

Radiations, dosimétrie et protection des équipages

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Radiations, dosimétrie et protection des équipages: comment « Dose absorbée et dose équivalente » agit-il sur « Protection d'une colonie », et quel repère issu de « Mini-projet de validation » permet de vérifier la décision?

Intuition. Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière. Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

1

Dose absorbée et dose équivalente

Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière.

2

Protection d'une colonie

Une colonie durable peut utiliser la distance, la géométrie, des matériaux riches en hydrogène et éventuellement du régolithe.

3

Mini-projet de validation

Concevoir un plan de radioprotection opérationnelle: dosimètres individuels, cartographie des zones, seuils d'action, refuge, délai de repli, procédure événement solaire, archivage des expositions et règle de...

Repère concret. Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

- Dose absorbée et dose équivalente — Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière.
- Protection d'une colonie — Une colonie durable peut utiliser la distance, la géométrie, des matériaux riches en hydrogène et éventuellement du régolithe.
- Mini-projet de validation — Concevoir un plan de radioprotection opérationnelle: dosimètres individuels, cartographie des zones, seuils d'action, refuge, délai de repli, procédure événement solaire,...

CARTE DE MAÎTRISE · MODULE 26

Quatre repères à maîtriser — Radiations, dosimétrie et protection des équipages

Dose absorbée et dose équivalente

Définition

Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière. Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

Intuition ou cas concret

Dose équivalente: on part de la dose absorbée dans un organe ou un tissu et on la pondère selon le type et l'énergie du rayonnement au moyen d'un facteur de pondération radiologique.

Repère quantitatif

Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

Limite ou critère de vigilance

C'est une grandeur physique: elle ne dit pas encore à elle seule combien deux rayonnements différents produisent le même risque biologique.

Exercice guidé — Dose absorbée et dose équivalente

Cas « Dose absorbée et dose équivalente » — Dose équivalente: on part de la dose absorbée dans un organe ou un tissu et on la pondère selon le type et l'énergie du rayonnement au moyen d'un facteur de pondération...
Repère: Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$. Réserve: C'est une grandeur physique: elle ne dit pas encore à elle seule combien deux rayonnements différents produisent le même risque biologique.

Corrigé raisonné — Dose absorbée et dose équivalente

Point de départ

Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière. Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

Indice du cas

Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$.

Réserve à appliquer

C'est une grandeur physique: elle ne dit pas encore à elle seule combien deux rayonnements différents produisent le même risque biologique.

Conclusion

La règle de lecture est donc: $\text{Gy} = \text{énergie déposée}$; $\text{Sv équivalent} = \text{pondération du rayonnement}$; $\text{Sv efficace} = \text{pondération supplémentaire des tissus}$.

Protection d'une colonie

Définition

Une colonie durable peut utiliser la distance, la géométrie, des matériaux riches en hydrogène et éventuellement du régolithe. Mais enterrer un habitat crée d'autres problèmes: accès, structure, poussière, maintenance et évacuation.

Intuition ou cas concret

Le bon blindage est un compromis système.

Repère quantitatif

L'opérateur doit donc conserver la grandeur brute, le modèle de conversion et le contexte d'exposition.

Limite ou critère de vigilance

Il réduit le risque radiologique sans rendre les autres risques incontrôlables.

Exercice guidé — Protection d'une colonie

Cas « Protection d'une colonie » — Le bon blindage est un compromis système. Repère: L'opérateur doit donc conserver la grandeur brute, le modèle de conversion et le contexte d'exposition. Réserve: Il réduit le risque radiologique sans rendre les autres risques incontrôlables.

Corrigé raisonné — Protection d'une colonie

Point de départ

Une colonie durable peut utiliser la distance, la géométrie, des matériaux riches en hydrogène et éventuellement du régolithe. Mais enterrer un habitat crée d'autres problèmes: accès, structure, poussière, maintenance et évacuation.

Indice du cas

L'opérateur doit donc conserver la grandeur brute, le modèle de conversion et le contexte d'exposition.

Réserve à appliquer

Il réduit le risque radiologique sans rendre les autres risques incontrôlables.

Conclusion

La procédure doit relier détection, confirmation, arrêt de tâche, configuration des systèmes, déplacement, comptage des personnes et maintien des fonctions vitales.

Repères numériques conservés. 1gy.

Mini-projet de validation

Définition

Concevoir un plan de radioprotection opérationnelle: dosimètres individuels, cartographie des zones, seuils d'action, refuge, délai de repli, procédure événement solaire, archivage des expositions et règle de décision médicale.

Intuition ou cas concret

Objectif du module — raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Repère quantitatif

D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme.

Limite ou critère de vigilance

Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Exercice guidé — Mini-projet de validation

Cas « Mini-projet de validation » — Objectif du module — raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Corrigé raisonné — Mini-projet de validation

Point de départ

Concevoir un plan de radioprotection opérationnelle: dosimètres individuels, cartographie des zones, seuils d'action, refuge, délai de repli, procédure événement solaire, archivage des expositions et règle de décision médicale.

Indice du cas

D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme.

Réserve à appliquer

Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Conclusion

Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Particules, énergie et ionisation

Définition

Objectif du module — raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Repère quantitatif

D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme.

Limite ou critère de vigilance

Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation

Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Corrigé raisonné — Particules, énergie et ionisation

Point de départ

Objectif du module — raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Indice du cas

D: dose absorbée en gray; E_{dep} : énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme.

Réserve à appliquer

Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage —
« Particules, énergie et ionisation ».

Conclusion

Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Pour aborder « Radiations, dosimétrie et protection des équipages », les prérequis conseillés sont modules 00 à 22 recommandés selon le sujet. Pour « Radiations, dosimétrie et protection des équipages », une notation technique n'est utilisée qu'après avoir été reliée à son sens physique ou opérationnel.

Avant ce module: 02 — Physique fondamentale: mouvement, énergie, pression et chaleur et 18 — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique.

Objectifs de maîtrise

- Reconstruire avec ses propres mots le mécanisme étudié dans « Deux familles de risque: fond galactique et événements solaires ».
- Vérifier par un ordre de grandeur le résultat utilisé dans « Dose absorbée et dose équivalente ».
- Proposer un contrôle indépendant avant de conclure sur « Géométrie du blindage ».
- Justifier une action de mission à partir des limites observées dans « Dosimétrie individuelle et collective ».

1. Deux familles de risque: fond galactique et événements solaires

Les rayons cosmiques galactiques constituent un fond chronique de particules très énergétiques. Les événements de particules solaires peuvent produire des augmentations rapides. Une mission doit donc gérer à la fois la dose cumulée et l'urgence d'un épisode solaire.

Le blindage n'agit pas comme un mur parfait: certaines particules produisent des secondaires lorsqu'elles traversent la matière.

2. Dose absorbée et dose équivalente

Dose absorbée: elle mesure l'énergie déposée par le rayonnement dans la matière. Elle s'exprime en gray (Gy), avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule par kilogramme}$. C'est une grandeur physique: elle ne dit pas encore à elle seule combien deux rayonnements différents produisent le même risque biologique.

Dose équivalente: on part de la dose absorbée dans un organe ou un tissu et on la pondère selon le type et l'énergie du rayonnement au moyen d'un facteur de pondération radiologique. Elle s'exprime en sievert (Sv). Deux champs de rayonnement déposant la même énergie peuvent donc conduire à des doses équivalentes différentes.

Dose efficace: elle combine ensuite les doses équivalentes reçues par différents organes avec des facteurs de pondération tissulaire, afin de représenter un indicateur global de risque stochastique pour l'organisme. Elle s'exprime elle aussi en sievert, mais ce n'est pas la même grandeur que la dose équivalente.

La règle de lecture est donc: $Gy = \text{énergie déposée}$; $Sv \text{ équivalent} = \text{pondération du rayonnement}$; $Sv \text{ efficace} = \text{pondération supplémentaire des tissus}$. Une analyse martienne doit toujours préciser quelle grandeur elle emploie, sur quelle durée et avec quel modèle de pondération.

3. Géométrie du blindage

Ajouter de la masse uniquement sur une paroi peut être moins efficace qu'organiser une zone protégée autour d'un petit volume refuge. Eau, nourriture et consommables peuvent participer au blindage si leur position reste compatible avec la maintenance et la masse.

Un abri-tempête est donc une architecture de rangement autant qu'une question de matériau.

4. Dosimétrie individuelle et collective

Chaque membre d'équipage doit connaître sa dose cumulée, mais la mission doit également cartographier les zones de l'habitat et les activités. Une EVA, un rover pressurisé ou un atelier peuvent avoir des expositions différentes.

La décision opérationnelle relie prévision solaire, dosimètres, emplacement du refuge et temps nécessaire pour interrompre une tâche.

5. Protection d'une colonie

Une colonie durable peut utiliser la distance, la géométrie, des matériaux riches en hydrogène et éventuellement du régolithe. Mais enterrer un habitat crée d'autres problèmes: accès, structure, poussière, maintenance et évacuation.

Le bon blindage est un compromis système. Il réduit le risque radiologique sans rendre les autres risques incontrôlables.

6. De la mesure physique à la décision médicale

La radioprotection mélange facilement des grandeurs qui n'ont pas le même sens. Le gray mesure l'énergie déposée par unité de masse. La dose équivalente ajoute une pondération liée au rayonnement. La dose efficace ajoute ensuite une pondération des tissus pour produire un indicateur global de risque stochastique. Ces conversions utilisent des modèles et ne transforment pas un dosimètre en prédiction parfaite de santé individuelle. L'opérateur doit donc conserver la grandeur brute, le modèle de conversion et le contexte d'exposition.

7. Budget de dose: temps, lieu et activité

La dose cumulée n'est pas seulement une propriété du trajet Terre-Mars. Elle dépend du temps passé dans chaque zone et de la protection disponible. Un budget peut séparer transit, habitat, EVA, rover et refuge. Cette décomposition permet de voir où une amélioration d'architecture achète réellement de la réduction de risque. Raccourcir une EVA de dix minutes n'a pas le même effet que déplacer des dizaines de jours de sommeil vers une zone mieux protégée.

8. Événement solaire: concevoir le délai d'alerte et le chemin vers le refuge

Un refuge n'est utile que si l'équipage peut l'atteindre à temps. La procédure doit relier détection, confirmation, arrêt de tâche, configuration des systèmes, déplacement, comptage des personnes et maintien des fonctions vitales. Sur un site étendu, la question devient géographique: quelle EVA peut être autorisée si le retour au refuge exige plus de temps que le délai d'alerte raisonnablement disponible? La radioprotection rejoint alors la planification des activités et la mobilité.

Cas radiologique: séparer mesure physique, risque et décision

Une alarme de dosimètre fournit d'abord une information de dose ou de débit de dose. La décision de rejoindre un abri dépend ensuite du type d'événement, de la dose déjà reçue, du temps nécessaire pour rejoindre le refuge et des limites opérationnelles. Il faut éviter de convertir automatiquement toute grandeur en un unique « risque biologique ». La dose absorbée décrit une énergie par masse; la dose équivalente introduit la pondération du rayonnement pour un tissu; la dose efficace ajoute ensuite la pondération des tissus. Ces grandeurs répondent à des questions différentes.

9. Exemple calculé pas à pas

Exemple volontairement simplifié: un environnement produit une dose absorbée moyenne de 0,60 mGy/j pendant 180 jours. La dose absorbée cumulée vaut $0,60 \times 180 = 108 \text{ mGy} = 0,108 \text{ Gy}$. Si, pour l'exercice, on applique un facteur de pondération radiologique moyen égal à 2, la dose équivalente pédagogique serait 0,216 Sv. Ce calcul ne donne pas automatiquement une dose efficace: il faudrait encore connaître la distribution entre organes et les facteurs tissulaires. L'exemple sert précisément à empêcher la confusion entre les trois niveaux de grandeur.

10. Exercice progressif

Construire un budget séparant 150 jours de transit, 300 jours en habitat et 40 h d'EVA. Choisir des taux de dose pédagogiques distincts, calculer les contributions et identifier quelle activité domine le total. Refaire le calcul après réduction de 30 % du taux dans le refuge de sommeil.

11. Solution raisonnée

Si une zone reçoit 0,18 mGy/h pendant 6 h, la dose absorbée est 1,08 mGy. Avec un facteur de pondération radiologique égal à 1, la dose équivalente du tissu considéré est numériquement 1,08 mSv. Ce résultat n'est pas automatiquement une dose efficace: celle-ci nécessiterait les doses équivalentes des tissus concernés et leurs facteurs de pondération tissulaire.

12. Mini-projet de validation

Concevoir un plan de radioprotection opérationnelle: dosimètres individuels, cartographie des zones, seuils d'action, refuge, délai de repli, procédure événement solaire, archivage des expositions et règle de décision médicale.

Approfondissement du module 26: comprendre, calculer, vérifier et décider

Objectif du module — raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Repères du passage: contrôle dimensionnel

1. Particules, énergie et ionisation

Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

Mini-leçons quantitatives canoniques — protocole V7.4

Toutes les formules quantitatives de ce module sont traitées comme de vraies mini-leçons : intuition, symboles, unités, cas numérique, contrôles, sensibilité, deux exercices corrigés et décision mission.

1. Particules, énergie et ionisation

$$D = E_{\text{dep}} / m$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $D = E_{\text{dep}} / m$ » dans « 1. Particules, énergie et ionisation » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 1. Particules, énergie et ionisation », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

D: dose de rayonnement calculée par cette relation pour quantifier «D»; E_dep: énergie correspondant à «E dep»; m: masse.

4 — Formule

$$D = E_{\text{dep}} / m$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «D égale E indice dep divisé par m».

6 — Symboles et sens

D: dose de rayonnement calculée par cette relation pour quantifier «D»; E_dep: énergie correspondant à «E dep»; m: masse.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

D → Gy; E dep → J, Wh ou kWh; masse → kg.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

m sert de «par unité de» dans cette relation, tandis que E_dep est la quantité ramenée à une unité de m. Leur quotient produit ainsi D.

11 — Hypothèses

Le ratio est fiable seulement avec un diviseur m non nul et correctement mesuré. Vérifier aussi que E_dep et m décrivent le même système de référence.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Vérification de fermeture: D·m doit fermer la relation sur E_dep. Un résidu important impose de reprendre unités, ordre ou parenthèses.

13 — Cas numérique

$$E_{\text{dep}} = 0.0020 \text{ J m} = 70 \text{ kg} \quad D = 0.0020/70 = 2.86 \times 10^{-5} \text{ Gy} = 28.6 \text{ } \mu\text{Gy}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

m sert de «par unité de» dans cette relation, tandis que E_dep est la quantité ramenée à une unité de m. Leur quotient produit ainsi D.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Vérification de fermeture: D·m doit fermer la relation sur E_dep. Un résidu important impose de reprendre unités, ordre ou parenthèses.

16 — Estimation mentale

Vérifier mentalement le sens du ratio: l'échelle de D découle de celle de E_dep relativement à m, pas de la différence entre eux.

17 — Interprétation

Le nombre issu de «D = E_dep / m» est interprété à l'intérieur de «1. Particules, énergie et ionisation», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 1. Particules, énergie et ionisation »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le quotient conserve les variations relatives du numérateur, mais inverse celles du dénominateur. C'est le test de sensibilité adapté à D.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 0.0012, 60. Appliquez « $D = E_{\text{dep}} / m$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 0.0012, 60. Relation appliquée : $D = E_{\text{dep}} / m$. Calcul et résultat : $D = 0.0012/60 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ Gy} = 20 \text{ } \mu\text{Gy}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 1. Particules, énergie et ionisation ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 1. Particules, énergie et ionisation », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$E_{\text{dep}} = 0.0020 \text{ J m} = 70 \text{ kg}$ $D = 0.0020/70 = 2.86 \times 10^{-5} \text{ Gy} = 28.6 \text{ } \mu\text{Gy}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $D = E_{\text{dep}} / m$ » est interprété à l'intérieur de « 1. Particules, énergie et ionisation », jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

2. Dose absorbée et dose équivalente

$$H = \Sigma(w_R \times D_R)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $H = \Sigma(w_R \times D_R)$ » dans « 2. Dose absorbée et dose équivalente » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 2. Dose absorbée et dose équivalente », plusieurs contributions comparables sont réunies pour obtenir un total traçable plutôt qu'une estimation à l'intuition.

3 — Grandeurs

Σ : additionner; H: dose équivalente; w_R : poids de pondération; D_R : dose ou contribution radiologique associée au terme R du bilan

4 — Formule

$$H = \Sigma(w_R \times D_R)$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: « H égale somme de (w indice R multiplié par D indice R) ».

6 — Symboles et sens

Σ : additionner; H: dose équivalente; w_R : poids de pondération; D_R : dose ou contribution radiologique associée au terme R du bilan

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

dose équivalente → Sv; poids de pondération → sans dimension; $D_R \rightarrow \text{Gy, Sv, mGy/h ou mSv/h}$ selon la grandeur dosimétrique.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le Σ ordonne de parcourir la collection d'indices, d'évaluer leur contribution une à une et de cumuler ces résultats en H.

11 — Hypothèses

Les bornes d'indice et la définition de la population sommée font partie du modèle; une omission ou un doublon fausse H même si l'arithmétique est correcte.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Test de fermeture: partager les indices en deux groupes, calculer deux sous-totaux puis vérifier que leur addition reconstitue H.

13 — Cas numérique

$D=0.50$ mGy, $w_R=1$ protons: $D=0.20$ mGy, teaching $w_R=2$ $H = 1 \times 0.50 + 2 \times 0.20 = 0.90$ mSv

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le Σ ordonne de parcourir la collection d'indices, d'évaluer leur contribution une à une et de cumuler ces résultats en H.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Test de fermeture: partager les indices en deux groupes, calculer deux sous-totaux puis vérifier que leur addition reconstitue H.

16 — Estimation mentale

Pour prévoir H, regarder combien de termes participent et leur échelle typique; un total incohérent avec ces deux informations doit être repris.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $H = \Sigma(w_R \times D_R)$ » est interprété à l'intérieur de «2. Dose absorbée et dose équivalente», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 2. Dose absorbée et dose équivalente »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le test de sensibilité modifie un seul terme à la fois et observe sa transmission au total, ce qui permet d'identifier les contributions critiques.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $w = 1$ et 0; $w = 2$; autres valeurs: 0.30, 0.10. Appliquez « $H = \Sigma(w_R \times D_R)$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $w = 1$ et 0; $w = 2$; autres valeurs: 0.30, 0.10. Relation appliquée : $H = \Sigma(w_R \times D_R)$. Calcul et résultat : $H = 0.30 + 0.20 = 0.50$ mSv. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 2. Dose absorbée et dose équivalente ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 2. Dose absorbée et dose équivalente », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$D=0.50$ mGy, $w_R=1$ protons: $D=0.20$ mGy, teaching $w_R=2$ $H = 1 \times 0.50 + 2 \times 0.20 = 0.90$ mSv Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $H = \sum(w_R \times D_R)$ » est interprété à l'intérieur de «2. Dose absorbée et dose équivalente», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

3. GCR et événements solaires

$$D_{\text{cum}} = \sum D_i$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $D_{\text{cum}} = \sum D_i$ » dans «3. GCR et événements solaires» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «3. GCR et événements solaires», plusieurs contributions comparables sont réunies pour obtenir un total traçable plutôt qu'une estimation à l'intuition.

3 — Grandeurs

Σ : additionner; D_{cum} : dose cumulée sur le périmètre considéré; D_i : dose reçue pendant l'intervalle ou la contribution i .

4 — Formule

$$D_{\text{cum}} = \sum D_i$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «D indice cum égale somme de D indice i».

6 — Symboles et sens

Σ : additionner; D_{cum} : dose cumulée sur le périmètre considéré; D_i : dose reçue pendant l'intervalle ou la contribution i .

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

D_{cum} et chaque D_i dans la même unité de dose de la même grandeur dosimétrique, par exemple Gy avec Gy ou Sv avec Sv. Un débit de dose, tel que mGy/h, doit d'abord être intégré sur une durée avant d'être additionné comme dose.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La dose cumulée est la somme des doses déjà intégrées de chaque contribution. Σ signifie ici additionner des quantités de même nature, pas mélanger doses et débits de dose.

11 — Hypothèses

Les bornes d'indice et la définition de la population sommée font partie du modèle; une omission ou un doublon fausse D_{cum} même si l'arithmétique est correcte.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle de fermeture: séparer les contributions en deux groupes, sommer chaque groupe, puis vérifier que les deux sous-totaux additionnés redonnent D_{cum} .

13 — Cas numérique

$$D_1 = 0.35 \text{ mSv } D_2 = 0.22 \text{ mSv } D_3 = 0.18 \text{ mSv } D_{\text{cum}} = 0.35 + 0.22 + 0.18 = 0.75 \text{ mSv}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La dose cumulée est la somme des doses déjà intégrées de chaque contribution. Σ signifie ici additionner des quantités de même nature, pas mélanger doses et débits de dose.

15 — Vérification

Contrôle de fermeture: séparer les contributions en deux groupes, sommer chaque groupe, puis vérifier que les deux sous-totaux additionnés redonnent D_{cum} .

16 — Estimation mentale

Pour prévoir D_{cum} , regarder combien de termes participent et leur échelle typique; un total incohérent avec ces deux informations doit être repris.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $D_{cum} = \Sigma D_i$ » est interprété à l'intérieur de «3. GCR et événements solaires», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario «3. GCR et événements solaires»; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le test de sensibilité modifie un seul terme à la fois et observe sa transmission au total, ce qui permet d'identifier les contributions critiques.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 0.12, 0.28, 0.16 mSv. Appliquez « $D_{cum} = \Sigma D_i$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 0.12, 0.28, 0.16 mSv. Relation appliquée : $D_{cum} = \Sigma D_i$. Calcul et résultat : $D_{cum} = 0.56$ mSv. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour «3. GCR et événements solaires».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de «3. GCR et événements solaires», refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$D_1 = 0.35$ mSv $D_2 = 0.22$ mSv $D_3 = 0.18$ mSv $D_{cum} = 0.35 + 0.22 + 0.18 = 0.75$ mSv Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $D_{cum} = \Sigma D_i$ » est interprété à l'intérieur de «3. GCR et événements solaires», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

4. LET et qualité du rayonnement

$$LET = dE / dx$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $LET = dE / dx$ » dans «4. LET et qualité du rayonnement» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «4. LET et qualité du rayonnement», rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

LET: transfert linéique d'énergie, c'est-à-dire énergie déposée par unité de longueur parcourue; dE: petite quantité d'énergie déposée; dx: petite longueur de trajet correspondante.

4 — Formule

$$\text{LET} = dE / dx$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «LET égale dE divisé par dx».

6 — Symboles et sens

LET: transfert linéique d'énergie, c'est-à-dire énergie déposée par unité de longueur parcourue; dE: petite quantité d'énergie déposée; dx: petite longueur de trajet correspondante.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

LET en énergie/longueur, par exemple keV/μm ou J/m; dE dans l'unité d'énergie correspondante; dx dans l'unité de longueur correspondante.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Diviser l'énergie déposée dE par la longueur dx mesure la densité linéique de dépôt d'énergie le long de la trajectoire.

11 — Hypothèses

Le LET peut varier le long de la trajectoire; une valeur moyenne sur un segment ne décrit pas nécessairement les pics microscopiques de dépôt.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse local: $\text{LET} \times dx$ doit redonner dE sur le même petit segment.

13 — Cas numérique

$$dE = 50 \text{ keV} \quad dx = 10 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{LET} = 50/10 = 5 \text{ keV}/\mu\text{m}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Diviser l'énergie déposée dE par la longueur dx mesure la densité linéique de dépôt d'énergie le long de la trajectoire.

15 — Vérification

Contrôle inverse local: $\text{LET} \times dx$ doit redonner dE sur le même petit segment.

16 — Estimation mentale

Vérifier mentalement le sens du ratio: l'échelle de LET découle de celle de dE relativement à dx, pas de la différence entre eux.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $\text{LET} = dE / dx$ » est interprété à l'intérieur de «4. LET et qualité du rayonnement», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario «4. LET et qualité du rayonnement»; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le quotient conserve les variations relatives du numérateur, mais inverse celles du dénominateur. C'est le test de sensibilité adapté à LET.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 72, 12. Appliquez « $LET = dE / dx$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 72, 12. Relation appliquée : $LET = dE / dx$. Calcul et résultat : $LET = 72/12 = 6$ keV/ μ m. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 4. LET et qualité du rayonnement ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 4. LET et qualité du rayonnement », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$dE = 50$ keV $dx = 10$ μ m $LET = 50/10 = 5$ keV/ μ m Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $LET = dE / dx$ » est interprété à l'intérieur de « 4. LET et qualité du rayonnement », jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

5. Dosimètres et géométrie de mesure

$$\dot{D} = \Delta D / \Delta t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\dot{D} = \Delta D / \Delta t$ » dans « 5. Dosimètres et géométrie de mesure » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 5. Dosimètres et géométrie de mesure », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

$\dot{D}$: débit de dose; D: dose de rayonnement calculée par cette relation pour quantifier «D»; ΔD : variation ou dose additionnelle sur l'intervalle considéré; Δt : durée.

4 — Formule

$$\dot{D} = \Delta D / \Delta t$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «D point égale delta D divisé par delta t».

6 — Symboles et sens

$\dot{D}$: débit de dose; D: dose de rayonnement calculée par cette relation pour quantifier «D»; ΔD : variation ou dose additionnelle sur l'intervalle considéré; Δt : durée.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$\dot{D} \rightarrow$ Gy, Sv, mGy/h ou mSv/h selon la grandeur dosimétrique; $D \rightarrow$ Gy; $\Delta D \rightarrow$ Gy; durée $\rightarrow$ s.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Δt sert de «par unité de» dans cette relation, tandis que ΔD est la quantité ramenée à une unité de Δt . Leur quotient produit ainsi $\dot{D}$.

11 — Hypothèses

Le ratio est fiable seulement avec un diviseur Δt non nul et correctement mesuré. Vérifier aussi que ΔD et Δt décrivent le même système de référence.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Vérification de fermeture: $\dot{D} \cdot \Delta t$ doit fermer la relation sur ΔD . Un résidu important impose de reprendre unités, ordre ou parenthèses.

13 — Cas numérique

$\Delta D = 0.60 \text{ mSv}$ $\Delta t = 4.0 \text{ h}$ $\dot{D} = 0.60/4.0 = 0.15 \text{ mSv/h}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Δt sert de «par unité de» dans cette relation, tandis que ΔD est la quantité ramenée à une unité de Δt . Leur quotient produit ainsi $\dot{D}$.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Vérification de fermeture: $\dot{D} \cdot \Delta t$ doit fermer la relation sur ΔD . Un résidu important impose de reprendre unités, ordre ou parenthèses.

16 — Estimation mentale

Vérifier mentalement le sens du ratio: l'échelle de $\dot{D}$ découle de celle de ΔD relativement à Δt , pas de la différence entre eux.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $\dot{D} = \Delta D / \Delta t$ » est interprété à l'intérieur de «5. Dosimètres et géométrie de mesure», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 5. Dosimètres et géométrie de mesure »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le quotient conserve les variations relatives du numérateur, mais inverse celles du dénominateur. C'est le test de sensibilité adapté à $\dot{D}$.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 0.42 mSv , 3.0 h . Appliquez « $\dot{D} = \Delta D / \Delta t$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 0.42 mSv , 3.0 h . Relation appliquée : $\dot{D} = \Delta D / \Delta t$. Calcul et résultat : $\dot{D} = 0.42/3.0 = 0.14 \text{ mSv/h}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 5. Dosimètres et géométrie de mesure ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 5. Dosimètres et géométrie de mesure », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\Delta D = 0.60 \text{ mSv}$ $\Delta t = 4.0 \text{ h}$ $\dot{D} = 0.60/4.0 = 0.15 \text{ mSv/h}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $\dot{D} = \Delta D / \Delta t$ » est interprété à l'intérieur de «5. Dosimètres et géométrie de mesure», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

6. Blindage et production secondaire

$$\Sigma_m = \rho \times x$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Sigma_m = \rho \times x$ » dans «6. Blindage et production secondaire» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «6. Blindage et production secondaire», plusieurs contributions comparables sont réunies pour obtenir un total traçable plutôt qu'une estimation à l'intuition.

3 — Grandeurs

Σ_m : masse surfacique traversée; ρ : masse volumique du matériau; x : épaisseur traversée.

4 — Formule

$$\Sigma_m = \rho \times x$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «somme de indice m égale rho multiplié par x».

6 — Symboles et sens

Σ_m : masse surfacique traversée; ρ : masse volumique du matériau; x : épaisseur traversée.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

ρ en kg/m^3 et x en m donnent Σ_m en kg/m^2 .

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La masse volumique multipliée par l'épaisseur transforme une propriété volumique en masse par unité de surface.

11 — Hypothèses

Avant de réutiliser Σ_m dans un autre scénario, confirmer que la structure de produit de $\rho \times x$, les unités et les coefficients restent applicables.

12 — Contrôle indépendant

Σ_m/x doit redonner ρ ; Σ_m/ρ doit redonner x .

13 — Cas numérique

$$\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3 \times x = 20 \text{ cm } \Sigma_m = 1.0 \times 20 = 20 \text{ g/cm}^2$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La masse volumique multipliée par l'épaisseur transforme une propriété volumique en masse par unité de surface.

15 — Vérification

Σ_m/x doit redonner ρ ; Σ_m/ρ doit redonner x .

16 — Estimation mentale

Avant la saisie détaillée, construire une version simplifiée de « $\Sigma_m = \rho \times x$ » avec des nombres ronds. Le produit obtenu sert de référence à Σ_m .

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $\Sigma_m = \rho \times x$ » est interprété à l'intérieur de «6. Blindage et production secondaire», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 6. Blindage et production secondaire »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Augmenter un facteur de $\rho \times x$ tout seul doit augmenter Σ_m dans la même proportion. Cette propriété offre aussi un contrôle qualitatif du modèle.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 1.0 g/cm³, 35 cm. Appliquez « $\Sigma_m = \rho \times x$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 1.0 g/cm³, 35 cm. Relation appliquée : $\Sigma_m = \rho \times x$. Calcul et résultat : $\Sigma_m = 35$ g/cm². Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 6. Blindage et production secondaire ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 6. Blindage et production secondaire », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ $x = 20 \text{ cm}$ $\Sigma_m = 1.0 \times 20 = 20 \text{ g/cm}^2$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $\Sigma_m = \rho \times x$ » est interprété à l'intérieur de «6. Blindage et production secondaire», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

7. Abri de tempête et temps d'accès

$\text{Temps_refuge} = \text{distance} / \text{vitesse} + \text{marge}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Temps_refuge} = \text{distance} / \text{vitesse} + \text{marge}$ » dans « 7. Abri de tempête et temps d'accès » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 7. Abri de tempête et temps d'accès », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

Temps_refuge: durée totale nécessaire pour atteindre le refuge; distance: longueur du trajet; vitesse: vitesse moyenne de progression; marge: réserve de temps ajoutée pour les aléas.

4 — Formule

$\text{Temps_refuge} = \text{distance} / \text{vitesse} + \text{marge}$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «Temps indice refuge égale distance divisé par vitesse plus marge».

6 — Symboles et sens

Temps_refuge: durée totale nécessaire pour atteindre le refuge; distance: longueur du trajet; vitesse: vitesse moyenne de progression; marge: réserve de temps ajoutée pour les aléas.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Temps_refuge et marge en secondes, minutes ou heures; distance et vitesse dans des unités cohérentes afin que distance/vitesse soit une durée. On additionne donc bien deux temps.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

distance/vitesse donne le temps nominal de trajet; la marge ajoute une réserve temporelle pour les aléas qui ne sont pas inclus dans la vitesse moyenne.

11 — Hypothèses

La vitesse moyenne doit rester représentative du trajet. Pente, obstacles, fatigue et attente peuvent exiger une marge temporelle plus importante.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant: $(\text{Temps_refuge} - \text{marge}) \times \text{vitesse}$ doit redonner la distance. Une marge négative ou exprimée sans unité rendrait le bilan incohérent.

13 — Cas numérique

distance = 180 m vitesse = 1.2 m/s trajet = $180/1.2 = 150$ s marge = 120 s Temps_refuge = 270 s = 4.5 min

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

distance/vitesse donne le temps nominal de trajet; la marge ajoute une réserve temporelle pour les aléas qui ne sont pas inclus dans la vitesse moyenne.

15 — Vérification

Contrôle indépendant: $(\text{Temps_refuge} - \text{marge}) \times \text{vitesse}$ doit redonner la distance. Une marge négative ou exprimée sans unité rendrait le bilan incohérent.

16 — Estimation mentale

Pour l'ordre de grandeur, sommer quelques valeurs arrondies et vérifier que Temps_refuge reste au voisinage du total attendu.

17 — Interprétation

Le nombre issu de «Temps_refuge = distance / vitesse + marge» est interprété à l'intérieur de «7. Abri de tempête et temps d'accès», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 7. Abri de tempête et temps d'accès »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À vitesse fixe, +10 % de distance ajoute +10 % au temps nominal avant marge; à distance fixe, +10 % de vitesse divise le temps nominal par 1,10.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 240, 1.0 m/s, 90 s. Appliquez « Temps_refuge = distance / vitesse + marge », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 240, 1.0 m/s, 90 s. Relation appliquée : Temps_refuge = distance / vitesse + marge. Calcul et résultat : trajet=240 s; total=330 s=5.5 min. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 7. Abri de tempête et temps d'accès ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 7. Abri de tempête et temps d'accès », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

distance = 180 m vitesse = 1.2 m/s trajet = 180/1.2 = 150 s marge = 120 s Temps_refuge = 270 s = 4.5 min Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « Temps_refuge = distance / vitesse + marge » est interprété à l'intérieur de « 7. Abri de tempête et temps d'accès », jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

8. Dose cumulée et journal de mission

$$D_{\text{cum}} = \Sigma(\dot{D}_i \times \Delta t_i)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $D_{\text{cum}} = \Sigma(\dot{D}_i \times \Delta t_i)$ » dans « 8. Dose cumulée et journal de mission » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 8. Dose cumulée et journal de mission », plusieurs contributions comparables sont réunies pour obtenir un total traçable plutôt qu'une estimation à l'intuition.

3 — Grandeurs

Σ : additionner; D_{cum} : dose cumulée; $\dot{D}_i$: débit de dose moyen pendant l'intervalle i ; Δt_i : durée de cet intervalle.

4 — Formule

$$D_{\text{cum}} = \Sigma(\dot{D}_i \times \Delta t_i)$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: « D indice cum égale somme de (D point indice i multiplié par delta t indice i) ».

6 — Symboles et sens

Σ : additionner; D_{cum} : dose cumulée; $\dot{D}_i$: débit de dose moyen pendant l'intervalle i ; Δt_i : durée de cet intervalle.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$\dot{D}_i$ en dose/temps, par exemple mGy/h ou $\mu\text{Sv/h}$; Δt_i dans l'unité de temps correspondante; $\dot{D}_i \times \Delta t_i$ donne une dose (mGy ou μSv). Toutes les contributions sont ensuite converties dans une même unité de dose avant sommation.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Pour chaque intervalle, débit de dose $\times$ durée donne la dose reçue pendant cet intervalle. Σ additionne ensuite ces doses pour obtenir la dose cumulée.

11 — Hypothèses

Les bornes d'indice et la définition de la population sommée font partie du modèle; une omission ou un doublon fausse D_{cum} même si l'arithmétique est correcte.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle dimensionnel: $(\text{mGy/h}) \times h = \text{mGy}$. Contrôle de fermeture: recalculer chaque contribution $D_i = \dot{D}_i \Delta t_i$ puis vérifier que $\sum D_i = D_{\text{cum}}$.

13 — Cas numérique

8 h à 0.12 mSv/h = 0.96 mSv 16 h à 0.04 mSv/h = 0.64 mSv $D_{\text{cum}} = 0.96 + 0.64 = 1.60$ mSv

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Pour chaque intervalle, débit de dose $\times$ durée donne la dose reçue pendant cet intervalle. Σ additionne ensuite ces doses pour obtenir la dose cumulée.

15 — Vérification

Contrôle dimensionnel: $(\text{mGy/h}) \times h = \text{mGy}$. Contrôle de fermeture: recalculer chaque contribution $D_i = \dot{D}_i \Delta t_i$ puis vérifier que $\sum D_i = D_{\text{cum}}$.

16 — Estimation mentale

Pour prévoir D_{cum} , regarder combien de termes participent et leur échelle typique; un total incohérent avec ces deux informations doit être repris.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $D_{\text{cum}} = \sum (\dot{D}_i \times \Delta t_i)$ » est interprété à l'intérieur de «8. Dose cumulée et journal de mission», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 8. Dose cumulée et journal de mission »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À débit de dose constant, +10 % de durée donne +10 % de dose pour l'intervalle. À durée constante, +10 % de débit donne +10 % de dose.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 6 h, 0.10 mSv/h, 18 h, 0.03 mSv/h. Appliquez « $D_{\text{cum}} = \sum (\dot{D}_i \times \Delta t_i)$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 6 h, 0.10 mSv/h, 18 h, 0.03 mSv/h. Relation appliquée : $D_{\text{cum}} = \sum (\dot{D}_i \times \Delta t_i)$. Calcul et résultat : 1.14 mSv. Preserve location/activity labels for each interval. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 8. Dose cumulée et journal de mission ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 8. Dose cumulée et journal de mission », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

8 h à 0.12 mSv/h = 0.96 mSv 16 h à 0.04 mSv/h = 0.64 mSv $D_{\text{cum}} = 0.96 + 0.64 = 1.60$ mSv Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $D_{\text{cum}} = \sum (\dot{D}_i \times \Delta t_i)$ » est interprété à l'intérieur de «8. Dose cumulée et journal de mission», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

9. Incertitudes biologiques et limites des modèles

$$\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$ » dans « 9. Incertitudes biologiques et limites des modèles » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 9. Incertitudes biologiques et limites des modèles », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

Erreur_rel: taille de l'écart modèle-mesure rapportée à la mesure; $x_{\text{modèle}}$: valeur prédite; $x_{\text{mesuré}}$: valeur observée servant ici de référence.

4 — Formule

$$\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: « Erreur indice rel égale $|x_{\text{indice modèle}} - x_{\text{indice mesuré}}|$ divisé par $|x_{\text{indice mesuré}}|$ ».

6 — Symboles et sens

Erreur_rel: taille de l'écart modèle-mesure rapportée à la mesure; $x_{\text{modèle}}$: valeur prédite; $x_{\text{mesuré}}$: valeur observée servant ici de référence.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$x_{\text{modèle}}$ et $x_{\text{mesuré}}$ doivent avoir la même unité. Le numérateur $|x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}|$ garde cette unité, puis la division par $|x_{\text{mesuré}}|$ l'annule: Erreur_rel est sans dimension, souvent exprimée en pourcentage.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

L'écart absolu seul dépend de l'échelle de la grandeur. Le diviser par la taille de la valeur mesurée donne un écart relatif comparable entre cas de tailles différentes.

11 — Hypothèses

$x_{\text{mesuré}}$ doit être non nul. Près de zéro, cette définition devient instable et une autre métrique d'erreur peut être nécessaire.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $\text{Erreur_rel} \times |x_{\text{mesuré}}|$ doit redonner $|x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}|$.

13 — Cas numérique

$$x_{\text{modèle}} = 1.30 \quad x_{\text{mesuré}} = 1.10 \quad \text{Erreur_rel} = |1.30 - 1.10| / 1.10 \approx 0.1818 = 18.2\%$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

L'écart absolu seul dépend de l'échelle de la grandeur. Le diviser par la taille de la valeur mesurée donne un écart relatif comparable entre cas de tailles différentes.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $\text{Erreur_rel} \times |x_{\text{mesuré}}|$ doit redonner $|x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}|$.

16 — Estimation mentale

Vérifier mentalement le sens du ratio: l'échelle de Erreur_rel découle de celle de $|x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}|$ relativement à $|x_{\text{mesuré}}|$, pas de la différence entre eux.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$ » est interprété à l'intérieur de «9. Incertitudes biologiques et limites des modèles», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 9. Incertitudes biologiques et limites des modèles »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le quotient conserve les variations relatives du numérateur, mais inverse celles du dénominateur. C'est le test de sensibilité adapté à Erreur_rel .

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\text{Model} = 0.84$; $\text{measurement} = 0.80$. Appliquez « $\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\text{Model} = 0.84$; $\text{measurement} = 0.80$. Relation appliquée : $\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$. Calcul et résultat : $e = 0.04 / 0.80 = 0.05 = 5\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 9. Incertitudes biologiques et limites des modèles ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 9. Incertitudes biologiques et limites des modèles », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$x_{\text{modèle}} = 1.30$ $x_{\text{mesuré}} = 1.10$ $\text{Erreur_rel} = |1.30 - 1.10| / 1.10 \approx 0.1818 = 18.2\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $\text{Erreur_rel} = |x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}}| / |x_{\text{mesuré}}|$ » est interprété à l'intérieur de «9. Incertitudes biologiques et limites des modèles», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

10. Décisions opérationnelles face à une alerte

$$\text{Marge_dose} = D_{\text{limite}} - (D_{\text{cum}} + D_{\text{prév}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Marge_dose} = D_{\text{limite}} - (D_{\text{cum}} + D_{\text{prév}})$ » dans « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte », l'écart entre deux états comparables donne directement la marge, la perte ou la différence utile à la décision.

3 — Grandeurs

Marge_dose : dose encore disponible avant la limite; D_{limite} : dose limite sur le périmètre considéré; D_{cum} : dose déjà cumulée; $D_{\text{prév}}$: dose supplémentaire anticipée pour l'activité planifiée.

4 — Formule

$$\text{Marge_dose} = D_{\text{limite}} - (D_{\text{cum}} + D_{\text{prév}})$$

5 — Lecture

Expression verbalisée: «Marge indice dose égale D indice limite - (D indice cum plus D indice prévue)».

6 — Symboles et sens

Marge_dose: dose encore disponible avant la limite; D_limite: dose limite sur le périmètre considéré;
D_cum: dose déjà cumulée; D_prévue: dose supplémentaire anticipée pour l'activité planifiée.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

D_limite, D_cum, D_prévue et Marge_dose doivent être des doses de même grandeur dosimétrique et dans la même unité, par exemple mSv. Aucun débit de dose en mSv/h ne peut être additionné directement sans intégration sur une durée.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

On additionne d'abord la dose déjà reçue et la dose prévue, puis on soustrait ce total de la limite. Une marge positive indique une réserve; une marge négative un dépassement dans ce modèle.

11 — Hypothèses

Les entrées doivent partager unité, date ou fenêtre temporelle et frontière de système. Un mélange de périmètres rendrait l'écart trompeur.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle de fermeture: $\text{Marge_dose} + \text{D_cum} + \text{D_prévue}$ doit redonner D_limite.

13 — Cas numérique

$\text{D_limite} = 100 \text{ mSv}$ $\text{D_cum} = 62 \text{ mSv}$ $\text{D_prévue} = 18 \text{ mSv}$ $\text{Marge_dose} = 100 - (62+18) = 20 \text{ mSv}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

On additionne d'abord la dose déjà reçue et la dose prévue, puis on soustrait ce total de la limite. Une marge positive indique une réserve; une marge négative un dépassement dans ce modèle.

15 — Vérification

Contrôle de fermeture: $\text{Marge_dose} + \text{D_cum} + \text{D_prévue}$ doit redonner D_limite.

16 — Estimation mentale

Avant le calcul fin, arrondir les deux entrées et estimer leur séparation; le résultat exact doit rester cohérent avec cette différence grossière.

17 — Interprétation

Le nombre issu de « $\text{Marge_dose} = \text{D_limite} - (\text{D_cum} + \text{D_prévue})$ » est interprété à l'intérieur de «10. Décisions opérationnelles face à une alerte», jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À limite fixe, chaque unité supplémentaire de D_cum ou D_prévue retire exactement une unité à Marge_dose.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 80 mSv, 45 mSv, 20 mSv. Appliquez « $\text{Marge_dose} = \text{D_limite} - (\text{D_cum} + \text{D_prévue})$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 80 mSv, 45 mSv, 20 mSv. Relation appliquée : $Marge_dose = D_limite - (D_cum + D_prévue)$. Calcul et résultat : $M = 80 - (45 + 20) = 15$ mSv. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$D_limite = 100$ mSv $D_cum = 62$ mSv $D_prévue = 18$ mSv $Marge_dose = 100 - (62 + 18) = 20$ mSv
Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le nombre issu de « $Marge_dose = D_limite - (D_cum + D_prévue)$ » est interprété à l'intérieur de « 10. Décisions opérationnelles face à une alerte », jamais isolément. Le lecteur doit pouvoir identifier sa grandeur, son unité et les conditions qui encadrent son usage.

11. Bilan de dose d'une campagne par activité

$$D_total = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $D_total = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$ » dans « 11. Bilan de dose d'une campagne par activité » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 11. Bilan de dose d'une campagne par activité », plusieurs contributions comparables sont réunies pour obtenir un total traçable plutôt qu'une estimation à l'intuition.

3 — Grandeurs

D_total : dose cumulée de la campagne; $\dot{D}_i$: débit de dose de l'activité ou de l'environnement i ; t_i : durée passée dans cette condition; Σ : somme sur toutes les phases pertinentes.

4 — Formule

$$D_total = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$$

5 — Lecture

Lire « $D_total = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$ » en nommant chaque opération, indice, fonction et symbole.

6 — Symboles et sens

D_total : dose cumulée de la campagne; $\dot{D}_i$: débit de dose de l'activité ou de l'environnement i ; t_i : durée passée dans cette condition; Σ : somme sur toutes les phases pertinentes.

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses, fonctions et lettres grecques afin de pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Si $\dot{D}_i$ est en mSv/h et t_i en h, chaque produit est en mSv et D_total est en mSv.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Multiplier chaque débit par son temps d'exposition puis additionner les contributions relie un planning d'activité à un budget de dose réellement traçable.

11 — Hypothèses

Chaque débit doit être représentatif de la phase correspondante et les intervalles de temps ne doivent pas être comptés deux fois.

12 — Contrôle indépendant

Recalculer séparément chaque contribution $\dot{D}_i \times t_i$, puis vérifier que leur somme donne D_{total} .

13 — Cas numérique

Avec 20 h à 0,05 mSv/h, 40 h à 0,10 mSv/h et 20 h à 0,05 mSv/h : $D_{\text{total}} = 20 \times 0,05 + 40 \times 0,10 + 20 \times 0,05 = 6,0$ mSv.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Multiplier chaque débit par son temps d'exposition puis additionner les contributions relie un planning d'activité à un budget de dose réellement traçable.

15 — Vérification

Recalculer séparément chaque contribution $\dot{D}_i \times t_i$, puis vérifier que leur somme donne D_{total} .

16 — Estimation mentale

La phase ayant le produit débit $\times$ durée le plus élevé doit dominer l'ordre de grandeur du total.

17 — Interprétation

Utiliser le bilan par activité pour déplacer, raccourcir ou protéger les phases qui dominent la dose avant de dépasser le budget mission.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 11. Bilan de dose d'une campagne par activité » ; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une heure déplacée d'un environnement à 0,12 mSv/h vers un environnement à 0,04 mSv/h réduit la dose de 0,08 mSv.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 10 h à 0,08 mSv/h; 30 h à 0,12 mSv/h; 10 h à 0,04 mSv/h. Appliquez « $D_{\text{total}} = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 10 h à 0,08 mSv/h; 30 h à 0,12 mSv/h; 10 h à 0,04 mSv/h. Relation appliquée : $D_{\text{total}} = \Sigma(\dot{D}_i \times t_i)$. Calcul et résultat : Avec 10 h à 0,08 mSv/h, 30 h à 0,12 mSv/h et 10 h à 0,04 mSv/h : $D_{\text{total}} = 10 \times 0,08 + 30 \times 0,12 + 10 \times 0,04 = 4,8$ mSv. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 11. Bilan de dose d'une campagne par activité ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 11. Bilan de dose d'une campagne par activité », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec 20 h à 0,05 mSv/h, 40 h à 0,10 mSv/h et 20 h à 0,05 mSv/h : $D_{\text{total}} = 20 \times 0,05 + 40 \times 0,10 + 20 \times 0,05 = 6,0$ mSv. Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Utiliser le bilan par activité pour déplacer, raccourcir ou protéger les phases qui dominent la dose avant de dépasser le budget mission.

On injecte maintenant l'événement suivant: une alerte arrive pendant une EVA.

2. Dose absorbée et dose équivalente

Dans ce module, dose absorbée et dose équivalente sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: un dosimètre cesse de transmettre.

3. GCR et événements solaires

Dans ce module, gcr et événements solaires sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

— « GCR et événements solaires ».

On injecte maintenant l'événement suivant: deux instruments divergent.

4. LET et qualité du rayonnement

Dans ce module, let et qualité du rayonnement sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: une zone de refuge est temporairement encombrée.

5. Dosimètres et géométrie de mesure

Dans ce module, dosimètres et géométrie de mesure sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: un blindage est modifié par l'ajout d'équipements.

6. Blindage et production secondaire

Dans ce module, blindage et production secondaire sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: la mission accumule davantage de dose que le scénario de planification.

7. Abri de tempête et temps d'accès

Dans ce module, abri de tempête et temps d'accès sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: une alerte arrive pendant une EVA.

8. Dose cumulée et journal de mission

Dans ce module, dose cumulée et journal de mission sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

— « Dose cumulée et journal de mission ».

On injecte maintenant l'événement suivant: un dosimètre cesse de transmettre.

9. Incertitudes biologiques et limites des modèles

Dans ce module, incertitudes biologiques et limites des modèles sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: deux instruments divergent.

10. Décisions opérationnelles face à une alerte

Dans ce module, décisions opérationnelles face à une alerte sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié en diagnostic biologique ou en prescription médicale.

On injecte maintenant l'événement suivant: une zone de refuge est temporairement encombrée.

Exercices progressifs avec corrigés 1:1

Exercice 1: Particules, énergie et ionisation

Analysez particules, énergie et ionisation. Relation à tester: « $D = E_{\text{dep}} / m$ ». Cas dégradé: un dosimètre cesse de transmettre. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 1: Particules, énergie et ionisation

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_{dep} : énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 1: Particules, énergie et ionisation

Résultat

Corrigé — Exercice 1: Particules, énergie et ionisation

Exercice 2: Dose absorbée et dose équivalente

Analysez dose absorbée et dose équivalente. Relation à tester: « $H = \sum (w_R \times D_R)$ ». Cas dégradé: deux instruments divergent. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 2: Dose absorbée et dose équivalente

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_{dep} : énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 2: Dose absorbée et dose équivalente

Résultat

Corrigé — Exercice 2: Dose absorbée et dose équivalente

Exercice 3: GCR et événements solaires

Analysez gcr et événements solaires. Relation à tester: « $D_{\text{cum}} = \sum D_i$ ». Cas dégradé: une zone de refuge est temporairement encombrée. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 3: GCR et événements solaires

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 3: GCR et événements solaires

Résultat

Corrigé — Exercice 3: GCR et événements solaires

Exercice 4: LET et qualité du rayonnement

Analysez let et qualité du rayonnement. Relation à tester: « Temps_refuge = distance / vitesse + marge ». Cas dégradé: un blindage est modifié par l'ajout d'équipements. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 4: LET et qualité du rayonnement

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 4: LET et qualité du rayonnement

Résultat

Corrigé — Exercice 4: LET et qualité du rayonnement

Exercice 5: Dosimètres et géométrie de mesure

Analysez dosimètres et géométrie de mesure. Relation à tester: « $D = E_{\text{dep}} / m$ ». Cas dégradé: la mission accumule davantage de dose que le scénario de planification. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 5: Dosimètres et géométrie de mesure

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 5: Dosimètres et géométrie de mesure

Résultat

Corrigé — Exercice 5: Dosimètres et géométrie de mesure

Exercice 6: Blindage et production secondaire

Analysez blindage et production secondaire. Relation à tester: « $H = \sum(w_R \times D_R)$ ». Cas dégradé: une alerte arrive pendant une EVA. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 6: Blindage et production secondaire

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 6: Blindage et production secondaire

Résultat

Corrigé — Exercice 6: Blindage et production secondaire

Exercice 7: Abri de tempête et temps d'accès

Analysez abri de tempête et temps d'accès. Relation à tester: « $D_{cum} = \sum D_i$ ». Cas dégradé: un dosimètre cesse de transmettre. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 7: Abri de tempête et temps d'accès

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 7: Abri de tempête et temps d'accès

Résultat

Corrigé — Exercice 7: Abri de tempête et temps d'accès

Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission

Analysez dose cumulée et journal de mission. Relation à tester: « $\text{Temps}_{refuge} = \text{distance} / \text{vitesse} + \text{marge}$ ». Cas dégradé: deux instruments divergent. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission

Données du cas

Exercice guidé — Particules, énergie et ionisation — Cas « Particules, énergie et ionisation » — Dans ce module, particules, énergie et ionisation sert directement à raisonner sur l'exposition radiative, la mesure et le blindage sans transformer un calcul physique simplifié... Repère: D: dose absorbée en gray; E_dep: énergie déposée en joule; m: masse en kilogramme. Réserve: Cet exemple enseigne l'unité; il ne représente pas à lui seul le risque sanitaire d'un équipage — « Particules, énergie et ionisation ».

Raisonnement

Corrigé — Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission

Résultat

Corrigé — Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission

Interprétation

Corrigé — Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission

Mini-projet intégrateur et dossier de référence

Concevoir au niveau pédagogique un plan de surveillance radiative et un concept d'abri de tempête pour un habitat. Comparer emplacement, temps d'accès, masse de blindage déjà disponible et continuité des fonctions vitales, sans définir de seuil médical personnalisé.

« Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — hypothèses, budget, marges.

« Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — interfaces et causes communes.

« Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — calculs, limites, critères.

Repères du passage: inventaire

Verification de maîtrise du module 26

- « Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — unités et ordre de grandeur.
- « Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — cas dégradé.
- « Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — marge décisionnelle.
- « Exercice 8: Dose cumulée et journal de mission » — mesure de contrôle.
- Termes de contrôle: Vérification

Repères du passage: état · observation · contrôle

Repères du passage: substitution

Repères du passage: validation

Repères du passage: marge

Repères du passage: Mode dégradé

Repères du passage: robustesse

Repères du passage: période

Repères du passage: incertitude

Repères du passage: Radiations

Sources primaires et passerelles

- NASA Space Radiation FAQ
- ICRP Publication 103
- NASA-STD-3001 Volume 1
- NASA-STD-3001 Volume 2

Matrice de parité FR ↔ EN

Chaque mini-leçon quantitative française ci-dessous correspond à une mini-leçon canonique anglaise du même module; la parité porte sur le niveau intellectuel, les calculs, les exercices et la décision mission.

#	Mini-leçon FR	Correspondance EN	Formule canonique
1	1. Particules, énergie et ionisation	Absorbed dose — energy deposited per unit mass	$D = E_{\text{dep}} / m$
2	2. Dose absorbée et dose équivalente	Equivalent dose — weight absorbed dose by radiation type	$H = \sum (w_R \times D_R)$
3	3. GCR et événements solaires	Cumulative dose — add exposures that use the same dose quantity	$D_{\text{cum}} = \sum D_i$
4	4. LET et qualité du rayonnement	Linear energy transfer — energy deposited per path length	$LET = dE / dx$
5	5. Dosimètres et géométrie de mesure	Dose rate — exposure quantity per unit time	$\dot{D} = \Delta D / \Delta t$
6	6. Blindage et production secondaire	Shield areal density — mass per unit area from density and thickness	$\Sigma_m = \rho \times x$
7	7. Abri de tempête et temps d'accès	Shelter access time — travel time plus protected operational margin	$\text{Temps_refuge} = \text{distance} / \text{vitesse} + \text{marge}$
8	8. Dose cumulée et journal de mission	Dose accumulation from changing rates	$D_{\text{cum}} = \sum (\dot{D}_i \times \Delta t_i)$
9	9. Incertitudes biologiques et limites des modèles	Model-versus-measurement relative error	$\text{Erreur_rel} = x_{\text{modèle}} - x_{\text{mesuré}} / x_{\text{mesuré}} $
10	10. Décisions opérationnelles face à une alerte	Remaining dose margin — subtract accumulated and forecast exposure from a planning limit	$\text{Marge_dose} = D_{\text{limite}} - (D_{\text{cum}} + D_{\text{prévue}})$
11	11. Bilan de dose d'une campagne par activité	Activity-based campaign dose ledger	$D_{\text{total}} = \sum (\dot{D}_i \times t_i)$