹⁾ Volume de travail = Σ (nombre d'intervenants x temps de travail) en Hommes·heures.
Donne une indication du volume de travail à rémunérer.

BTS Environnement nucléaire		Session 2021
U41 : pré-étude et modélisation	Code : ENE4MOD	Page 15/16

Document réponse n°3 (à rendre avec la copie)

Partie 1

Question 1.2.

Synthèse

Scénario	Durée en h	Volume de travail en H·h	E _{individuelle} en µSv par service			Dose efficace collective S en H·µSv
			Logistique	Mécanique	Levage	
1						
2	18,0	54,5	313	270	39	1 620

Partie 6

Question 6.3.

Dose peau

Radionucléide	A en kBq	µSv·h ⁻¹ ·Bq ⁻¹	t en h	Dose en mSv
⁵⁸ Co	38,5	2,8·10 ⁻¹		
⁶⁰ Co	276,5	7,8·10 ⁻¹		
^{110m} Ag	31,5	6,8·10 ⁻¹		
			Dose peau en mSv	