

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE

E4 MODÉLISATION ET CHOIX TECHNIQUES EN ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE U41 Pré-étude et modélisation

SESSION 2024

Durée : 4 heures
Coefficient : 3

Matériel autorisé :

- 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.

Ce sujet comporte 6 parties indépendantes avec le barème suivant :

Partie A :	7/60
Partie B :	8/60
Partie C :	21/60
Partie D :	5/60
Partie E :	11/60
Partie F :	8/60

Le sujet comporte des annexes de la page 12 à la page 14.

Documents à rendre avec la copie :

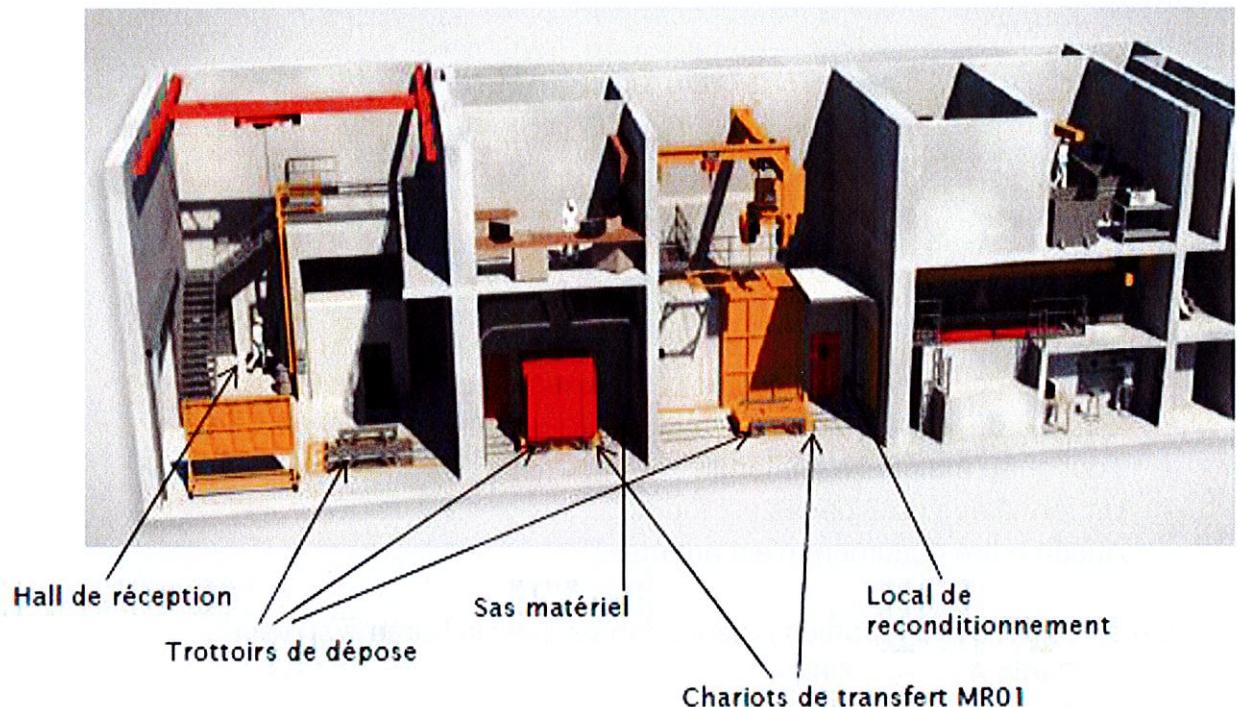
- Documents réponse page 15/15

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 – Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page : 1/15

L'ANDRA (agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) souhaite créer une unité de contrôle de conformité des colis de déchets qu'elle réceptionne sur son installation nucléaire de base (INB) située dans l'Aube ; ces contrôles étant jusqu'alors réalisés dans des laboratoires extérieurs.

Cette installation de contrôle de colis (ICC) permettra des contrôles :

- non destructifs :
 - spectrométrie gamma,
 - contrôle dimensionnel,
 - mesure de débit d'équivalent de dose (DED),
 - mesure d'activité surfacique,
 - imagerie par rayons X,
 - mesure de teneur en ^3H (tritium) et ^{14}C par dégazage,
- destructifs :
 - inventaire,
 - carottage.



Tous les types de colis pourront être contrôlés :

- colis cylindriques à enveloppe acier (fûts à compacter de 200 L) ou à enveloppe béton,
- caissons à injecter de 5 m³ ou de 10 m³.

Cette INB est dédiée à la gestion des déchets de faible et moyenne activité à vie courte.

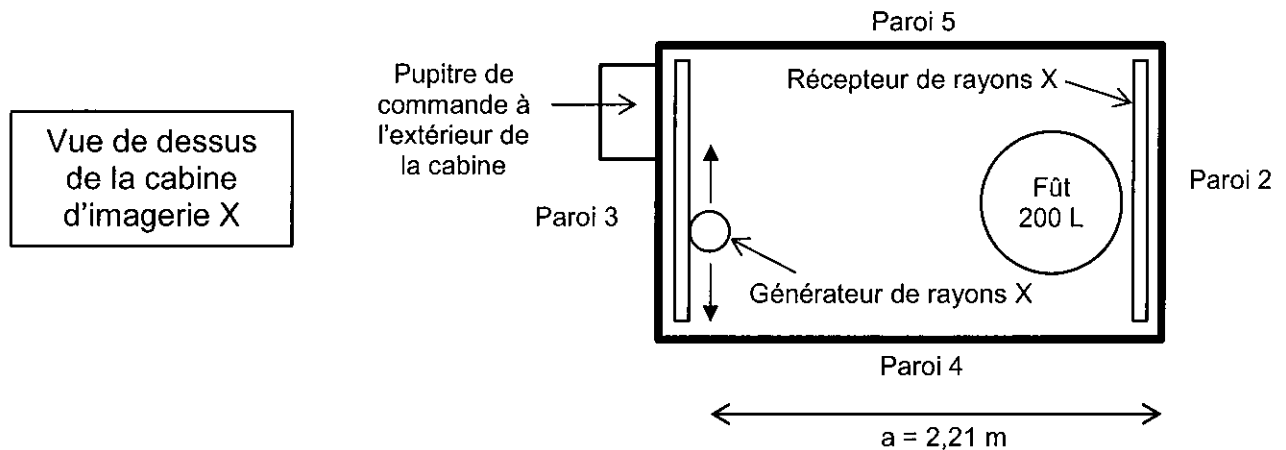
		Période radioactive T
VTC	vie très courte	T < 100 jours
VC	vie courte	100 jours ≤ T < 31 ans
VL	vie longue	≥ 31 ans

Ces déchets proviennent :

- de l'industrie nucléaire,
- de la recherche,
- de la défense,
- de l'industrie non nucléaire,
- du médical.

L'autorité de sûreté nucléaire (ASN) étudie la demande d'autorisation déposée par l'ANDRA pour cette extension et lui demande de justifier par des notes de calculs :

- l'épaisseur de la paroi 2 de la cabine d'imagerie X,
- la qualité du béton sur lequel reposera la cabine d'imagerie X.



Partie A : Épaisseur de la paroi 2 de la cabine d'imagerie X (7/60 points)

Le contrôle des colis par imagerie aux rayons X sera réalisé par un générateur placé dans une cabine qui sert d'enceinte auto-protectrice.

Ce type d'enceinte exclut par conception :

- la possibilité d'introduire dans l'enceinte tout ou partie d'une personne pendant la production de rayonnement X,
- le risque d'exposition des personnes après la production de rayonnement X (une atténuation suffisante du rayonnement X est d'abord réalisée).

Le générateur de rayons X fonctionne :

- sous une tension d'accélération U réglable de 225 kV à 420 kV. Cette tension conditionne l'énergie des photons X,
- avec un courant d'intensité I réglable de 0 à 10,7 mA dans le fil en tungstène. Ce courant conditionne le flux de photons X.

Le rayonnement dans la cabine comprend 2 composantes :

- le rayonnement primaire (indice p) : rayonnement ionisant émis directement par le générateur,
- le rayonnement diffusé (indice s) : rayonnement ionisant émis lors de l'interaction du rayonnement ionisant avec le colis ou les autres parties de la cabine ; l'interaction étant accompagnée d'une diminution de l'énergie de rayonnement et/ou d'un changement de direction de rayonnement.

Le rayonnement diffusé ne sera pas pris en compte dans cette étude.

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 3/15

Le cahier des charges retenu pour le dimensionnement de l'installation est le suivant :
 $U = 420 \text{ kV}$; $I = 10,7 \text{ mA}$ et :

Nombre de fûts de 200 L radiographiés par an		Durées d'exposition t en s pour 1 cliché	Nombre moyen de cliché par fût
Non immobilisés ⁽¹⁾	270	120	1,5
	30	180	1,5
Immobilisés ⁽²⁾	45	300	1,5
	5	600	1,5

(1) sans liant de calage entre les déchets dans le fût

(2) avec liant de calage entre les déchets dans le fût

On définit la charge de travail W du générateur de rayons X par $W = I \cdot t$ en mA·min/semaine, où t = durée d'utilisation hebdomadaire du générateur de rayons X exprimée en min/semaine.

A.1 Montrer que $t \approx 26 \text{ min/semaine}$.

A.2 Calculer la charge de travail hebdomadaire W en mA·min/semaine.

$\overset{\circ}{H}_{\text{Max}}$ est le débit de l'équivalent de dose maximal, dû au rayonnement primaire, issu des limites réglementaires de dose efficace à l'extérieur de la cabine, exprimé en mSv/semaine.

L'ANDRA désire que l'extérieur de la cabine à rayons X soit hors zone réglementée.

A.3 Montrer que $\overset{\circ}{H}_{\text{Max}} \approx 0,020 \text{ mSv/semaine}$.

Le facteur d'atténuation F_p sans dimension du rayonnement primaire créé par la paroi 2 s'exprime par la relation suivante :

$$F_p = \frac{\overset{\circ}{H}_p}{\overset{\circ}{H}_{\text{Max}}} \cdot T = \frac{\Gamma_R \cdot W \cdot R \cdot T}{\overset{\circ}{H}_{\text{Max}} \cdot a^2}$$

où

Γ_R = rendement du tube (donnée constructeur)
 $= 129 \text{ mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

C'est l'équivalent de dose produit à 1 m du générateur par unité de charge.

R = facteur d'orientation (sans unité)
 $= 1,0$

Le facteur d'orientation prend en considération le fait que les orientations du faisceau possibles et prévues de façon opérationnelle ne sont pas appliquées simultanément.

T = facteur d'occupation du local vis-à-vis duquel est calculée la protection (sans unité)
 $= 1,0$ (équivalent temps plein)

$\overset{\circ}{H}_p$ = débit de l'équivalent de dose au point considéré en mSv/semaine en l'absence de protection

a = distance du générateur à l'extérieur de la paroi 2
 $= 2,21 \text{ m}$

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 4/15

A.4 Montrer que le facteur d'atténuation F_p du rayonnement primaire que devra provoquer la paroi 2 pour répondre aux exigences fixées par l'ANDRA est égal à environ $3,7 \cdot 10^5$.

A.5 Déterminer l'épaisseur de la paroi 2 en plomb à l'aide de l'**annexe 1**. On évaluera la réponse pour une tension $U = 400$ kV au lieu de 420 kV.

L'épaisseur de 47 mm proposée par l'ANDRA pour une tension $U = 420$ kV semble-t-elle correcte ? Justifier.

Partie B : Implantation de l'enceinte auto-protectrice à rayonnement X (8/60 points)

L'ASN demande à l'ANDRA une note de calcul définissant le niveau du béton (type de béton) requis pour réaliser la dalle qui supportera la cabine de protection en plomb du générateur de rayons X. L'ASN impose un coefficient de sécurité $C_s = 1,25$ à appliquer pour prendre en compte les effets des séismes envisagés.

Deux critères sont ainsi à valider :

- résister au poids de chaque paroi,
- supporter la pression exercée par chaque paroi.

$$L = 2,90 \text{ m}$$

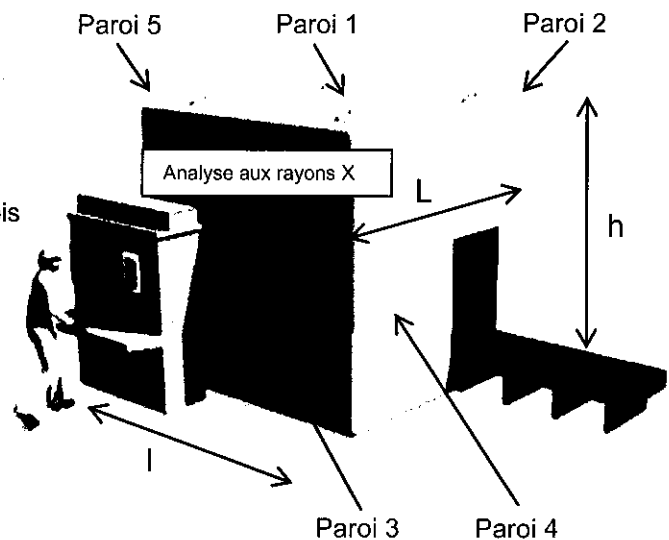
$$l = 1,91 \text{ m}$$

$$h = 2,47 \text{ m}$$

Les parois en plomb ont une masse volumique $\rho = 11\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Chaque paroi, repérée de 2 à 5, exerce un appui sur le sol.

Les épaisseurs des parois sont données dans le Document réponse 1.



On admet, pour simplifier, qu'une porte (non représentée sur le schéma) permet de considérer la paroi 4 comme pleine et homogène.

Tableau des contraintes pour les différents niveaux du béton envisagés

Niveau du béton	Charge isolée statique (charge à l'appui)			
	1	2	3	4
Charge par appui	$\leq 10 \text{ kN}$	$\leq 20 \text{ kN}$	$\leq 40 \text{ kN}$	$> 40 \text{ kN}$
Pression de contact	$\leq 5 \text{ MPa}$		$\leq 10 \text{ MPa}$	

(Données extraites du guide technique du centre scientifique et technique du bâtiment.)

On prendra l'intensité de la pesanteur $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Le **Document réponse 1** sera à compléter pour la question **B.1**.

B.1 Afin de compléter le **Document réponse 1**, déterminer pour la paroi 3 :

- la charge par appui. Chaque paroi verticale supporte une partie (quote-part) de la paroi 1,
- la pression de contact au sol.

Toute précision utile à la compréhension des calculs sera portée sur la copie.

B.2 Indiquer, compte tenu du coefficient de sécurité imposé par l'ASN, le niveau minimal du béton à utiliser pour réaliser la dalle lors de la conception de l'installation. Justifier.

Une fois l'installation terminée, des contrôles et des essais sont réalisés avant sa mise en service. Une délégation de l'ASN et de l'IRSN (institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) assiste à certains d'entre eux :

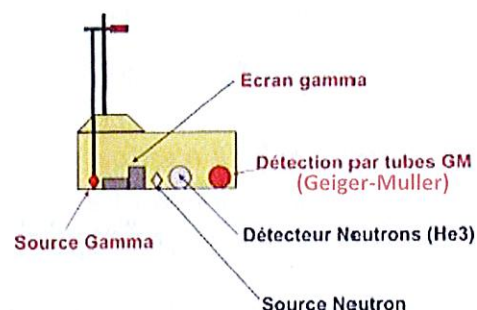
- contrôle du compactage du revêtement (enrobé) de l'aire de manœuvre devant le bâtiment,
- essai de la ventilation du local de carottage,
- contrôle de performance des moyens de lutte contre l'incendie.

Partie C : Contrôle du compactage de l'enrobé sur la zone de manœuvre (21/60 points)

Ce contrôle est nécessaire car un bon compactage réduit les vides du matériau, augmentant ainsi la stabilité de l'enrobé et diminuant *de facto* le risque de création de nids-de-poule susceptibles de déstabiliser les colis lors des manutentions sur chariots élévateurs.



Gammadensimètre - Humidimètre



Pour ce contrôle, un gammadensimètre-humidimètre (émetteur et récepteur de rayonnements) est utilisé. Il permet d'évaluer les caractéristiques suivantes de l'enrobé :

- sa densité grâce à une source β, γ ,
- sa teneur en eau (donc la porosité) grâce à une source émettrice de neutrons.

Sources contenues dans l'appareil

Source	$^{137}\text{Cs} : \beta, \gamma$	$^{241}\text{Am} - ^9\text{Be} : n$
Activité	370 MBq	1,85 GBq

^{241}Am se désintègre en émettant une particule α .

Le ^9Be est un élément naturel stable. Lors de son activation par une particule alpha émise par ^{241}Am , il émet un neutron.

C.1 Écrire l'équation de désintégration de ^{241}Am , puis l'équation d'activation de ^9Be .

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 6/15

C.2 Lorsque cette source n'est pas utilisée, une feuille de mylar (plastique) est glissée par un mécanisme dans l'inter-espace d'air compris entre ^{241}Am et ^9Be (voir schéma ci-contre).

Quel est le rôle de la feuille de mylar ?

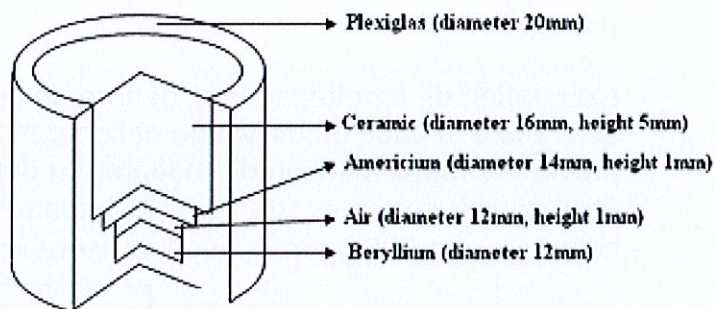


Figure 1. Designed Am-Be neutron source.

L'un des inspecteurs de l'ASN profite de la situation pour auditer l'employé de l'entreprise de travaux publics en charge du contrôle radiologique.

C.3 L'inspecteur demande à l'employé de justifier son étude dosimétrique prévisionnelle (EDP). L'employé explique la chronologie de sa journée : prendre le véhicule de service équipé de l'appareil à son agence située à 2 h de route du site de l'ANDRA, réaliser 30 mesures en différents points puis retourner à son agence déposer le véhicule.

Il précise que chaque déplacement à pied (entre la voiture et le premier point de contrôle, entre 2 points de contrôle, entre le dernier point de contrôle et la voiture) représente 30 s de marche en portant l'appareil.

Chaque mesure représente une action de 5 min au contact de l'appareil.

Remarques :

- retenir le DED le plus pénalisant si possibilités multiples,
- ne renseigner que les cases du tableau qui ont un sens,
- le principe des calculs sera détaillé dans la copie.

En s'appuyant sur les informations de l'**annexe 2**, remplir le **Document réponse 2** afin d'établir l'EDP de la journée de l'employé.

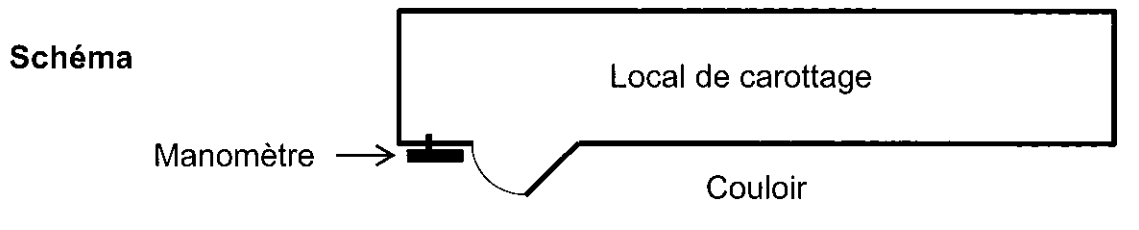
C.4 L'employé explique à l'inspecteur ne pas être classé A ou B et effectuer ce type de mission au maximum une fois par semaine dans des conditions similaires à celles décrites dans la question C3.

Commenter cette situation.

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 7/15

Partie D : Contrôle de dépression (5/60 points)

L'opération de carottage à sec génère de fines poussières radioactives. Ces poussières sont aspirées à la base du carottage et l'opération se déroule dans un local en dépression afin de prévenir toute dispersion de matière. La dépression minimale exigée entre le local carottage et le couloir est $\Delta p = 160 \text{ Pa}$ et est contrôlée par un manomètre à colonne de liquide (eau colorée, $\rho = 1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), décrit en **annexe 3**, situé à l'entrée du local.



D.1 Associer à chacune des pressions p_1 et p_2 le lieu correspondant : couloir ou local de carottage.

Un essai de mise en dépression du local de carottage est réalisé en présence d'une délégation d'inspecteurs de l'ASN.

D.2 Calculer la valeur Δp de la dépression (on prendra $g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$). Est-elle conforme à l'attendu ?

Les inspecteurs invalident la mesure. Quel peut être leur argument ? (Se servir de l'**annexe 3**)

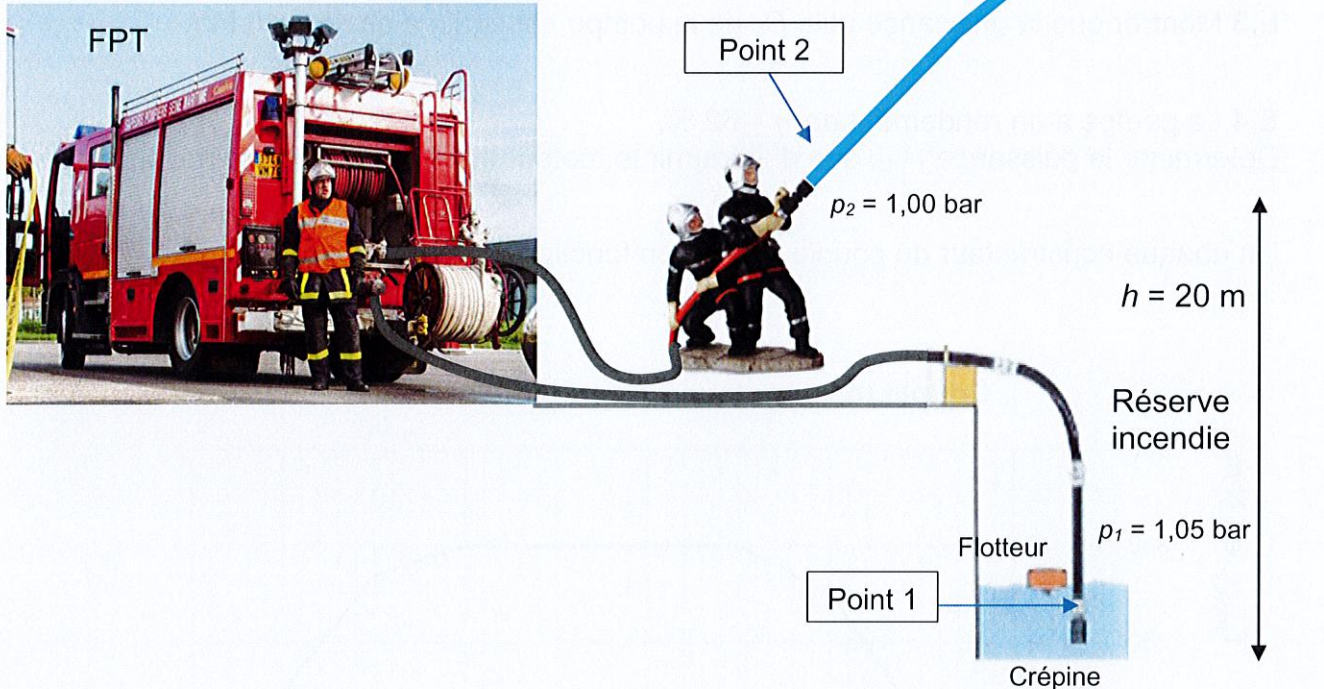
D.3 La porte d'entrée du local est de dimensions $2,0 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$. Déterminer la force pressante minimale exercée par la dépression $\Delta p = 160 \text{ Pa}$ sur cette porte.

L'ouverture de la porte est-elle aisée ? Est-il raisonnable de porter la dépression à des valeurs très supérieures à 160 Pa ?

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 8/15

Partie E : Exercice incendie (11/60 points)

L'ASN exige un exercice incendie afin de vérifier que les moyens dont dispose l'ANDRA restent suffisants alors que le nouveau bâtiment se trouve à une hauteur plus importante que les autres bâtiments de la réserve d'eau.



La réserve incendie de 150 m³ est 20 m en contrebas et l'ASN souhaite vérifier qu'il sera possible d'arroser le toit du bâtiment depuis le sol à raison de 1 000 L·min⁻¹ pendant au moins 1 heure.

L'ANDRA dispose d'un fourgon pompe tonne (FPT) servi par du personnel qualifié.

Les grandeurs relatives au point de pompage porteront l'indice (1) juste en entrée de la crépine et celles relatives à la sortie de la lance porteront l'indice (2).

Le commandant des opérations de secours s'adresse à ses sapeurs-pompiers :

« Installez une longueur $L_1 = 25$ m de tuyau de diamètre $\varnothing D_1 = 110$ mm entre le point de pompage et le FPT et une longueur $L_2 = 30$ m de tuyau de diamètre $\varnothing D = 65$ mm entre le FPT et la lance. Réglez la lance sur un diamètre de sortie $\varnothing D_2 = 25$ mm.

Pour répondre aux objectifs, la vitesse v_2 de l'eau en sortie de lance devra être supérieure à 30 m·s⁻¹ avec un débit $Q_V = 1\,000$ L·min⁻¹ pour arroser correctement la toiture.

Exécution ! »

On considère ici que l'eau se comporte comme un fluide incompressible en écoulement permanent.

Théorème de Bernoulli :

$$p_2 - p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \Sigma p_{\text{pertes}} = \frac{P_U}{Q_V}$$

$g = 9,81$ m·s⁻² ; $\rho = 1\,000$ kg·m⁻³ (masse volumique de l'eau)

$Q_V = S \cdot v$

$p_{L1} = 2,7$ kPa·m⁻¹

$p_{L2} = 3,8$ kPa·m⁻¹

P_U

Σp_{pertes}

Q_V en m³·s⁻¹ ; S en m² ; v en m·s⁻¹

pertes de charge linéiques dans le tuyau $\varnothing D_1$

pertes de charge linéiques dans le tuyau $\varnothing D_2$

puissance utile de la pompe en W

pertes de charge en Pa

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 9/15

E.1 Déterminer la vitesse v_2 de l'eau en sortie de lance. La vitesse v_2 est-elle conforme à l'attendu ?

Sachant que $v_1 = 1,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, montrer que $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) \approx 575 \text{ kPa}$.

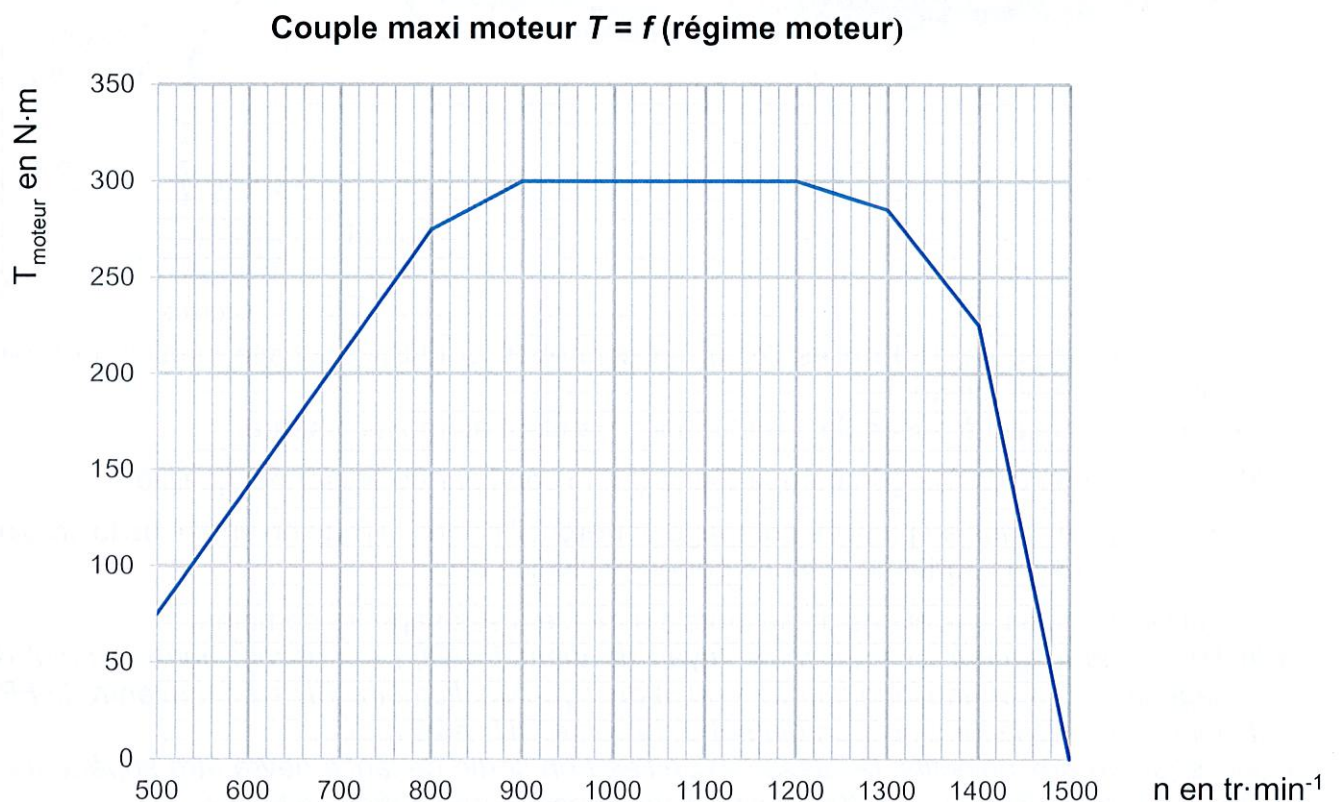
E.2 Déterminer les pertes de charge totales dans les tuyaux Σp_{pertes} .

E.3 Montrer que la puissance utile P_U de la pompe est égale à environ 16 kW.

E.4 La pompe a un rendement de $\eta = 62 \%$.

Déterminer la puissance P_{mot} que doit fournir le moteur thermique qui entraîne la pompe.

Un abaque constructeur du couple moteur en fonction du régime moteur est fixé sur le FPT.



n est la vitesse de rotation en tours par minute. Ω est la vitesse de rotation en radians par seconde.

On rappelle que $P_{\text{Moteur}} = T \cdot \Omega$ où P_{Moteur} en W si T en N·m et Ω en rad·s⁻¹

E.5 Après analyse des paramètres, le sapeur règle le régime moteur à $n = 860 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Le moteur est-il capable de fournir la puissance nécessaire dans les conditions étudiées ? Justifier.

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 10/15

Partie F : Incident dans le local de dégazage (8/60 points)

On rappelle que l'installation du contrôle de colis permet des contrôles des teneurs gazeuses en ^3H et ^{14}C .

Un technicien doit étalonner la chaîne de mesure à l'aide d'une source étalon d'eau tritiée dont l'activité du jour est $A = 17,2 \text{ GBq}$.

Dans le même local, la manipulation d'un élément constitutif de l'échafaudage lors du retrait de ce dernier provoque la casse du flacon contenant la source étalon.

Les échafaudeurs évacuent aussitôt le local alors que le technicien prend quelques minutes pour contenir l'effluent à l'aide d'absorbants avant d'évacuer à son tour.

Alertés, les conseillers en radioprotection et l'ASN présents sur le site analysent la situation.

$\tau = 10 \%$ taux de mise en suspension de gouttelettes tritiées

$V = 4 \text{ m}^3$ volume de la sphère de vie considérée contaminée par la mise en suspension

$t = 5 \text{ min}$ durée d'exposition évaluée très approximativement par le technicien

$e(g) = 1,8 \times 10^{-5} \mu\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ dose efficace par unité d'incorporation

F.1 Déterminer l'activité volumique A_V en suspension dans la sphère de vie du technicien.

F.2 Calculer l'activité ingérée A_{interne} par le technicien.

En déduire sa dose efficace engagée E_{interne} .

Devant l'incertitude importante de la durée de l'exposition, l'ASN demande que des analyses toxicologiques des urines du technicien soient réalisées par l'IRSN.

Les urines sont collectées par durée de 24 h pendant 3 jours. Les mesures et les fractions excrétées dans les urines attendues par la connaissance du modèle biocinétique sont données dans le **Document réponse 3**.

F.3 Compléter le **Document réponse 3** en calculant les activités engagées estimées à partir de chacune des 3 mesures et des facteurs d'excrétion.

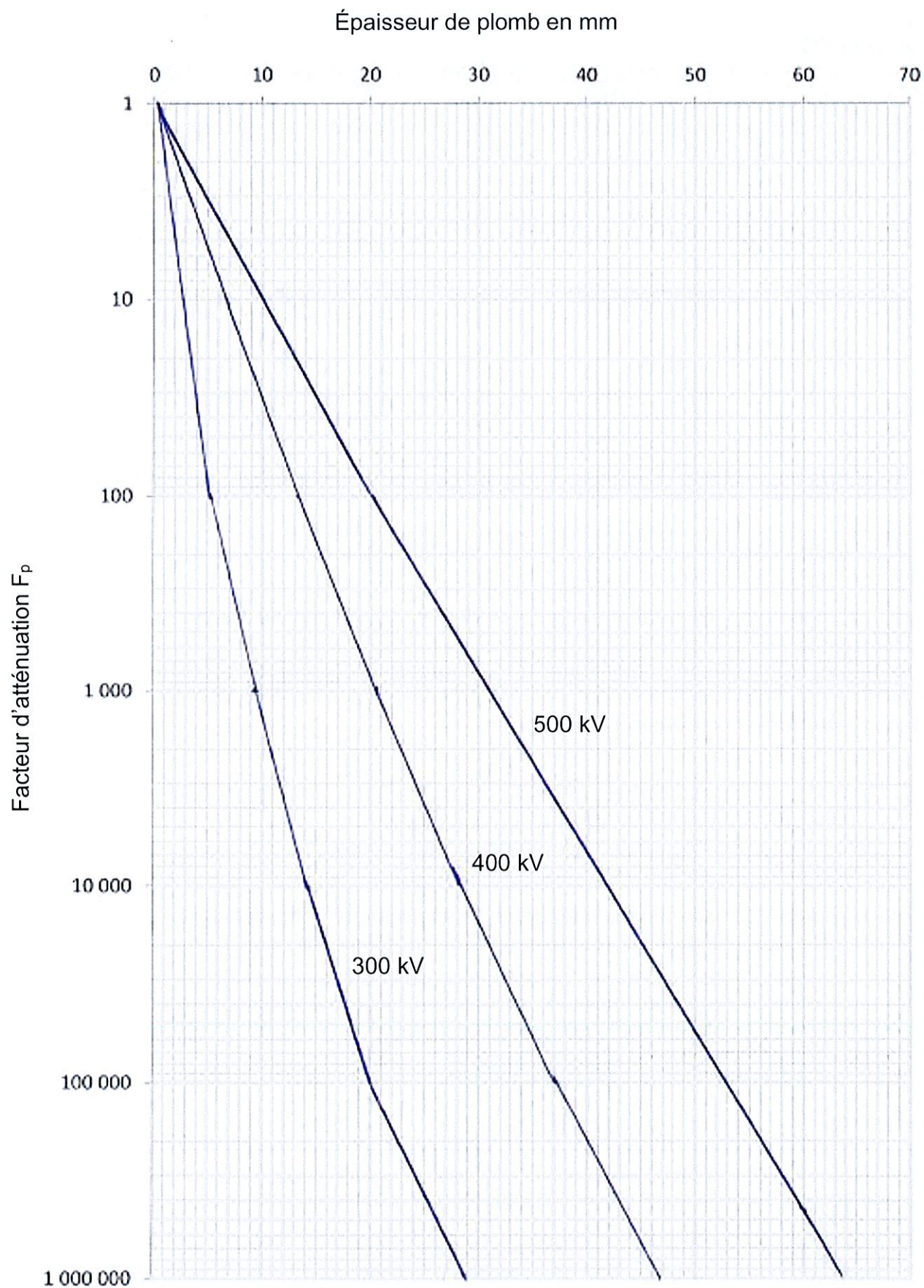
L'activité incorporée retenue sera la moyenne de ces valeurs.

F.4 En déduire la dose efficace engagée à retenir pour le technicien.

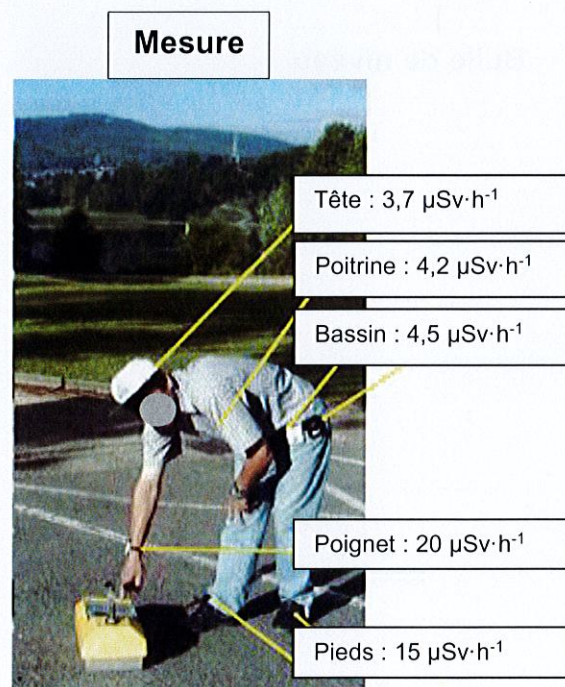
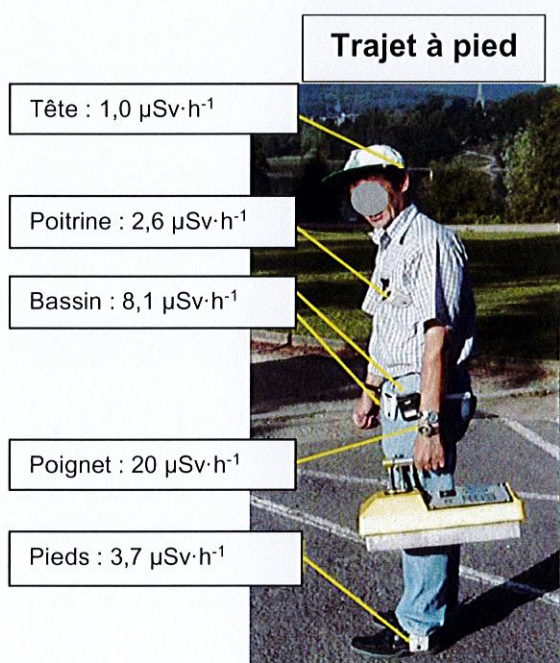
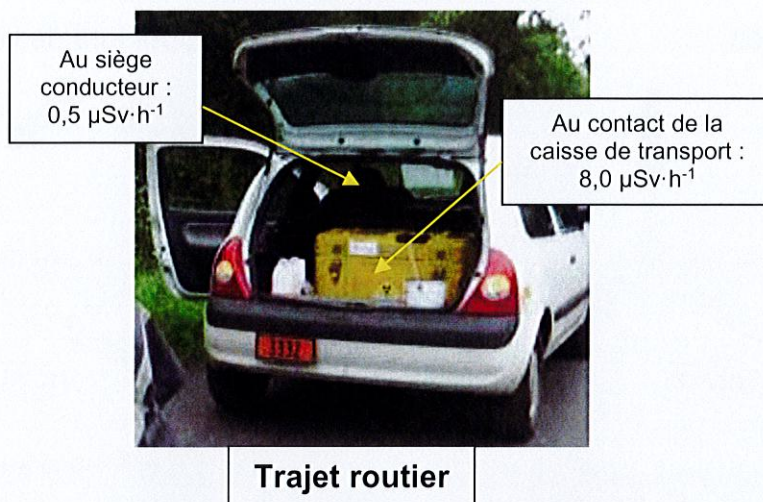
Le technicien a-t-il surestimé ou sous-estimé sa durée d'exposition ?

BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 11/15

Annexe 1



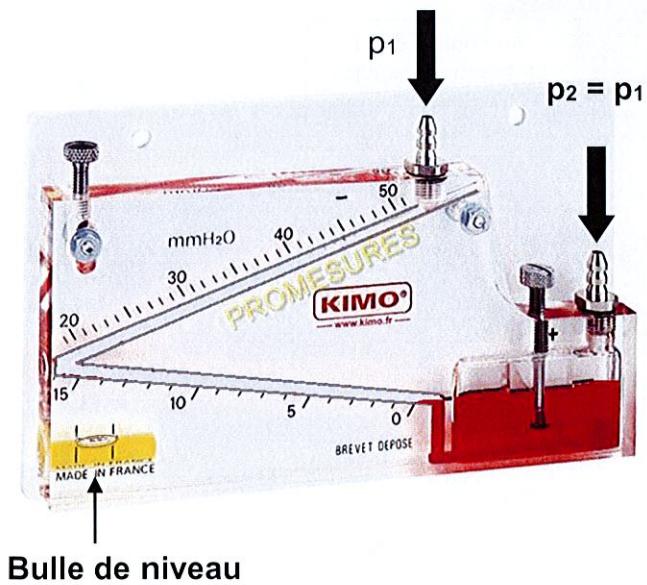
Annexe 2 : Étude de poste gammadensimètre – humidimètre



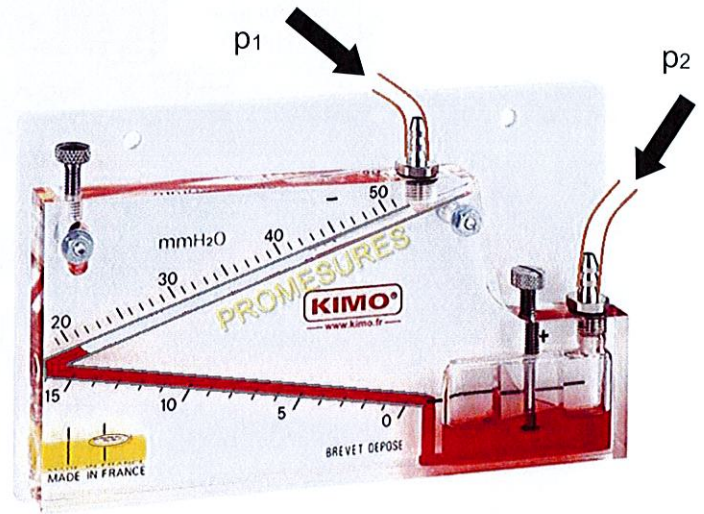
BTS ENVIRONNEMENT NUCLÉAIRE		Session 2024
U41 : Pré-étude et modélisation	Code : 24ENE4MOD	Page 13/15

Annexe 3 Manomètre à colonne de liquide

1/ Avant installation



2/ En situation, lors de l'essai de ventilation



À RENDRE AVEC LA COPIE

Document réponse 1 : Enceinte auto-protectrice

Paroi	Dimensions :			Masse en kg	Quote-part de la masse du plafond portée par une paroi verticale	Charge par appui en kN	Surface d'appui en m ²	Pression de contact au sol en kPa
	d'un des côtés en m	de l'autre côté en m	épaisseur e en mm					
1	2,90	1,91	28	1 706				
2	2,47	1,91	47	2 439	16 %	27,1	0,0898	302
3			25		16 %			
4	2,90	2,47	28	2 206	34 %	27,9	0,0812	343
5	2,90	2,47	28	2 206	34 %	27,9	0,0812	343

Document réponse 2 : EDP

Corps entier	Extrémités
--------------	------------

Pour 1 trajet routier (agence / ANDRA ou ANDRA / agence)	⁰ H en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$		
	t en h		
	H en μSv		
	E en μSv		
Total pour les trajets routiers	Nb trajets		
	H _R en μSv		
	E _R en μSv		

Pour 1 trajet à pied	⁰ H en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$		
	t en h		
	H en μSv		
	E en μSv		
Total pour les trajets à pied	Nb trajets		
	H _P en μSv		
	E _P en μSv		

Pour 1 mesure de compactage	⁰ H en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$		
	t en h		
	H en μSv		
	E en μSv		
Total pour les mesures de compactage	Nb de mesures		
	H _M en μSv		
	E _M en μSv		

Total pour la journée	H _{1J} en μSv		
	E _{1J} en μSv		

Document réponse 3 : Excrétions urinaires

	A mesurée en kBq	Fraction excrétée	A _{interne} en MBq
Jour 1	345	1,3 %	
Jour 2	495	2,3 %	
Jour 3	517	2,2 %	
A _{interne} moyenne en MBq			