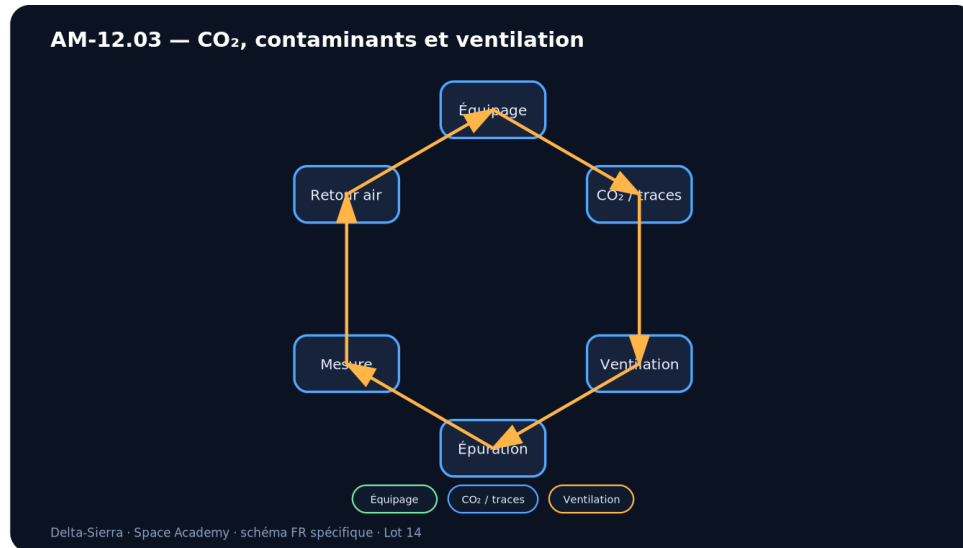


CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique

Question directrice

Concret → flux → capteurs → calcul → panne → refuge.



1 — Le phénomène réel

La respiration produit du dioxyde de carbone et les matériaux, procédés, cuisines, produits d'hygiène et équipements peuvent émettre des contaminants traces. La ventilation homogénéise l'atmosphère, les systèmes d'épuration retirent le CO₂ et certains polluants, et les capteurs doivent détecter les dérives. La survie exige de distinguer production, concentration, capacité d'adsorption ou de régénération, et conséquences d'une panne de circulation d'air.

La question directrice de ce cours est : Comment une cabine peut-elle devenir dangereuse sans manquer d'oxygène ? Le raisonnement commence par la fonction physique ou opérationnelle avant d'introduire la relation mathématique. Le but n'est pas d'accumuler des mots, mais de savoir quelle grandeur change, pourquoi elle change et ce qui devient dangereux si elle sort de son domaine. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », ici, la première question est donc de reconnaître le mécanisme propre à ce sujet avant de chercher une formule ou une valeur de référence.

2 — Vocabulaire et frontière du problème

Dans « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », il faut distinguer le phénomène étudié, la mesure disponible, la commande éventuelle, la marge et le critère de réussite. La frontière du calcul précise ce qui est inclus et ce qui ne l'est pas ; sans cette frontière, un pourcentage, une masse ou un temps peut être exact mathématiquement mais faux comme conclusion d'ingénierie. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », la frontière retenue précise aussi ce qui serait compté deux fois ou, au contraire, oublié dans un bilan de mission.

pressions partielles, débit de ventilation, CO₂, O₂, humidité, température et contaminants traces
un capteur dérivé, un adsorbant saturé, une zone mal ventilée ou une boucle qui masque une dérive lente
boucles fermées au banc, injections contrôlées de charge métabolique et tests de récupération après perte d'un composant

Équation - preuve - décision

$$C = m/V ; \text{ppm} = \text{fraction} \times 10^6$$

Panne à tester : La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », on teste notamment un capteur dérivé, un adsorbant saturé, une zone mal ventilée ou une boucle qui masque une dérive lente. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique**3 — Schéma propre au cours**

Le schéma ne résume pas tout le module : il isole ce qui est spécifique à « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique ». On y suit la chaîne cause → grandeur mesurée → décision ou réponse physique → limite. Cette représentation évite précisément de réutiliser le même dessin pour un bouclier thermique, un radar, un filtre à CO₂ ou une procédure d'équipage. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », la lecture graphique doit permettre de retrouver les entrées, les sorties, la grandeur mesurée et la conséquence d'une dérive sans lire le reste du module.

4 — Relation mathématique et lecture des symboles

Lecture orale : la concentration massique C égale la masse m divisée par le volume V ; une fraction multipliée par un million donne des parties par million.

Avant toute substitution numérique, on écrit les unités de chaque terme, on indique si la relation est une loi physique, une approximation ou un indicateur de projet, puis on vérifie l'homogénéité dimensionnelle. Cette discipline est particulièrement importante ici car « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique » combine des grandeurs qui n'ont pas toutes le même statut documentaire. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », le choix de cette relation est justifié par le phénomène étudié ; une autre grandeur dominante conduirait à une autre équation ou à un autre modèle.

5 — Calculs détaillés et interprétation

$$40 \text{ g} / 100 \text{ m}^3 = 0,40 \text{ g/m}^3$$

$$0,004 \times 10^6 = 4\,000 \text{ ppm}$$

8 kg de capacité / 2 kg/j de charge = 4 jours théoriques avant saturation si le modèle restait linéaire

1. 1. Concentration massique $40 \text{ g} / 100 \text{ m}^3 = 0,40 \text{ g/m}^3$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique ».

2. 2. Fraction en ppm $0,004 \times 10^6 = 4\,000 \text{ ppm}$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique ».

3. 3. Capacité d'un lit 8 kg de capacité / 2 kg/j de charge = 4 jours théoriques avant saturation si le modèle restait linéaire Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique ».

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections: 3 — Schéma propre au cours ; 4 — Relation mathématique et lecture des symboles ; 5 — Calculs détaillés et interprétation

Relation à relire: $C = m/V$; $\text{ppm} = \text{fraction} \times 10^6$

Décision attendue: mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 3 — Schéma propre au cours ; 4 — Relation mathématique et lecture des symboles ; 5 — Calculs détaillés et interprétation. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique**6 — Ce que la formule ne contient pas**

La relation « $C = m/V$; ppm = fraction $\times 10^6$ » ne contient pas à elle seule l'ensemble de « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique ». Elle ne dit pas automatiquement si le capteur est valide, si la structure vieillit, si une ressource est accessible, si une commande arrive à temps ou si une panne secondaire retire la marge. L'exemple $40 \text{ g} / 100 \text{ m}^3 = 0,40 \text{ g/m}^3$ doit donc rester un calcul local et non une architecture complète.

Pour rendre le modèle exploitable, on ajoute explicitement les paramètres qui dominent ce thème : pressions partielles, débit de ventilation, CO₂, O₂, humidité, température et contaminants traces. On peut alors demander quelle variation modifie réellement le résultat, laquelle reste négligeable et laquelle oblige à changer d'architecture. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », cette limite de modèle indique précisément ce qu'un calcul correct ne permet pas encore d'affirmer sur le système réel.

7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données

Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », l'observabilité repose sur pressions partielles, débit de ventilation, CO₂, O₂, humidité, température et contaminants traces. Chaque donnée reçoit une unité, une fréquence d'acquisition, une incertitude, un horodatage et un domaine de validité. Une valeur qui arrive sans contexte peut être plus dangereuse qu'une absence de mesure parce qu'elle donne une confiance injustifiée.

La cohérence est vérifiée avec au moins une information indépendante lorsque la fonction est critique. Une tendance, un bilan physique ou un second principe de mesure permet de distinguer une vraie évolution du système d'un capteur qui dérive. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », l'instrumentation retenue doit permettre de distinguer une vraie évolution physique d'une dérive de capteur ou d'une mauvaise estimation d'état.

8 — Pannes propres au phénomène et récupération

La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », on teste notamment un capteur dérivé, un adsorbeur saturé, une zone mal ventilée ou une boucle qui masque une dérive lente. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

Le mode dégradé doit être défini avant la panne : fonction minimale à conserver, durée admissible, stock consommé, action équipage, condition d'abandon et critère de retour au nominal. Cette séquence est

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	6 — Ce que la formule ne contient pas ; 7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données ; 8 — Pannes propres au phénomène et récupération
Relation à relire:	$C = m/V$; ppm = fraction $\times 10^6$
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 6 — Ce que la formule ne contient pas ; 7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données ; 8 — Pannes propres au phénomène et récupération. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique**9 — Cas NASA / cas de référence**

Le cas de référence est choisi dans le corpus ECLSS, NASA-STD-3001 ou les analogues humains selon le thème. L'objectif n'est pas de copier l'ISS sur Mars, mais d'identifier ce qui a été démontré, ce qui dépend de l'environnement et ce qui doit encore être qualifié pour une mission sans ravitaillement rapide.

Ce cas n'est utilisé que dans la limite de ce qu'il démontre. Une mesure de vol, un standard humain, un essai de composant et une étude d'architecture n'ont pas le même niveau de preuve ; le texte indique donc toujours ce qui est observé, calculé, simulé ou encore prospectif. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », le cas NASA cité sert de preuve ciblée pour ce phénomène ; il n'est jamais transformé en architecture martienne universelle.

10 — Compromis d'architecture

Une bonne solution pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique » ne maximise pas un seul indicateur. Elle compare performance nominale, masse, énergie, simplicité, maintenance, temps équipage, dépendances communes et capacité de récupération. L'option qui améliore 0,004 × 10⁶ = 4 000 ppm peut être refusée si elle rend la détection de panne ou la réparation beaucoup plus difficile.

Le compromis est consigné avec ses hypothèses. Si une donnée d'environnement, une masse ou une cadence de mission change, on sait ainsi quelles conclusions doivent être recalculées au lieu de conserver silencieusement un choix devenu obsolète. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », le compromis est donc évalué avec les interfaces réellement touchées par ce thème, plutôt qu'avec une liste générique de qualités souhaitables.

11 — Démonstration, essais et critères de réussite

La stratégie de preuve adaptée à « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique » combine boucles fermées au banc, injections contrôlées de charge métabolique et tests de récupération après perte d'un composant. Chaque essai indique le matériel exact, le logiciel, la configuration, l'environnement, les tolérances et le critère de réussite. Une démonstration réussie hors domaine ne remplace pas une qualification dans le domaine de mission.

La preuve grandit par étapes : relation analytique, simulation, composant, sous-système, système intégré, durée et panne. Cette hiérarchie évite de présenter un seul essai spectaculaire comme validation de toute la mission. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », la démonstration doit reproduire les contraintes qui rendent ce phénomène difficile ; un essai spectaculaire mais hors domaine n'est pas suffisant.

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite
Relation à relire:	$C = m/V$; ppm = fraction × 10 ⁶
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique

12 — Exercice de décision

Situation : reprenez « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique » en augmentant de 20 % la grandeur la plus pénalisante du premier exemple, tout en déclarant indisponible un moyen de mesure ou de secours.

Situation : reprenez « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique » en augmentant de 20 % la grandeur la plus pénalisante du premier exemple, tout en déclarant indisponible un moyen de mesure ou de secours. Réponse attendue : recalculer la relation, identifier la marge restante, vérifier si l'observabilité suffit encore, puis décider si le mode dégradé reste acceptable. Une simple multiplication par 1,2 ne suffit pas si la variation change aussi les interfaces ou les limites.

13 — À retenir sans généraliser abusivement

14 — Sources primaires spécifiques au sujet

Ces références documentent directement le phénomène, la technologie ou la contrainte humaine traitée dans ce cours. Elles ne définissent pas à elles seules une architecture martienne officielle. Pour « CO₂, contaminants traces et ventilation : empêcher une atmosphère toxique », la bibliographie est volontairement ciblée sur le sujet de cette page afin que le lecteur puisse remonter jusqu'au document primaire pertinent.

Sources primaires spécifiques

NASA OCHMO — Carbon Dioxide Technical Brief - <https://www.nasa.gov/ochmo-tb-004-carbon-dioxide-2/>

NASA NTRS — Development of Carbon Dioxide Removal Systems for Advanced Exploration Systems - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180006342>

NASA — Spaceflight Human-System Standard, Volume 2 - <https://www.nasa.gov/reference/nasa-std-3001v2/>

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet
Relation à relire:	$C = m/V$; $\text{ppm} = \text{fraction} \times 10^6$
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêt

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.