



BTS TRAVAUX PUBLICS

Physique-Chimie

Manuel de cours et cahier d'exercices

7 domaines · 59 notions · illustrations, exemples, exercices corrigés
et évaluations

Formateur : JcMamiah

Référentiel BTS Travaux Publics 2023

Comment utiliser ce livre

Ce manuel réunit l'intégralité du cours de physique-chimie du BTS Travaux Publics : 7 domaines et 59 notions élémentaires, dans l'ordre du référentiel 2023.

Chaque notion suit la même structure : le cours (contexte, définitions, méthode, formules encadrées), un exemple d'application résolu, un encadré « À retenir », une illustration explicative, puis un exercice d'application.

Sous chaque exercice, un encadré réglé vous est réservé : c'est l'espace prévu pour résoudre l'exercice au crayon, directement dans le livre.

Chaque domaine se termine par une évaluation (questionnaire à choix multiple) permettant de valider les acquis avant de passer au domaine suivant.

Tous les corrigés (exercices et évaluations) sont regroupés en annexe, en fin d'ouvrage, pour vous permettre de vous auto-corriger après avoir cherché.

Les notions signalées par un encadré rouge n'ont pas pu être intégralement confrontées au document d'accompagnement officiel : leur contenu, bien que correct, est à vérifier par l'enseignant avant toute utilisation en évaluation.

Sommaire

Domaine A — Mesures et incertitudes 6

A1 — Variabilité de la mesure d'une grandeur physique	6
A2 — Incertitude-type	8
A3 — Incertitudes-types composées	11
A4 — Écriture du résultat d'une mesure	13
A5 — Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé	15

Domaine B — Matériaux, transformation de la matière, valorisation..

B1 — Les dérivés du pétrole	19
B2 — Bitumes : extraction, distillation fractionnée	21
B3 — Différentes représentations des molécules organiques	23
B4 — Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles	25
B5 — Polymères : généralités et classification	26
B6 — Polymères : monomère, motif, groupes caractéristiques, réactions de polymérisation	28
B7 — Vieillessement d'un matériau polymère	30
B8 — Entités chimiques : molécules, atomes, ions	32
B9 — Masse, quantité de matière, concentration en masse et en quantité de matière . .	34
B10 — Transformation chimique, réaction, équation de réaction. Bilan de matière : réactif limitant, stœchiométrie, avancement	35
B11 — Transformation complète et incomplète	37
B12 — Théorie de Brønsted : acide fort, base forte, acide faible, base faible	39
B13 — pH d'une solution aqueuse	40
B14 — Notion d'équilibre acido-basique. Couple acide-base. Constante d'acidité K_a . Diagramme de prédominance	42
B15 — Oxydant, réducteur. Couple oxydant/réducteur. Réaction d'oxydoréduction	44

B16 — Influence du pH : diagrammes potentiel-pH	45
B17 — Corrosion des métaux et protection (anode sacrificielle, courant imposé)	47
B18 — Valorisation des matériaux (économie circulaire des travaux publics)	50

Domaine C — Mécanique du solide **56**

C1 — Référentiel. Caractère relatif du mouvement	56
C2 — Description du mouvement d'un solide : translation, rotation autour d'un axe fixe .	58
C3 — Actions mécaniques sur un système. Force résultante et moment. Couple	60
C4 — Référentiel galiléen. Principe de l'inertie	62
C5 — Principe fondamental de la dynamique	63
C6 — Conditions d'équilibre d'un solide	65
C7 — Effet centrifuge	67

Domaine D — Mécanique des fluides **72**

D1 — Pression dans un fluide, force pressante	72
D2 — Relation fondamentale de l'hydrostatique	74
D3 — Théorème de Pascal	75
D4 — Poussée d'Archimède	77
D5 — Tension superficielle et capillarité	79
D6 — Débit massique et débit volumique	81
D7 — Conservation du débit	82
D8 — Conservation de l'énergie, relation de Bernoulli	84
D9 — Viscosité	86
D10 — Nombre de Reynolds. Régimes laminaire et turbulent	87
D11 — Perte de charge en régime laminaire	89

Domaine E — Thermique **94**

E1 — Propriétés thermoélastiques des matériaux	94
E2 — Modes de transfert thermique	96
E3 — Flux thermique transféré par conduction en régime permanent. Résistance thermique ⁹⁸	

Domaine F — Vibrations et ondes **102**

F1 — Réponse d'un oscillateur mécanique à une excitation	102
F2 — Oscillations libres ou forcées, amortissement	104
F3 — Résonance mécanique	106
F4 — Onde acoustique. Pression acoustique. Célérité	107
F5 — Son pur. Fréquence, période, amplitude. Longueur d'onde	109
F6 — Son complexe, bruit	111
F7 — Intensité d'une onde acoustique et niveau sonore	113
F8 — Réflexion, transmission, absorption d'une onde acoustique	115
F9 — Perception sonore humaine. Protection acoustique : normes et équipement de protection individuel (EPI)	116
F10 — Sources lumineuses	118
F11 — Photométrie	120
F12 — Transmission et absorption de la lumière par un matériau. Filtres	122

Domaine G — Électricité **127**

G1 — Intensité, tension	127
G2 — Puissance électrique en régime continu et en régime sinusoïdal	129
G3 — Sécurité électrique, risques et protection du matériel et des personnes	131

Annexe — Corrigés **135**

DOMAINE A

Mesures et incertitudes

Pourquoi ce chapitre ?

En laboratoire comme sur chantier, une mesure n'a de sens que si l'on sait avec quelle confiance on peut l'exploiter : une résistance de béton, un débit, une masse volumique de granulat, une température ne sont jamais connus « exactement ». Ce chapitre donne les outils indispensables, mobilisés dans chaque séance expérimentale de la formation et évalués à l'épreuve U32, pour quantifier et écrire correctement le résultat d'une mesure, puis pour comparer deux résultats de manière rigoureuse.

Les cinq notions de ce domaine sont transversales : elles ne s'apprennent pas « une fois pour toutes » mais se mobilisent en continu, à chaque compte rendu de travaux pratiques, tout au long des deux années de formation.

A1 Variabilité de la mesure d'une grandeur physique

1. Contexte

Si l'on mesure plusieurs fois de suite une même grandeur physique — par exemple la masse volumique apparente d'un granulat, ou la résistance en compression d'éprouvettes de béton issues d'une même gâchée — on n'obtient presque jamais deux fois exactement la même valeur. Cette dispersion des résultats, appelée variabilité de la mesure, est normale : elle provient de l'instrument, du protocole, de l'opérateur et parfois de l'hétérogénéité du matériau lui-même.

2. Définitions et méthode

- Série de mesures indépendantes : on répète n fois la mesure d'une même grandeur x , dans des conditions comparables, ce qui donne $x_1, x_2, \dots, x_n$.
- Histogramme : représentation en barres du nombre de valeurs mesurées appartenant à chaque classe (intervalle) de valeurs — il permet de visualiser la dispersion et la forme de la répartition.

Moyenne arithmétique de la série :

$$\bar{x} = (1/n) \times \sum x_i$$

Écart-type expérimental de la série (dispersion des mesures individuelles autour de la moyenne) :

$$s = \sqrt{[(1/(n-1)) \times \sum (x_i - \bar{x})^2]}$$

Plus s est grand, plus les mesures individuelles sont dispersées. Un histogramme resserré et symétrique autour de $\bar{x}$ traduit un protocole maîtrisé ; un histogramme étalé ou dissymétrique doit conduire à s'interroger sur l'instrument utilisé (résolution, classe de précision, dérive) ou sur le protocole (mode opératoire, conditions environnementales, opérateur).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — masse volumique apparente d'un granulat

Un binôme réalise 12 pesées indépendantes d'un même lot de granulat, avec calcul de la masse volumique apparente à chaque essai (en kg/m^3) :

1462 ; 1468 ; 1455 ; 1471 ; 1465 ; 1459 ; 1474 ; 1463 ; 1467 ; 1458 ; 1470 ; 1461

Moyenne : $\bar{x} = (1462+1468+\dots+1461) / 12 = 17\,573 / 12 \approx 1464,4 \text{ kg/m}^3$

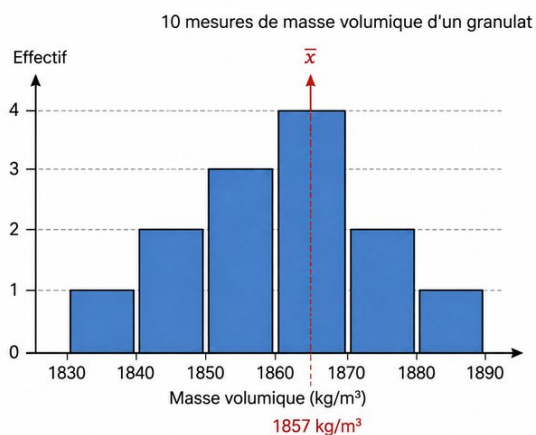
Écart-type expérimental : $s = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2 / 11]} \approx \sqrt{(364,97 / 11)} \approx \sqrt{33,2} \approx 5,8 \text{ kg/m}^3$

L'histogramme des 12 valeurs est resserré autour de 1464 kg/m^3 : le protocole (méthode de la balance hydrostatique) est bien maîtrisé. Un écart-type nettement plus élevé aurait pu signaler, par exemple, un mauvais séchage préalable de l'échantillon (source de variabilité du protocole).

À retenir

- La dispersion d'une série de mesures se caractérise par la moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type expérimental s .
- L'écart-type ne se confond pas avec l'incertitude-type (voir notion A2) : c'est une étape de calcul intermédiaire.
- Analyser un histogramme, c'est relier une observation (forme, étalement) à une cause physique (instrument, protocole, matériau).

A1 – Variabilité de la mesure d'une grandeur physique



Histogramme des 10 mesures de masse volumique.
La flèche rouge indique la moyenne $\bar{x}$.



Mesure de la masse volumique au gammadensimètre

Illustration — A1 Variabilité de la mesure d'une grandeur physique

L'incertitude-type $u(x)$ est un paramètre, exprimé dans la même unité que la grandeur mesurée, qui caractérise la dispersion des valeurs que l'on pourrait raisonnablement attribuer à la grandeur x . On distingue deux façons de l'évaluer, selon la nature des données disponibles.

a) Évaluation de type A (approche statistique)

Utilisée lorsqu'on dispose d'une série de n mesures répétées. L'incertitude-type sur la moyenne $\bar{x}$ de la série vaut :

$$u_A(x) = s / \sqrt{n}$$

où s est l'écart-type expérimental de la série (voir A1) et n le nombre de mesures.

b) Évaluation de type B (autre qu'une approche statistique)

Utilisée lorsqu'une seule mesure est réalisée, ou pour tenir compte d'une source d'incertitude non statistique : résolution d'un appareil numérique, classe de précision indiquée par le constructeur, certificat d'étalonnage, tolérance d'une verrerie... Cas fréquent en BTS : résolution δ d'un afficheur numérique, la valeur vraie étant supposée uniformément répartie dans un intervalle de largeur δ autour de la valeur affichée :

$$u_B(x) = \delta / (2\sqrt{3})$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — reprise du granulat (type A) et d'un thermomètre numérique (type B)

Type A — Avec la série de A1 ($n = 12$, $s \approx 5,8 \text{ kg/m}^3$) réalisée sur le même échantillon :

$$u_A(\bar{x}) = s / \sqrt{n} = 5,8 / \sqrt{12} = 5,8 / 3,46 \approx 1,7 \text{ kg/m}^3$$

L'incertitude-type sur la moyenne est nettement plus petite que l'écart-type d'une mesure individuelle : répéter les mesures et moyenner améliore la confiance dans le résultat.

Type B — Un thermomètre numérique affiche $T = 21,5 \text{ °C}$ avec une résolution $\delta = 0,1 \text{ °C}$ (dernier chiffre affiché) :

$$u_B(T) = 0,1 / (2\sqrt{3}) = 0,1 / 3,46 \approx 0,029 \text{ °C}, \text{ arrondi à } u_B(T) \approx 0,03 \text{ °C}$$

À retenir

- Type A : plusieurs mesures disponibles $\rightarrow u_A = s / \sqrt{n}$.
- Type B : une seule mesure, ou source d'incertitude documentée (résolution, classe d'appareil) $\rightarrow$ formule adaptée à la loi de probabilité supposée (souvent uniforme : diviser par $2\sqrt{3}$).
- Une incertitude-type se réduit en augmentant le nombre de mesures (type A) ou en choisissant un instrument plus performant (type B) — pas en « arrondissant optimiste ».

A2 – Incertitude-type

Évaluation de type A
(à partir de mesures répétées)

Exemple : masse volumique d'un granulat
 $n = 10$ mesures répétées

Mesure	ρ (kg/m ³)
1	1855
2	1858
3	1860
...	...
10	1856

Distribution des 10 mesures

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

s : écart-type expérimental des mesures
 n : nombre de mesures

Basée sur l'analyse statistique des mesures.
Plus n est grand, plus u_A diminue.

Exemple numérique

Si $s = 3,2$ kg/m³ et $n = 10$:

$$u_A = \frac{3,2}{\sqrt{10}} = 1,01 \text{ kg/m}^3$$

Évaluation de type B
(à partir d'une spécification)

Exemple : mesure de température
Thermomètre numérique

Résolution (δ)

0,1 °C

(plus petit pas affiché)

$$u_B = \frac{\delta}{2\sqrt{3}}$$

δ : résolution (pas d'affichage) de l'appareil

Basée sur les spécifications de l'instrument.
Hypothèse : distribution rectangulaire.

Exemple numérique

Si $\delta = 0,1$ °C :

$$u_B = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,029 \text{ °C}$$

Illustration — A2 Incertitude-type

EXERCICE D'APPLICATION

Avec la série de l'exercice A1 ($n = 10$, $s \approx 7,89$ kg/m³) :

- 1) Déterminer par une approche de type A l'incertitude-type sur la moyenne $\bar{x}$.
- 2) Le gammadensimètre a une résolution d'affichage de 1 kg/m³. En supposant une loi uniforme sur cet intervalle, déterminer l'incertitude-type de type B associée.
- 3) Laquelle des deux incertitudes domine ? Commenter.

Votre résolution (au crayon)

A3 Incertitudes-types composées

1. Contexte

La plupart des grandeurs d'intérêt ne se mesurent pas directement : elles se calculent à partir de plusieurs grandeurs mesurées. Exemple : un débit volumique Q_v se calcule à partir d'un volume V et d'une durée t . Il faut alors savoir comment les incertitudes-types de V et de t se combinent pour donner l'incertitude-type de Q_v .

2. Définitions et méthode

Si une grandeur G est calculée à partir de grandeurs mesurées $x, y, z, \dots$ par une relation $G = f(x, y, z, \dots)$, l'incertitude-type composée $u(G)$ se calcule à l'aide d'une formule de propagation qui est toujours fournie à l'étudiant en BTS (jamais à démontrer). Deux cas très fréquents :

a) Somme ou différence : $G = x + y$ (ou $G = x - y$)

$$u(G) = \sqrt{[u(x)^2 + u(y)^2]}$$

b) Produit ou quotient : $G = x \times y$ (ou $G = x / y$)

On compose les incertitudes relatives :

$$[u(G) / G]^2 = [u(x) / x]^2 + [u(y) / y]^2$$

Dans un cas plus complexe (formule non linéaire), la formule de propagation à appliquer est systématiquement donnée dans l'énoncé de l'épreuve U32 : il s'agit uniquement de savoir l'appliquer proprement, en gardant les unités cohérentes.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — débit volumique d'une canalisation

On mesure le volume V collecté en sortie d'une canalisation pendant une durée t :

$V = 5,00 \text{ L}$ avec $u(V) = 0,05 \text{ L}$ $t = 30,0 \text{ s}$ avec $u(t) = 0,3 \text{ s}$

Débit : $Q_v = V / t = 5,00 / 30,0 = 0,1667 \text{ L/s}$

Incertitude relative composée (quotient) :

$$[u(Q_v)/Q_v]^2 = [u(V)/V]^2 + [u(t)/t]^2 = (0,05/5,00)^2 + (0,3/30,0)^2 = 0,01^2 + 0,01^2 = 2,0 \times 10^{-4}$$

$$u(Q_v)/Q_v = \sqrt{2,0 \times 10^{-4}} \approx 0,0141, \text{ soit } u(Q_v) \approx 0,1667 \times 0,0141 \approx 0,0024 \text{ L/s}$$

À retenir

- On ne fait jamais la somme simple des incertitudes-types : elles se composent en quadrature (racine de la somme des carrés).
- Somme/différence → incertitudes-types absolues composées ; produit/quotient → incertitudes-types relatives composées.
- La formule de propagation est toujours fournie en BTS : l'essentiel est de savoir l'appliquer avec les bonnes unités.

A3 – Incertitudes-types composées

Propagation des incertitudes dans un calcul

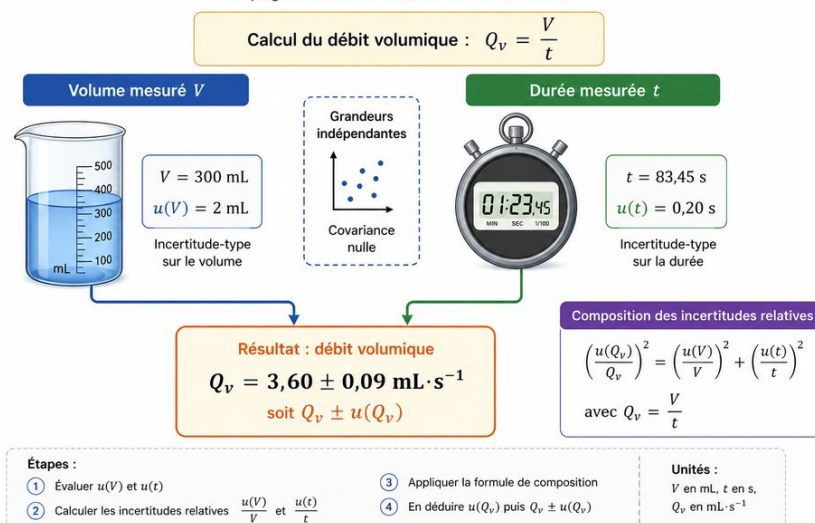


Illustration — A3 Incertitudes-types composées

EXERCICE D'APPLICATION

Le degré de compactage est défini par $D_c = (p_{d,mesurée} / p_{d,OPM}) \times 100 (\%)$.

Données : $p_{d,mesurée} = (1856,7 \pm 2,5) \text{ kg/m}^3$ (résultat des exercices A1-A2) ;
 $p_{d,OPM} = (1920 \pm 10) \text{ kg/m}^3$ (référence de laboratoire).

Calculer D_c et son incertitude-type $u(D_c)$, sachant que D_c est un quotient des deux grandeurs mesurées (le facteur 100 est considéré exact).

Votre résolution (au crayon)

A4 Écriture du résultat d'une mesure

1. Contexte

Une fois la valeur mesurée et son incertitude-type calculées, encore faut-il les écrire correctement : un résultat affiché avec trop de chiffres donne une fausse impression de précision ; un résultat trop arrondi fait perdre de l'information utile. Cette notion fixe les règles d'écriture attendues à l'écrit comme à l'oral.

2. Définitions et méthode

Le résultat d'une mesure s'écrit sous la forme :

$$x = (x_{\text{mesuré}} \pm u(x)) \text{ unité}$$

Règles d'écriture à respecter systématiquement :

- 1) L'incertitude-type $u(x)$ est arrondie à un seul chiffre significatif (exceptionnellement deux si le premier chiffre est un « 1 »), en arrondissant toujours par excès (règle prudente).
- 2) La valeur mesurée est arrondie au même rang décimal que l'incertitude-type (« le dernier chiffre significatif de la valeur doit tomber au même rang que celui de l'incertitude »).
- 3) On garde les mêmes unités pour la valeur et l'incertitude, et on peut donner l'incertitude relative $u(x)/x$ en complément (souvent en %).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — écriture d'une mesure de longueur et reprise du débit (A3)

Une mesure topographique donne $x = 23,4678$ m avec une incertitude-type calculée $u(x) = 0,0523$ m.

Étape 1 — arrondi de l'incertitude à 1 chiffre significatif, par excès : $u(x) = 0,06$ m.

Étape 2 — arrondi de la valeur au même rang (le centième) : $x = 23,47$ m.

Résultat : $x = (23,47 \pm 0,06)$ m, soit une incertitude relative $u(x)/x \approx 0,26$ %.

Reprise du débit calculé en A3 : $Q_v = 0,1667$ L/s et $u(Q_v) = 0,0024$ L/s.

$u(Q_v)$ arrondi à 1 chiffre significatif, par excès : $0,003$ L/s.

Résultat final : $Q_v = (0,167 \pm 0,003)$ L/s.

À retenir

- L'incertitude-type se donne toujours avec 1 (rarement 2) chiffre(s) significatif(s), arrondie par excès.
- La valeur mesurée s'arrondit ensuite au même rang décimal que l'incertitude-type — jamais l'inverse.
- Un résultat sans incertitude n'a pas de valeur scientifique exploitable : $x = (\text{valeur} \pm u(x))$ unité est la norme.

A4 – Écriture du résultat d'une mesure

Exemple : mesure d'une longueur

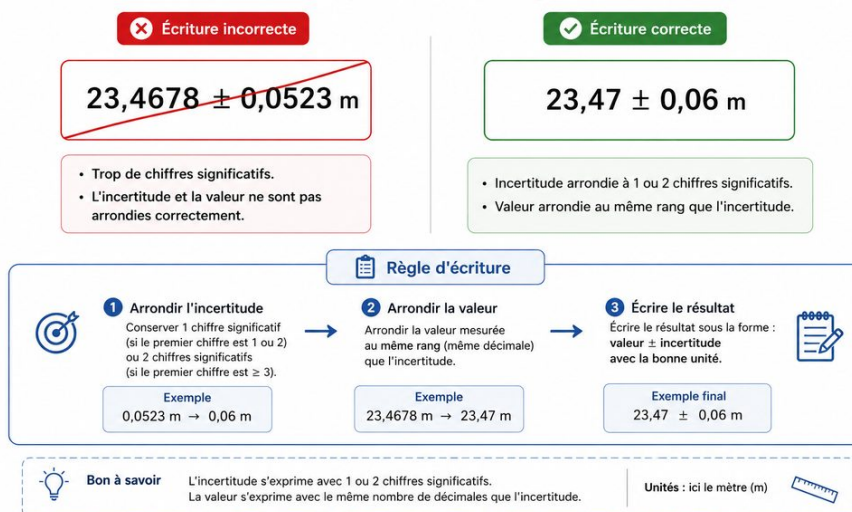


Illustration — A4 Écriture du résultat d'une mesure

EXERCICE D'APPLICATION

Reprendre le résultat du degré de compactage D_c obtenu en A3 ($D_c = 96,7 \%$; $u(D_c) \approx 0,52 \%$) et l'écrire correctement selon les règles d'écriture d'un résultat de mesure.

Le cahier des charges du chantier exige $D_c \geq 95 \%$. Conclure sur la conformité du remblai contrôlé.

Votre résolution (au crayon)

A5 Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé

1. Contexte

Deux binômes mesurent la même grandeur et trouvent des valeurs différentes ; une valeur mesurée doit être comparée à une valeur de référence (norme, fiche technique, valeur théorique) : dans les deux cas, il faut un critère objectif pour décider si l'écart observé est « normal » (expliqué par les incertitudes de mesure) ou s'il révèle une erreur ou un phénomène réel à analyser.

2. Définitions et méthode

On compare deux valeurs x_1 (assortie de $u(x_1)$) et x_2 (assortie de $u(x_2)$) d'une même grandeur à l'aide de l'écart normalisé E_n (parfois noté z) :

$$E_n = |x_1 - x_2| / \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2}$$

Critère de décision usuel :

- Si $E_n \leq 2$: les deux valeurs sont considérées comme compatibles — leur écart s'explique par les incertitudes de mesure.
- Si $E_n > 2$: les valeurs sont jugées incompatibles — il faut rechercher une cause (erreur de protocole, de manipulation, de calcul, ou incertitude sous-évaluée).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — essais de compression sur béton, deux binômes

Binôme 1 : $R_1 = (32,4 \pm 0,5)$ MPa Binôme 2 : $R_2 = (33,6 \pm 0,6)$ MPa

$$E_n = |32,4 - 33,6| / \sqrt{(0,5^2 + 0,6^2)} = 1,2 / \sqrt{0,61} = 1,2 / 0,781 \approx 1,54$$

Comme $E_n \approx 1,54 \leq 2$, les deux résultats sont compatibles : l'écart observé entre les deux binômes est normal compte tenu des incertitudes de mesure, il n'est pas nécessaire de rechercher une erreur.

À retenir

- L'écart normalisé E_n permet de trancher objectivement entre « écart normal » et « écart anormal ».
- Le seuil de référence est $E_n = 2$ (au-delà, les valeurs sont jugées incompatibles).
- Cette méthode s'applique aussi bien à la comparaison de deux mesures qu'à la comparaison mesure/valeur de référence.

A5 – Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé

Résistance en compression du béton mesurée par deux binômes différents

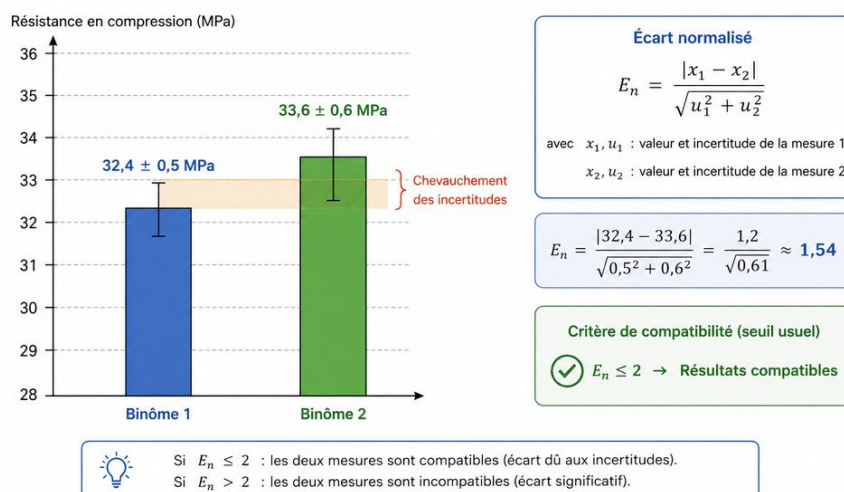


Illustration — A5 Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé

EXERCICE D'APPLICATION

Un second technicien contrôle la même zone avec un pénétromètre dynamique et trouve $Dc2 = (94,8 \pm 0,7)$ %.

Comparer ce résultat à celui de l'exercice A4 ($Dc1 = (96,7 \pm 0,6)$ %) à l'aide de l'écart normalisé. Les deux mesures sont-elles compatibles ?

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE A

Evaluation — Mesures et incertitudes

5 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. Que caractérise la dispersion d'une série de mesures indépendantes ?

- A. L'incertitude-type $u(x)$ uniquement
- B. La moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type expérimental s
- C. L'écart normalisé E_n
- D. La résolution de l'instrument uniquement

2. Quelle formule utilise-t-on pour évaluer une incertitude-type de type A (série de n mesures) ?

- A. $u_A = s / \sqrt{n}$
- B. $u_B = \delta / (2\sqrt{3})$
- C. $E_n = |x_1 - x_2| / \sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$
- D. $u_A = s \times n$

3. Comment compose-t-on deux incertitudes-types indépendantes lors d'une somme ou différence ?

- A. On fait leur somme simple
- B. On les compose en quadrature : $u(G) = \sqrt{u(x)^2 + u(y)^2}$
- C. On prend la plus grande des deux
- D. On fait leur moyenne

4. Avec combien de chiffres significatifs exprime-t-on généralement une incertitude-type, et selon quelle règle d'arrondi ?

- A. 3 chiffres, arrondi au plus proche
- B. 1 (rarement 2) chiffre(s), arrondi par excès

- C. Autant que la valeur mesurée
- D. 0, l'incertitude ne s'arrondit pas

5. Au-delà de quelle valeur de l'écart normalisé E_n deux résultats sont-ils jugés incompatibles ?

- A. $E_n = 1$
- B. $E_n = 2$
- C. $E_n = 5$
- D. $E_n = 10$

DOMAINE B**Matériaux, transformation de la matière, valorisation****Pourquoi ce chapitre ?**

Les matériaux de travaux publics (bitumes, polymères, bétons, aciers d'armature) sont le siège de transformations chimiques qu'il faut savoir décrire pour comprendre leur fabrication, leur comportement en service et leur dégradation : origine pétrolière des liants bitumineux, chimie des polymères, réactions acido-basiques et d'oxydoréduction impliquées notamment dans la durabilité du béton armé. Ce chapitre regroupe les 18 notions élémentaires du domaine, réparties en deux sous-thèmes officiels (matériaux organiques ; transformation chimique de la matière), complétés par deux notions de synthèse (corrosion/protection, valorisation) rattachées à l'intitulé du domaine.

B1 Les dérivés du pétrole**1. Contexte**

Le pétrole brut est la matière première des liants bitumineux utilisés en construction et entretien routiers, ainsi que de nombreux polymères de chantier. Comprendre son origine et son traitement permet de comprendre la disponibilité et les propriétés des matériaux qui en sont issus.

2. Définitions et méthode

- Pétrole brut : mélange complexe d'hydrocarbures (alcanes, cycloalcanes, composés aromatiques) d'origine fossile, formé par transformation lente de matière organique sédimentaire sous pression et température, à l'abri de l'air, sur des millions d'années.
- Raffinage : ensemble des opérations physiques (distillation) et chimiques (craquage, reformage) qui séparent et transforment le pétrole brut en fractions valorisables : gaz, essence, kérosène, gazole, fioul lourd, bitume.

La capacité attendue ici est méthodologique : extraire et exploiter des ressources documentaires (schéma de raffinerie, fiche technique) pour analyser une méthode d'obtention des dérivés du pétrole — il ne s'agit pas de mémoriser un procédé industriel dans le détail.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — lecture d'un schéma de distillation atmosphérique

On fournit le schéma d'une tour de distillation atmosphérique d'une raffinerie, avec les températures de sortie de chaque plateau.

Fractions obtenues, de haut en bas de la colonne (température de sortie croissante) : gaz ($< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), essence (40-180 $^{\circ}\text{C}$), kérosène (180-250 $^{\circ}\text{C}$), gazole (250-350 $^{\circ}\text{C}$), résidu atmosphérique ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Question type : identifier, à partir du schéma, la fraction correspondant au bitume et justifier sa position en fond de colonne (fraction la plus lourde, non vaporisée à pression atmosphérique).

À retenir

- Le pétrole brut est un mélange d'hydrocarbures fossiles, séparé par raffinage en fractions de masses molaires croissantes.
- Le bitume est la fraction la plus lourde, obtenue en fond de colonne de distillation.
- La capacité clé est de savoir lire et exploiter une documentation technique, pas de refaire les calculs du procédé.

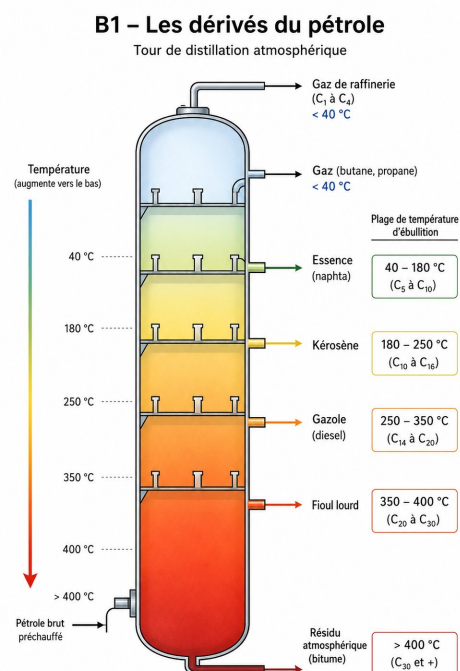


Illustration — B1 Les dérivés du pétrole

EXERCICE D'APPLICATION

On fournit le schéma d'une tour de distillation atmosphérique (gaz $<20^{\circ}\text{C}$; essence $40-180^{\circ}\text{C}$; kérosène $180-250^{\circ}\text{C}$; gazole $250-350^{\circ}\text{C}$; résidu $>350^{\circ}\text{C}$). Une fiche technique indique qu'un lot de bitume routier a été obtenu par distillation sous vide du résidu atmosphérique.

1) Identifier la fraction dont est issu le bitume.

2) Expliquer pourquoi une distillation sous vide (et non atmosphérique) est nécessaire pour l'extraire.

Votre résolution (au crayon)

B2 Bitumes : extraction, distillation fractionnée

1. Contexte

Le bitume est le liant hydrocarboné qui assemble les granulats dans un enrobé routier : c'est l'un des matériaux les plus utilisés en travaux publics. Sa production repose sur la distillation fractionnée du pétrole brut.

2. Définitions et méthode

- Distillation fractionnée : technique de séparation des constituants d'un mélange liquide homogène, fondée sur leurs températures d'ébullition différentes ; les constituants les plus volatils sortent en haut de colonne, les plus lourds en fond de colonne.
- Le bitume, résidu de distillation, est riche en molécules de masse molaire élevée (asphaltènes, résines, huiles lourdes) : sa température d'ébullition théorique dépasse la température de décomposition thermique du produit, ce qui impose souvent une distillation sous pression réduite (sous vide) pour l'extraire sans le dégrader.

Méthode attendue : exploiter des données physico-chimiques (températures d'ébullition, masses molaires, courbes de distillation) fournies dans un document, pour expliquer pourquoi le bitume est obtenu par distillation fractionnée en fin de procédé.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — justification de la distillation sous vide du bitume

Données fournies : sous pression atmosphérique, les fractions lourdes du pétrole se décomposeraient (craquage thermique indésirable) avant d'atteindre leur température d'ébullition théorique.

En abaissant la pression (distillation sous vide), on abaisse également la température d'ébullition des fractions lourdes, ce qui permet de les extraire sans les décomposer.

Conclusion attendue de l'étudiant : le résidu sous vide ainsi obtenu constitue le bitume, dont les propriétés (pénétrabilité, point de ramollissement) dépendent directement des conditions de distillation.

À retenir

- La distillation fractionnée sépare les constituants du pétrole selon leur température d'ébullition.
- Le bitume est extrait sous vide pour éviter sa décomposition thermique.
- Ses propriétés d'usage (dureté, viscosité) dépendent de sa composition, donc des conditions de distillation.

B2 – Bitumes : extraction, distillation fractionnée

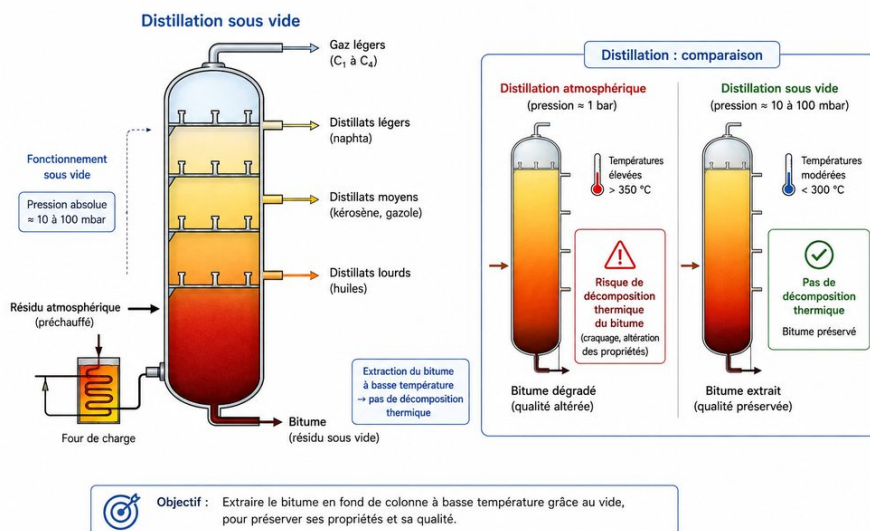


Illustration — B2 Bitumes : extraction, distillation fractionnée

EXERCICE D'APPLICATION

Trois coupes pétrolières A, B, C sont obtenues à partir d'un même brut : A (T ébullition 40-180°C), B (250-350°C), C (résidu sous vide, >350°C).

- 1) Associer à chaque coupe un usage probable parmi : essence, bitume, gazole.
- 2) Justifier l'ordre de sortie de ces trois coupes le long de la colonne (de haut en bas).

Votre résolution (au crayon)

B3 Différentes représentations des molécules organiques

1. Contexte

Pour décrire précisément les constituants des bitumes, polymères et adjuvants utilisés en travaux publics, il faut savoir passer d'un nom de molécule à sa formule, et inversement.

2. Définitions et méthode

- Formule brute : indique la nature et le nombre de chaque atome présent dans la molécule (ex. $C_4H_{10}O$), sans information sur leur enchaînement.
- Formule développée : représente tous les atomes et toutes les liaisons (y compris C-H).
- Formule semi-développée : ne représente pas les liaisons impliquant les atomes d'hydrogène (plus rapide à écrire, aussi informative sur l'enchaînement du squelette).

Méthode : à partir d'un nom (nomenclature IUPAC simplifiée : chaîne principale + groupe caractéristique + indice de position), reconstruire la formule semi-développée, et réciproquement.

3. Exemple d'application

Votre résolution (au crayon)

B4 Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles

1. Contexte

Le comportement d'un matériau organique (réactivité, polarité, tenue à l'eau, capacité à polymériser) dépend directement des groupes caractéristiques présents dans ses molécules.

2. Définitions et méthode

Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles à savoir identifier dans une structure moléculaire :

- Alcène : liaison double $C=C$
- Alcool : groupe hydroxyle $-OH$ porté par un carbone saturé
- Acide carboxylique : groupe $-COOH$
- Aldéhyde : groupe $-CHO$ (en bout de chaîne)
- Cétone : groupe $C=O$ porté par un carbone interne de chaîne
- Ester : groupe $-COO-$ (liaison entre un acide et un alcool)
- Amine : groupe $-NH_2$ (ou dérivé, azote lié à un ou plusieurs carbones)
- Amide : groupe $-CO-NH-$ (liaison entre un acide et une amine — c'est ce groupe qui relie les motifs du nylon, voir B6)

3. Exemple d'application

Exemple d'application — identifier les groupes d'un monomère acrylique

Molécule étudiée : acrylate de méthyle, $CH_2=CH-COO-CH_3$, utilisé dans certaines résines et peintures de chantier.

Groupe alcène : la double liaison $CH_2=CH-$ (site réactif qui permettra la polyaddition, voir B6).

Groupe ester : $-COO-CH_3$.

Cette double fonctionnalité (alcène + ester) explique à la fois la réactivité en polymérisation et les propriétés du polymère final (résine acrylique).

À retenir

- Savoir repérer un groupe caractéristique dans une structure donnée est la compétence clé (pas besoin de la nommer sans support).
- Un même monomère peut porter plusieurs groupes caractéristiques, chacun jouant un rôle (réactivité, propriétés du matériau final).

B4 – Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles

Exemple : acide acrylique

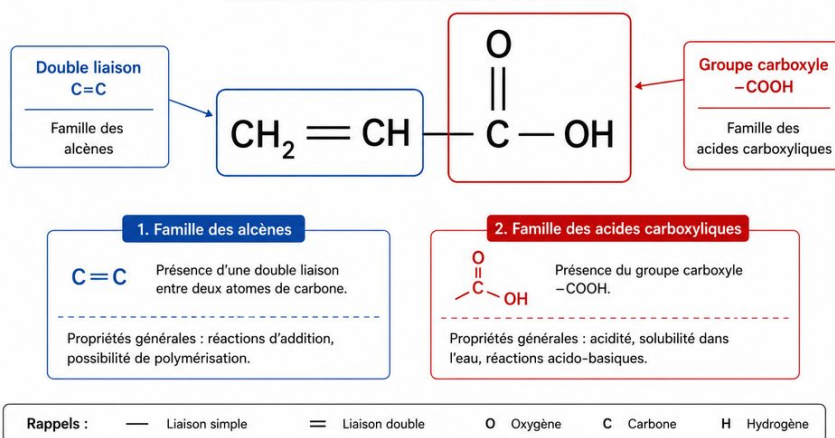
Formule semi-développée : $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$ 

Illustration — B4 Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles

EXERCICE D'APPLICATION

On étudie l'acide acrylique, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$, utilisé dans la synthèse de certains superplastifiants pour béton.

Identifier les groupes caractéristiques présents et nommer les familles fonctionnelles correspondantes.

Votre résolution (au crayon)

B5 Polymères : généralités et classification

1. Contexte

De nombreux matériaux de chantier sont des polymères : géomembranes, tuyaux PVC/PEHD, joints d'étanchéité, résines de scellement, peintures routières. Leur comportement à la mise en œuvre et en service dépend de leur classe.

2. Définitions et méthode

- Polymère thermoplastique : se ramollit de façon réversible sous l'effet de la chaleur et redevient rigide au refroidissement (chaînes linéaires ou ramifiées, liées entre elles par des forces faibles). Ex. : PVC, PEHD, PP.
- Polymère thermodurcissable : se rigidifie de façon irréversible sous l'effet de la chaleur, par formation d'un réseau tridimensionnel réticulé ; ne refond plus ensuite. Ex. : résines époxy, polyester réticulé.
- Élastomère : réseau réticulé souple, capable de subir de grandes déformations réversibles. Ex. : joints en caoutchouc, EPDM.

Méthode : proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental d'identification du caractère thermoplastique ou thermodurcissable d'un matériau polymère (test de comportement à la chaleur).

3. Exemple d'application (protocole expérimental)

Exemple d'application — identifier trois échantillons inconnus de chantier

Matériel : trois échantillons de matériaux de chantier non identifiés, plaque chauffante ou décapeur thermique, pince, lunettes de protection.

Protocole : chauffer progressivement chaque échantillon (sous hotte, en respectant les règles de sécurité) et observer le comportement.

Échantillon 1 : se ramollit progressivement, devient malléable, puis redevient rigide en refroidissant → thermoplastique (probablement un tube PEHD).

Échantillon 2 : reste rigide, puis se dégrade/noircit sans fondre → thermodurcissable (probablement une résine époxy de scellement).

Échantillon 3 : reste souple sur toute la plage de température testée, revient à sa forme après déformation → élastomère (probablement un joint EPDM).

À retenir

- Trois grandes classes de polymères : thermoplastiques (réversible), thermodurcissables (irréversible), élastomères (grande élasticité réversible).
- Un simple test de comportement à la chaleur permet de distinguer thermoplastique et thermodurcissable.

B5 – Polymères : généralités et classification

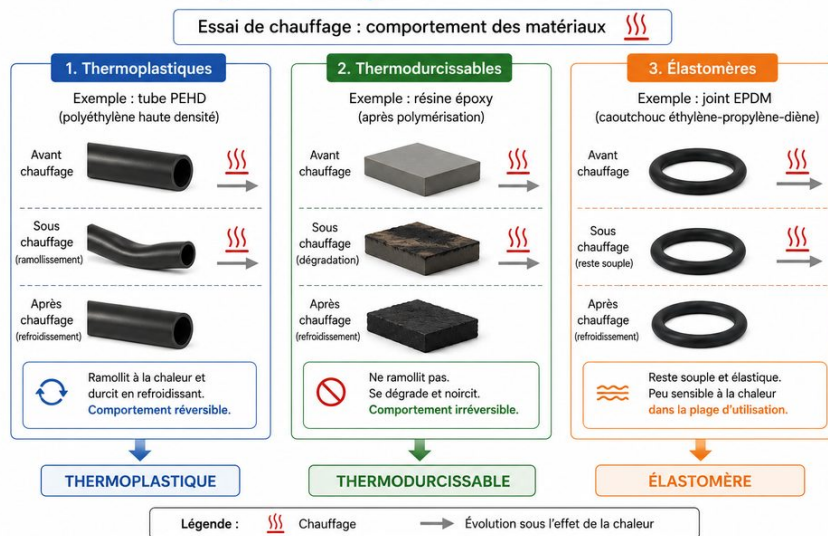


Illustration — B5 Polymères : généralités et classification

EXERCICE D'APPLICATION

Trois échantillons non identifiés X, Y, Z sont chauffés progressivement : X se ramollit puis redevient rigide au refroidissement ; Y reste rigide puis noircit sans fondre ; Z reste souple et reprend sa forme après déformation.

1) Identifier la classe de chaque polymère. 2) Proposer un exemple de matériau de chantier pour chacun.

Votre résolution (au crayon)

B6 Polymères : monomère, motif, groupes caractéristiques, réactions de polymérisation

1. Contexte

Comprendre comment un polymère se forme à partir de petites molécules (monomères) permet d'expliquer ses propriétés et son mode de production industrielle — exemple déjà rencontré : le nylon 6 des lignes d'ancrage de l'éolienne Floatgen.

2. Définitions et méthode

- Monomère : petite molécule capable de réagir avec elle-même ou avec d'autres monomères pour former un polymère.
- Polymère / macromolécule : molécule de grande taille (masse molaire élevée), formée par répétition d'un motif.
- Motif : unité structurale qui se répète le long de la macromolécule.
- Polyaddition : les monomères (porteurs d'une double liaison $C=C$) s'additionnent successivement sans perte de matière. Ex. : polyéthylène à partir de l'éthylène $CH_2=CH_2$.
- Polycondensation : les monomères (porteurs de deux groupes fonctionnels réactifs) réagissent avec élimination d'une petite molécule (souvent de l'eau) à chaque étape. Ex. : nylon 6 (polyamide) à partir de l'ouverture du cycle caprolactame.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — deux polymères de chantier, deux mécanismes

Polyaddition — PVC : $n CH_2=CHCl \rightarrow -(CH_2-CHCl)_n-$ (polymérisation du chlorure de vinyle, tuyaux et gaines de chantier).

Polycondensation — nylon 6 (déjà rencontré) : polymérisation par ouverture de cycle du caprolactame ($C_6H_{11}NO$), motif répété relié par des liaisons amide $-CO-NH-$; utilisé notamment pour les lignes d'ancrage synthétiques de l'éolienne flottante Floatgen (cf. sujet U32 2023).

Intérêt pour le chantier : la polyaddition donne des thermoplastiques facilement recyclables ; la polycondensation donne des matériaux à haute résistance mécanique (fibres) mais parfois plus sensibles à l'hydrolyse.

À retenir

- Polyaddition : monomères insaturés, pas de perte de matière (ex. PVC, PE).
- Polycondensation : monomères bifonctionnels, élimination d'une petite molécule à chaque étape (ex. nylon).
- Le motif et les groupes caractéristiques de la macromolécule doivent pouvoir être identifiés à partir de l'équation de polymérisation.

B6 – Polymères : monomère, motif, groupes caractéristiques, réactions de polymérisation

Exemple : polymérisation du styrène en polystyrène

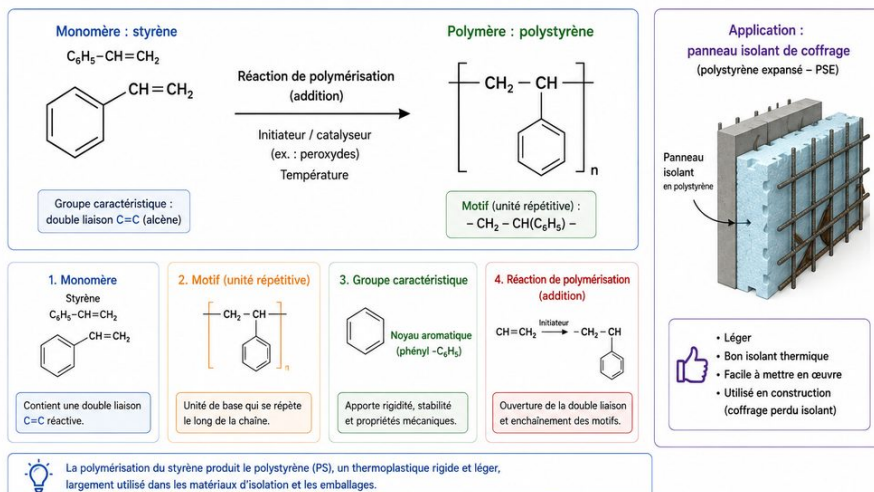


Illustration — B6 Polymères : monomère, motif, groupes caractéristiques, réactions de polymérisation

EXERCICE D'APPLICATION

Le polystyrène, utilisé pour les panneaux isolants de coffrage, est obtenu par polymérisation du styrène ($C_6H_5-CH=CH_2$).

- 1) S'agit-il d'une polyaddition ou d'une polycondensation ? Justifier.
- 2) Écrire l'équation de la réaction de polymérisation.

Votre résolution (au crayon)

B7 Vieillessement d'un matériau polymère

1. Contexte

Les polymères de chantier (géomembranes, gaines, joints) restent exposés pendant des années aux intempéries : leur durabilité dépend de leur résistance au vieillissement.

2. Définitions et méthode

Facteurs principaux de dégradation d'un matériau polymère :

- Rayonnement UV : rupture de liaisons chimiques (photo-oxydation), fragilisation et fissuration en surface.
- Température : accélération des réactions de dégradation, ramollissement ou fragilisation selon la classe du polymère.
- Oxygène de l'air : oxydation lente des chaînes macromoléculaires.
- Humidité : hydrolyse possible des liaisons sensibles (ex. liaisons amide ou ester), en particulier pour les polymères issus de polycondensation.
- Contraintes mécaniques répétées : fatigue du matériau, microfissuration.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — géomembrane PEHD exposée en surface

Une géomembrane en PEHD (polyéthylène haute densité) utilisée pour l'étanchéité d'un bassin de rétention se fissure après plusieurs années d'exposition au soleil.

Cause probable : photo-oxydation sous rayonnement UV, aggravée par les écarts de température jour/nuit.

Solution technique : choisir un matériau additivé (stabilisants anti-UV, antioxydants) ou prévoir un recouvrement (terre, gravier) limitant l'exposition directe au rayonnement.

À retenir

- UV, température, oxygène, humidité et fatigue mécanique sont les cinq grands facteurs de vieillissement à connaître.
- Le choix d'un polymère de chantier doit intégrer sa durabilité prévisible dans les conditions d'exposition réelles.

B7 – Vieillessement d'un matériau polymère

Exemple : géotextile en polypropylène (PP) exposé au soleil

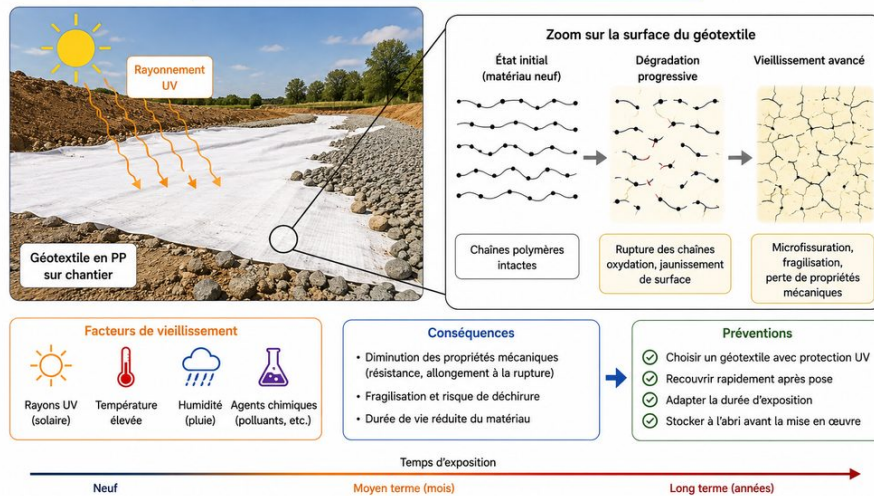


Illustration — B7 Vieillessement d'un matériau polymère

EXERCICE D'APPLICATION

Un géotextile en polypropylène (PP), destiné au renforcement d'une chaussée, est laissé plusieurs semaines en plein soleil avant sa mise en œuvre. L'entreprise constate un jaunissement et une fragilisation.

- 1) Identifier le principal facteur de vieillissement en cause.
- 2) Proposer une mesure de prévention simple.

Votre résolution (au crayon)

B8 Entités chimiques : molécules, atomes, ions

2. Transformation chimique de la matière

1. Contexte

Avant d'écrire une réaction chimique, il faut savoir nommer correctement chaque espèce mise en jeu.

2. Définitions et méthode

- Atome : entité neutre, brique de base de la matière.
- Molécule : assemblage neutre de plusieurs atomes liés par des liaisons covalentes.
- Cation : entité chargée positivement (a perdu un ou plusieurs électrons).
- Anion : entité chargée négativement (a gagné un ou plusieurs électrons).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — classer les espèces d'une eau de gâchage

Espèces à classer : Fe ; Fe^{2+} ; Cl^- ; H_2O ; Ca^{2+} ; CO_3^{2-}

Fe : atome (métal neutre). Fe^{2+} : cation (ion fer II). Cl^- : anion chlorure. H_2O : molécule (eau). Ca^{2+} : cation calcium. CO_3^{2-} : anion carbonate.

À retenir

- Le terme adapté (atome / molécule / cation / anion) se déduit directement de la formule chimique (charge, nombre d'atomes).

B8 – Entités chimiques : molécules, atomes, ions

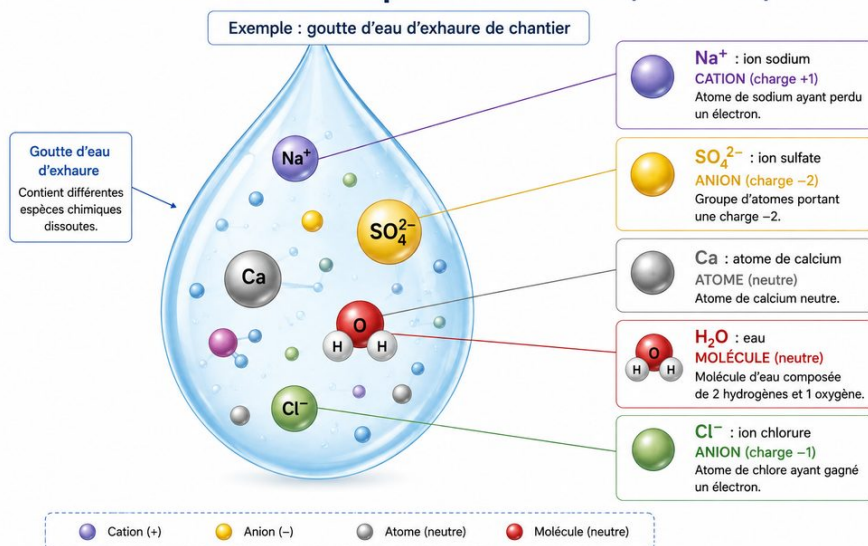


Illustration — B8 Entités chimiques : molécules, atomes, ions

EXERCICE D'APPLICATION

Une eau d'exhaure de chantier contient : Na^+ , SO_4^{2-} , Ca , H_2O , Cl^- .
Classer chacune de ces espèces parmi : atome, molécule, cation, anion.

Votre résolution (au crayon)

B9 Masse, quantité de matière, concentration en masse et en quantité de matière

1. Contexte

Doser un adjuvant, préparer une solution d'essai en laboratoire ou vérifier un dosage réglementaire nécessite de savoir relier masse, quantité de matière et concentration.

2. Définitions et méthode

$$n = m / M$$

avec n la quantité de matière (mol), m la masse (g), M la masse molaire (g/mol).

$$C_m = m / V \text{ et } C = n / V$$

avec C_m la concentration en masse (g/L), C la concentration en quantité de matière (mol/L), V le volume de solution (L).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — préparation d'une solution de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) au laboratoire

On dissout $m = 3,70$ g de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($M = 74,0$ g/mol) dans une fiole jaugée de $V = 500$ mL.

Quantité de matière : $n = m / M = 3,70 / 74,0 = 0,0500$ mol

Concentration en quantité de matière : $C = n / V = 0,0500 / 0,500 = 0,100$ mol/L

Concentration en masse : $C_m = m / V = 3,70 / 0,500 = 7,40$ g/L

À retenir

- Toujours vérifier l'homogénéité des unités (volume en L, masse en g) avant de calculer.
- $n = m/M$ est le pont entre masse et quantité de matière ; $C = n/V$ (ou $C_m = m/V$) relie quantité de matière (ou masse) et volume de solution.

B9 – Masse, quantité de matière, concentration en masse et en quantité de matière

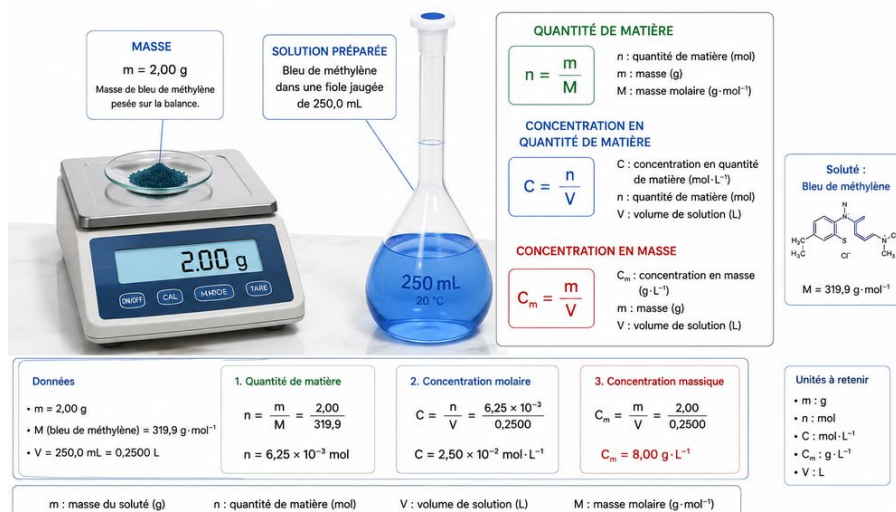


Illustration — B9 Masse, quantité de matière, concentration en masse et en quantité de matière

EXERCICE D'APPLICATION

Pour un essai au bleu de méthylène (argilosité d'un sol), on dissout $m = 2,00 \text{ g}$ de bleu de méthylène ($M = 320 \text{ g/mol}$) dans une fiole jaugée de $V = 1,00 \text{ L}$.

Calculer la quantité de matière n et la concentration en quantité de matière C de cette solution.

Votre résolution (au crayon)

B10 Transformation chimique, réaction, équation de réaction. Bilan de matière : réactif limitant, stœchiométrie, avancement

1. Contexte

Beaucoup d'essais de laboratoire (attaque acide d'un granulat calcaire, neutralisation d'une eau) se modélisent par une réaction chimique unique dont il faut savoir établir le bilan.

2. Définitions et méthode

- Équilibrer une équation de réaction : ajuster les nombres stœchiométriques pour respecter la conservation des éléments et de la charge.
- Réactif limitant : réactif totalement consommé le premier, qui arrête la réaction.
- Tableau d'avancement : tableau (état initial / en cours / final) exprimant les quantités de matière de chaque espèce en fonction de l'avancement x .

3. Exemple d'application

Exemple d'application — essai à l'acide chlorhydrique sur un granulat calcaire

Réaction (essai qualitatif de reconnaissance des calcaires) : $\text{CaCO}_3(\text{s}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

On fait réagir $n_0(\text{CaCO}_3) = 2,0 \times 10^{-3}$ mol de calcaire avec $n_0(\text{H}^+) = 3,0 \times 10^{-3}$ mol d'acide.

D'après la stœchiométrie, il faut 2 mol de H^+ pour 1 mol de CaCO_3 : il faudrait $n(\text{H}^+) = 4,0 \times 10^{-3}$ mol pour consommer tout le calcaire ; on n'en a que $3,0 \times 10^{-3}$ mol.

Réactif limitant : H^+ (l'acide). Avancement maximal : $x_{\text{max}} = n_0(\text{H}^+)/2 = 1,5 \times 10^{-3}$ mol.

À retenir

- Identifier le réactif limitant en comparant les quantités de matière disponibles aux coefficients stœchiométriques.
- Le tableau d'avancement est l'outil systématique pour ne pas se tromper de bilan.

B10 – Transformation chimique, réaction, équation de réaction, bilan de matière

Essai de reconnaissance d'un granulat calcaire

1. Échantillon

Granulat calcaire (contenant du CaCO_3)

2. Ajout d'acide

Ajout d'acide chlorhydrique (HCl aq)

3. Effervescence

Dégagement de dioxyde de carbone (CO_2)

INTERPRÉTATION

La présence d'effervescence (bulles de CO_2) indique une réaction chimique : le granulat contient du carbonate de calcium (calcaire).

CaCO_3
(calcaire)

+

HCl
(acide)

→

CO_2
(effervescence)

Légende : (s) solide (aq) aqueux (en solution) (g) gaz (l) liquide

ÉQUATION DE LA RÉACTION

$$\text{CaCO}_3(\text{s}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

Carbonate de calcium Ions hydrogène Ions calcium Dioxyde de carbone Eau

BILAN DE MATIÈRE (exemple)

Espèce chimique	Avant réaction (mol)	Après réaction (mol)
$\text{CaCO}_3(\text{s})$	n_0	0
$\text{H}^+(\text{aq})$	$2 n_0$	0
$\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$	0	n_0
$\text{CO}_2(\text{g})$	0	n_0
$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	—	n_0

1 mole de CaCO_3 réagit avec 2 moles de H^+ pour former 1 mole de Ca^{2+} , 1 mole de CO_2 et 1 mole de H_2O .

SÉCURITÉ

Acide chlorhydrique : corrosif
Porter des lunettes et des gants.

Illustration — B10 Transformation chimique, réaction, équation de réaction. Bilan de matière : réactif limitant, stœchiométrie, avancement

EXERCICE D'APPLICATION

Essai à l'acide chlorhydrique sur un granulat calcaire : $\text{CaCO}_3(\text{s}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

On dispose de $n_0(\text{CaCO}_3) = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ et $n_0(\text{H}^+) = 8,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

Déterminer le réactif limitant et l'avancement maximal de la réaction.

Votre résolution (au crayon)

B11 Transformation complète et incomplète

1. Contexte

Certaines réactions (comme l'attaque du calcaire par un acide fort) vont jusqu'au bout ; d'autres (équilibres acido-basiques faibles) s'arrêtent avant d'avoir consommé tout le réactif limitant.

2. Définitions et méthode

- Avancement maximal (x_{max}) : avancement calculé en supposant la réaction totale, limité par le réactif limitant.
- Avancement final (x_f) : avancement réellement atteint à l'état final du système.
- Transformation complète : $x_f = x_{\text{max}}$ (tout le réactif limitant est consommé).
- Transformation incomplète (ou limitée) : $x_f < x_{\text{max}}$ (un équilibre s'établit, les réactifs et les produits coexistent à l'état final).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — comparaison de deux transformations

Attaque du calcaire par HCl (acide fort, B10) : transformation totale, $x_f = x_{\max}$.

Dissolution d'un acide faible comme l'acide acétique dans l'eau ($\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$) : transformation limitée, un équilibre s'établit et $x_f < x_{\max}$ — toutes les molécules d'acide acétique ne sont pas dissociées.

À retenir

- $x_f = x_{\max} \rightarrow$ transformation totale ; $x_f < x_{\max} \rightarrow$ transformation limitée (équilibre).
- La force d'un acide ou d'une base (voir B12) détermine directement le caractère total ou limité de sa réaction avec l'eau.

B11 – Transformation complète et incomplète

Évolution de l'avancement x d'une réaction chimique au cours du temps

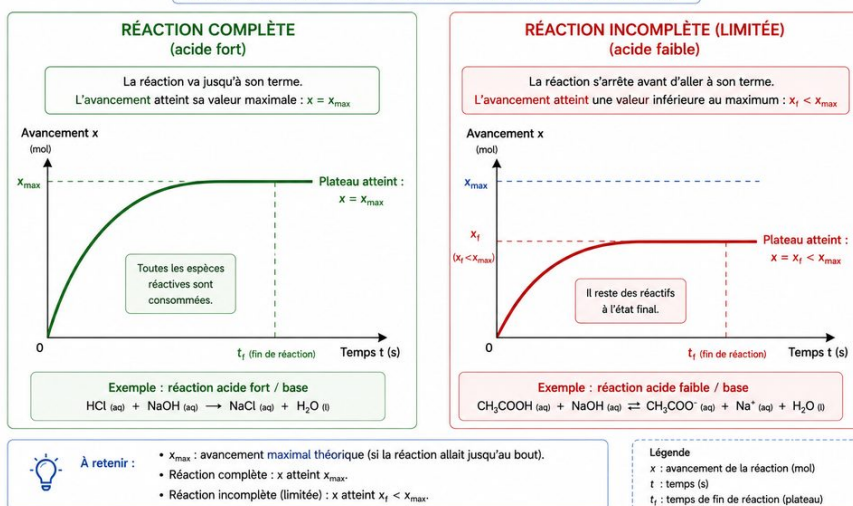


Illustration — B11 Transformation complète et incomplète

EXERCICE D'APPLICATION

Indiquer, en justifiant, si les réactions suivantes sont vraisemblablement complètes ou limitées :

- réaction entre l'acide chlorhydrique (fort) et le calcaire ;
- dissolution de l'acide carbonique (faible, issu du CO_2 dissous) dans l'eau.

Votre résolution (au crayon)

B12 Théorie de Brønsted : acide fort, base forte, acide faible, base faible

1. Contexte

La chimie acido-basique intervient directement dans la durabilité des ouvrages en béton armé : le pH du béton conditionne la protection des armatures contre la corrosion (voir B13, B14 et B17).

2. Définitions et méthode

- Acide (au sens de Brønsted) : espèce chimique capable de céder un proton H^+ .
- Base (au sens de Brønsted) : espèce chimique capable de capter un proton H^+ .
- Acide fort / base forte : réagit totalement avec l'eau (transformation complète).
- Acide faible / base faible : réagit partiellement avec l'eau (transformation limitée, équilibre — voir B11).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — comparer deux acides utilisés en laboratoire de chantier

Acide chlorhydrique HCl : acide fort, réaction totale avec l'eau ($HCl + H_2O \rightarrow Cl^- + H_3O^+$) — utilisé pour l'essai de reconnaissance des calcaires (B10).

Acide carbonique H_2CO_3 (formé par dissolution du CO_2 atmosphérique dans l'eau) : acide faible, réaction limitée avec l'eau — c'est ce couple qui intervient dans la carbonatation du béton (voir B14).

À retenir

- Fort/faible ne renseigne pas sur la concentration mais sur le caractère total ou limité de la réaction avec l'eau.
- Reconnaître un acide ou une base à partir de sa formule (capacité à céder ou capter H^+).

B12 – Théorie de Brønsted :

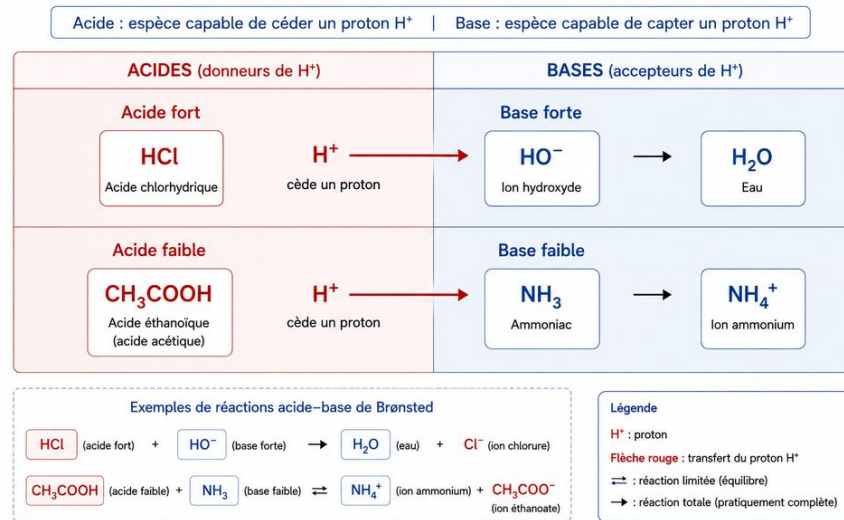


Illustration — B12 Théorie de Brønsted : acide fort, base forte, acide faible, base faible

EXERCICE D'APPLICATION

Parmi les espèces suivantes, indiquer lesquelles peuvent jouer le rôle d'acide, et lesquelles peuvent jouer le rôle de base au sens de Brønsted : HCl ; HO^- ; CH_3COOH ; NH_3 .

Votre résolution (au crayon)

B13 pH d'une solution aqueuse

1. Contexte

Le pH est un indicateur clé en travaux publics : le béton sain doit son pouvoir protecteur vis-à-vis des armatures à sa forte basicité (pH de l'ordre de 13), tandis que des eaux ou des sols acides peuvent dégrader certains ouvrages.

2. Définitions et méthode

$$pH = -\log[H_3O^+]$$

où $[H_3O^+]$ est la concentration en ions oxonium, exprimée en mol/L. En solution aqueuse diluée à 25 °C, le pH s'étend usuellement de 0 (très acide) à 14 (très basique), 7 correspondant à la neutralité.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — comparer le pH du béton sain et d'une eau de pluie

Béton sain : $pH \approx 13$ (milieu très basique, formé par les hydroxydes issus de l'hydratation du ciment) → forme un film passif protecteur autour des armatures (voir B16-B17).

Eau de pluie non polluée : $pH \approx 5,6$ (légèrement acide, à cause du CO_2 atmosphérique dissous) ; une pluie acide (pollution) peut descendre à $pH 4$.

Mesure pratique (capacité expérimentale) : mesurer le pH d'un extrait aqueux de béton broyé à l'aide d'un pH-mètre étalonné, pour évaluer l'état de carbonatation d'un ouvrage (voir B14).

À retenir

- $pH = -\log[H_3O^+]$; échelle 0-14 en solution aqueuse diluée à 25 °C.
- Le pH élevé du béton sain (≈ 13) est directement responsable de sa capacité à protéger les armatures métalliques de la corrosion.

B13 – pH d'une solution aqueuse

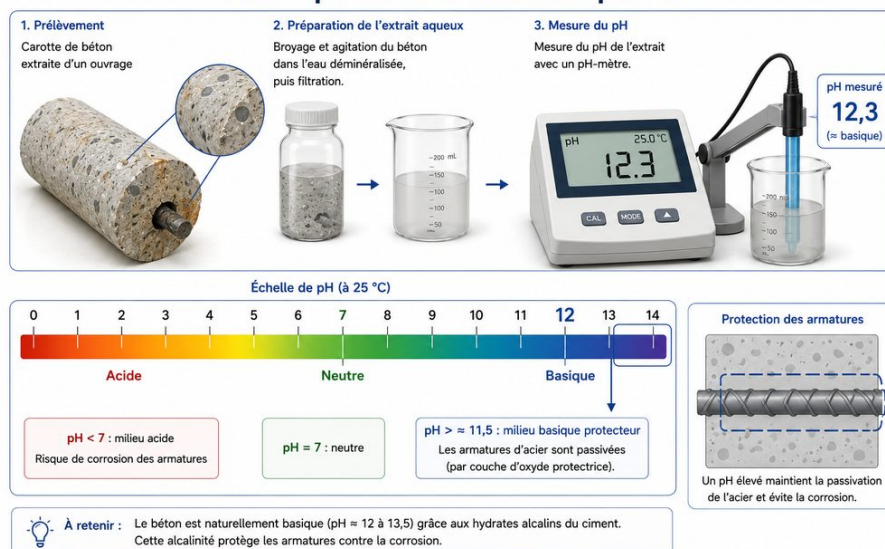


Illustration — B13 pH d'une solution aqueuse

EXERCICE D'APPLICATION

Un extrait aqueux d'une carotte de béton a une concentration en ions H_3O^+ de $[\text{H}_3\text{O}^+] = 5,0 \times 10^{-13} \text{ mol/L}$.

Calculer le pH de cet extrait et commenter au regard de l'état de protection des armatures.

Votre résolution (au crayon)

B14 Notion d'équilibre acido-basique. Couple acide-base. Constante d'acidité K_a . Diagramme de prédominance

1. Contexte

La carbonatation du béton — l'une des principales causes de corrosion des armatures — s'explique entièrement par un équilibre acido-basique entre le CO_2 atmosphérique dissous et les hydroxydes du béton.

2. Définitions et méthode

- Couple acide-base conjugué AH/A^- : deux espèces reliées par un échange d'un proton H^+ ($\text{AH} \rightleftharpoons \text{A}^- + \text{H}^+$).
- Constante d'acidité K_a (et $\text{p}K_a = -\log K_a$) : constante d'équilibre associée à la réaction du couple avec l'eau ; caractérise la force de l'acide (plus K_a est grand, ou $\text{p}K_a$ petit, plus l'acide est fort).
- Diagramme de prédominance : représentation, en fonction du pH, du domaine où chaque espèce du couple est majoritaire (espèce acide prédominante si $\text{pH} < \text{p}K_a$; espèce basique prédominante si $\text{pH} > \text{p}K_a$).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — la carbonatation du béton, un équilibre acido-basique

Couple en jeu : $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-$ ($\text{pK}_a \approx 6,3$).

Dans le béton sain, $\text{pH} \approx 13$ (très supérieur au pK_a) : le CO_2 dissous existe presque exclusivement sous forme d'ions $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}$, qui réagissent avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former du carbonate de calcium CaCO_3 — cette réaction consomme progressivement les hydroxydes protecteurs et abaisse le pH du béton au voisinage des armatures.

Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures (pH abaissé, typiquement en dessous de 9-10), le film passif protecteur n'est plus stable : l'acier devient sensible à la corrosion (voir B17).

À retenir

- Le diagramme de prédominance permet de prévoir la forme majoritaire d'une espèce selon le pH du milieu.
- La carbonatation du béton est un mécanisme acido-basique qui prépare directement la corrosion des armatures.

B14 – Équilibre acido-basique, couple acide-base, K_a , diagramme de prédominance

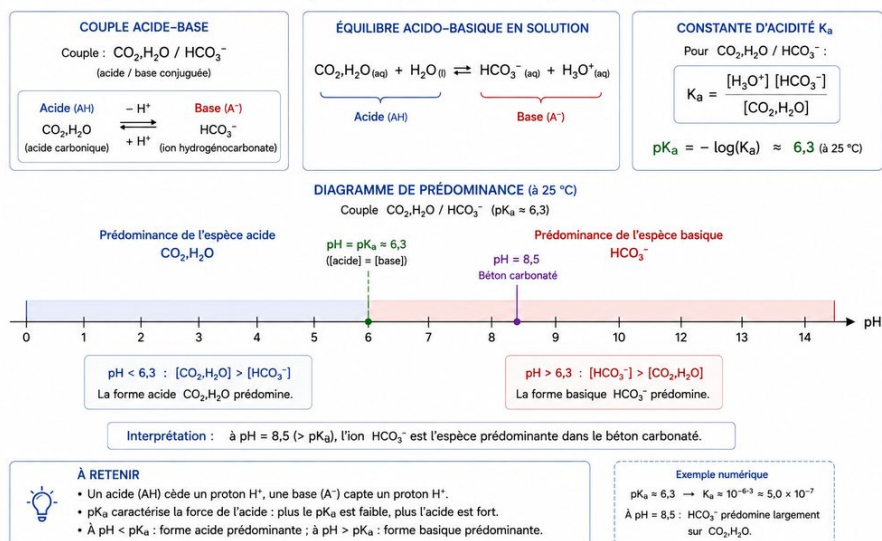


Illustration — B14 Notion d'équilibre acido-basique. Couple acide-base. Constante d'acidité K_a .
Diagramme de prédominance

EXERCICE D'APPLICATION

Le couple $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-$ a un $\text{pK}_a \approx 6,3$. Un extrait de béton carbonaté a un pH = 8,5.

Indiquer, à l'aide du diagramme de prédominance, l'espèce prédominante et commenter le lien avec la carbonatation du béton.

Votre résolution (au crayon)

B15 Oxydant, réducteur. Couple oxydant/réducteur. Réaction d'oxydoréduction

1. Contexte

La corrosion des aciers, la protection cathodique et de nombreux essais de laboratoire reposent sur des réactions d'oxydoréduction : il faut savoir les reconnaître et les écrire.

2. Définitions et méthode

- Oxydant : espèce capable de capter un ou plusieurs électrons.
- Réducteur : espèce capable de céder un ou plusieurs électrons.
- Couple oxydant/réducteur Ox/Red : relié par une demi-équation électronique $\text{Ox} + n \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Red}$.
- Réaction d'oxydoréduction : combinaison de deux demi-équations (l'une consommant des électrons, l'autre en produisant) donnant une réaction globale sans électrons libres.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — oxydation du fer par les ions H^+

Couples en jeu : Fe^{2+}/Fe ($E^\circ = -0,44 \text{ V}$) et H^+/H_2 ($E^\circ = 0,00 \text{ V}$).

Demi-équations : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$ (oxydation du fer, réducteur) ; $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (réduction, H^+ est l'oxydant).

Équation bilan : $\text{Fe(s)} + 2 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$

Ce type de réaction illustre le mécanisme de base de la corrosion acide d'un acier non protégé.

À retenir

- Identifier oxydant et réducteur à partir des couples fournis, puis combiner les demi-équations pour obtenir l'équation bilan (les électrons échangés doivent s'éliminer).
- Le fer métallique est un réducteur : c'est cette propriété qui le rend sensible à la corrosion (voir B16, B17).

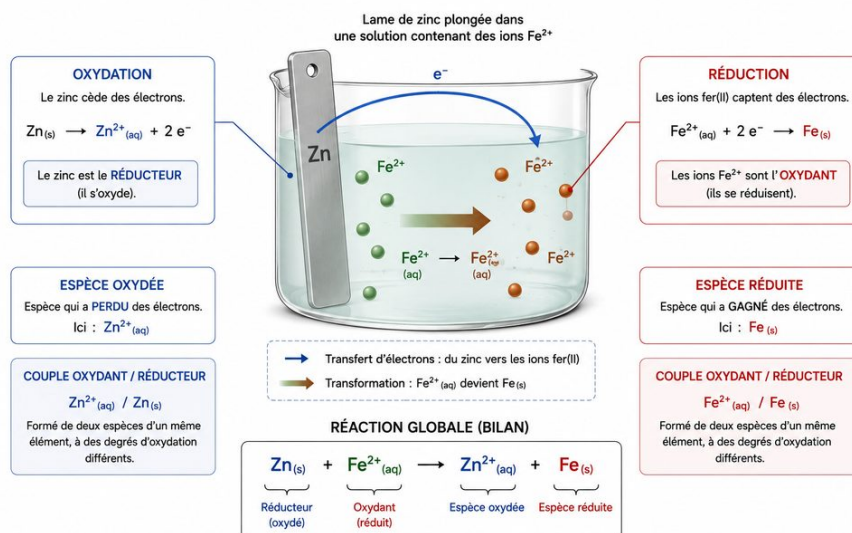
B15 – Oxydant, réducteur, couple oxydant/réducteur, réaction d'oxydoréduction

Illustration — B15 Oxydant, réducteur. Couple oxydant/réducteur. Réaction d'oxydoréduction

EXERCICE D'APPLICATION

Couples donnés : Zn^{2+}/Zn ($E^\circ = -0,76 \text{ V}$) et Fe^{2+}/Fe ($E^\circ = -0,44 \text{ V}$).

Justifier, à l'aide des potentiels standard, que la réaction entre le zinc métallique et les ions Fe^{2+} est favorable, puis écrire les demi-équations et l'équation bilan.

Votre résolution (au crayon)

B16 Influence du pH : diagrammes potentiel-pH

1. Contexte

Le comportement du fer face à la corrosion dépend à la fois du potentiel électrochimique du milieu et de son pH : le diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) synthétise cette double dépendance.

2. Définitions et méthode

Un diagramme potentiel-pH (E en ordonnée, pH en abscisse) délimite des domaines de prédominance ou d'existence des espèces d'un élément. Pour le fer, on distingue classiquement trois grands domaines :

- Domaine d'immunité : le métal Fe est thermodynamiquement stable, pas de corrosion possible.
- Domaine de corrosion : les espèces dissoutes (Fe^{2+} , Fe^{3+}) sont stables, le métal s'oxyde et se dissout.
- Domaine de passivation : un oxyde ou hydroxyde solide (film protecteur peu soluble) est stable en surface du métal, ce qui freine fortement la corrosion — c'est ce domaine qui explique la protection du fer dans le béton sain (pH élevé, voir B13-B14).

Méthode attendue : interpréter et exploiter un diagramme potentiel-pH simple qui est fourni (pas de tracé à connaître par cœur).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — lecture du diagramme E-pH du fer

On fournit le diagramme E-pH simplifié du système fer/eau, avec le point de fonctionnement d'une armature dans un béton sain (pH $\approx$ 13, potentiel de corrosion libre typique) : le point se situe dans le domaine de passivation.

Lorsque le pH diminue (carbonatation, B14) ou que des ions chlorure attaquent localement le film passif, le point de fonctionnement peut basculer dans le domaine de corrosion : l'armature commence à se corroder.

À retenir

- Trois domaines à savoir repérer sur un diagramme E-pH fourni : immunité, corrosion, passivation.
- La passivation du fer dans le béton sain explique sa durabilité ; sa rupture (carbonatation, chlorures) déclenche la corrosion.

B16 – Influence du pH : diagrammes potentiel-pH

Diagramme de Pourbaix simplifié du fer à 25 °C (activités = 10^{-6} mol·L⁻¹)

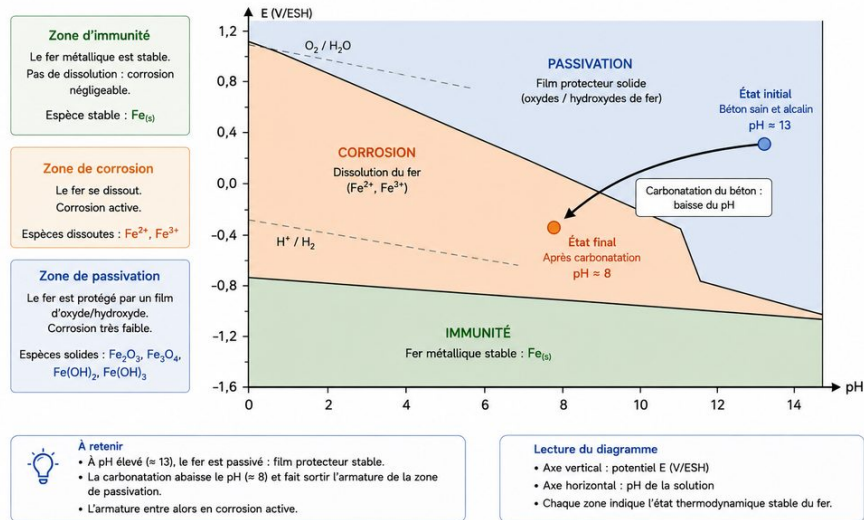


Illustration — B16 Influence du pH : diagrammes potentiel-pH

EXERCICE D'APPLICATION

Sur un diagramme E-pH simplifié du fer, on repère les domaines immunité / corrosion / passivation. Une armature se trouve initialement dans le domaine de passivation (béton sain, pH ≈ 13).

Décrire ce qui se passe si le pH diminue progressivement (carbonatation) jusqu'à pH ≈ 8 , à potentiel approximativement constant. Conclure sur le risque de corrosion.

Votre résolution (au crayon)

B17 Corrosion des métaux et protection (anode sacrificielle, courant imposé)

À vérifier par l'enseignant

Cette fiche a été reconstituée à partir de connaissances générales d'électrochimie et de l'exemple d'examen fourni par l'utilisateur (protection des armatures du flotteur de l'éolienne Floatgen, sujet U32 session 2023), et non depuis le texte exact du document d'accompagnement 2023 (passage non récupéré). Le contenu ci-dessous est scientifiquement correct et directement exploitable, mais à comparer aux pages 36-37 du document source avant de le figer dans une progression évaluée.

1. Contexte

La corrosion des armatures est l'une des principales pathologies des ouvrages en béton armé (ponts, quais, fondations offshore). Les techniciens de travaux publics doivent en comprendre le mécanisme pour choisir et justifier une méthode de protection adaptée.

2. Définitions et méthode

- Corrosion d'un métal : dégradation d'un métal par réaction chimique ou électrochimique avec son environnement, qui le fait retourner à un état oxydé (généralement plus stable thermodynamiquement que le métal natif).

Mécanisme de la corrosion du fer dans le béton armé en milieu humide : une pile électrochimique se forme localement à la surface de l'armature, avec :

- une zone anodique où le fer s'oxyde : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$
- une zone cathodique où le dioxygène dissous est réduit : $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{HO}^-$
- un électrolyte : la solution interstitielle du béton, qui assure la conduction ionique entre anode et cathode

Les ions Fe^{2+} et HO^- produits réagissent ensuite pour former des oxydes/hydroxydes de fer (rouille), dont le volume est supérieur à celui du métal d'origine : cela fissure le béton d'enrobage et accélère la dégradation. La corrosion nécessite systématiquement la présence de dioxygène et d'eau.

Protection cathodique

Principe général : imposer artificiellement à la structure métallique un potentiel suffisamment bas (négatif) pour la ramener dans le domaine d'immunité du diagramme E-pH (voir B16), afin que ce soit un autre matériau qui s'oxyde à sa place.

- Protection par anode sacrificielle : on relie électriquement l'armature à protéger (cathode) à un métal plus réducteur qu'elle (anode « sacrificielle », par exemple le zinc ou l'aluminium). L'anode se corrode préférentiellement et protège ainsi le métal principal, jusqu'à ce qu'elle soit consommée et doive être remplacée.
- Protection par courant imposé : un générateur externe impose un courant continu (basse tension, par exemple de l'ordre de quelques volts) entre une anode inerte (ou peu consommable) et la structure à protéger, qui devient cathode. Cette méthode évite le rejet progressif de sels métalliques dans l'environnement et permet d'ajuster la protection dans le temps, mais nécessite une alimentation électrique et un suivi.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — protection des armatures du flotteur de l'éolienne Floatgen (d'après sujet U32 2023)

Contexte : le flotteur en béton armé précontraint de l'éolienne Floatgen est équipé d'une protection cathodique par anode sacrificielle pour protéger l'acier de ses armatures.

Choix du métal de l'anode : il doit être plus réducteur que le fer (potentiel standard E° plus négatif que $E^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = -0,44 \text{ V}$), sans être excessif pour rester maîtrisable : le zinc ($E^\circ = -0,76 \text{ V}$) et l'aluminium ($E^\circ = -1,66 \text{ V}$) conviennent ; le magnésium ($E^\circ = -2,36 \text{ V}$), trop réactif, est plutôt réservé aux sols peu conducteurs.

Évolution observée sur des projets comparables (parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier) : préférence croissante pour la protection par courant imposé, qui évite le relargage de sels métalliques (aluminium, zinc) dans le milieu marin et permet un meilleur contrôle dans la durée.

À retenir

- La corrosion du fer dans le béton est un phénomène électrochimique (pile anode/cathode/électrolyte) nécessitant O_2 et H_2O .
- La protection cathodique consiste à imposer un potentiel bas à la structure, par anode sacrificielle (métal plus réducteur, consommable) ou par courant imposé (générateur externe).
- Le choix du métal d'anode sacrificielle se justifie par comparaison des potentiels standard E° du tableau fourni.

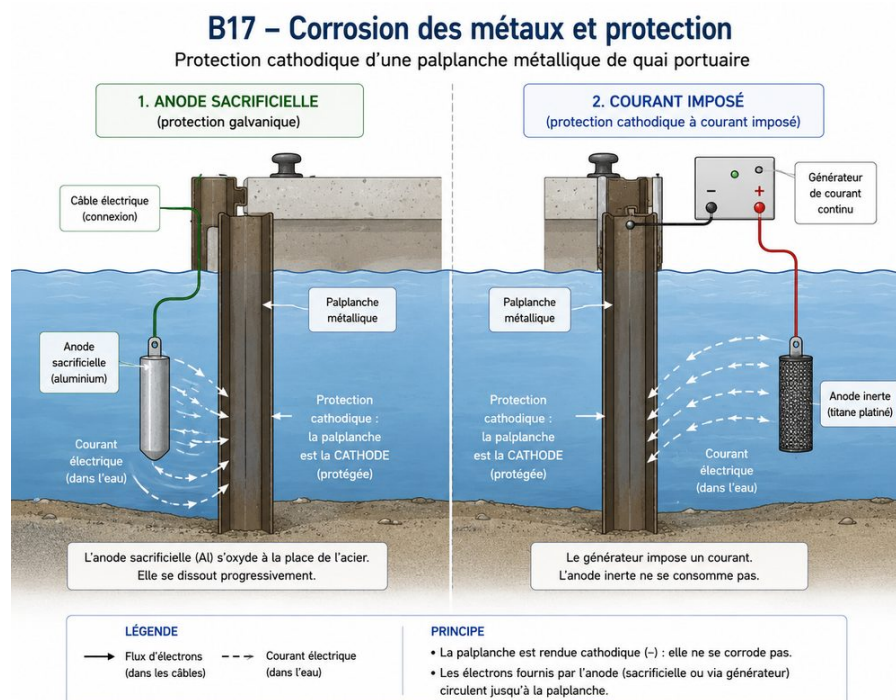


Illustration — B17 Corrosion des métaux et protection (anode sacrificielle, courant imposé)

EXERCICE D'APPLICATION

Pour protéger des palplanches métalliques de quai portuaire de la corrosion en milieu marin, l'entreprise hésite entre anodes sacrificielles en aluminium et courant imposé.

- 1) Rappeler le principe de la protection cathodique.
- 2) Donner un avantage et un inconvénient de chacune des deux solutions.

Votre résolution (au crayon)

B18 Valorisation des matériaux (économie circulaire des travaux publics)

À vérifier par l'enseignant

L'intitulé officiel du domaine (« Matériaux, transformation de la matière, valorisation ») laisse supposer l'existence d'un volet « valorisation » dans le référentiel, mais aucune « notion et contenu » ni « capacité exigible » officielle n'a pu être vérifiée pour ce volet (passage non récupéré du document source). Le contenu ci-dessous est un cadre général de culture professionnelle (non un cours de physique-chimie stricto sensu) fourni à titre de point de départ : à confronter impérativement au document d'accompagnement avant toute utilisation en évaluation.

1. Contexte

Le secteur des travaux publics produit et consomme d'importants volumes de matériaux (granulats, enrobés, béton, terres). La réglementation environnementale (loi anti-gaspillage pour une économie circulaire, réglementation environnementale des bâtiments) pousse à limiter les prélèvements de ressources naturelles et les mises en décharge, en favorisant le réemploi et le recyclage.

2. Éléments de culture générale (cadre professionnel)

- Hiérarchie des « 3R » (et au-delà) : réduire à la source, réemployer, recycler, valoriser énergétiquement, éliminer en dernier recours.
- Recyclage des granulats de démolition : concassage, criblage puis réintégration dans des couches de forme, remblais ou nouveaux bétons (sous conditions de contrôle qualité).
- Recyclage des enrobés bitumineux : technique à froid ou à chaud, réincorporation d'agrégats d'enrobés (fraisats) dans de nouvelles formulations routières.
- Gestion des déchets de chantier : tri à la source par catégories (inertes, non dangereux, dangereux), traçabilité, bordereaux de suivi.

3. Exemple d'illustration

Exemple d'application — recyclage d'une chaussée en place

Une chaussée existante est fraisée (rabotée) : les agrégats d'enrobés récupérés (fraisats) sont stockés puis réincorporés, en proportion contrôlée, dans la formulation d'un nouvel enrobé produit en centrale.

Bénéfices attendus : réduction de la quantité de granulats et de bitume neufs nécessaires, réduction du volume de déchets envoyés en décharge, bilan carbone allégé par rapport à une réfection classique.

À retenir

- Ce volet relève davantage d'une culture professionnelle transversale que d'un contenu disciplinaire chiffré comme les autres notions du domaine.
- À COMPLÉTER PAR L'ENSEIGNANT à partir du document d'accompagnement officiel avant intégration dans une progression évaluée.



Illustration — B18 Valorisation des matériaux (économie circulaire des travaux publics)

EXERCICE D'APPLICATION

Sur un chantier de réfection de chaussée, l'entreprise envisage de recycler les fraisats d'enrobés issus du rabotage de l'ancienne chaussée.

- 1) Citer deux bénéfices environnementaux attendus.
- 2) Situer cette pratique dans la hiérarchie des « 3R » de l'économie circulaire.

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE B**Evaluation — Matériaux, transformation de la matière, valorisation**

18 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. Quelle fraction pétrolière donne le bitume par distillation ?

- A. L'essence (fraction légère)
- B. Le kérosène
- C. Le résidu, fraction la plus lourde en fond de colonne
- D. Les gaz de tête de colonne

2. Pourquoi extrait-on le bitume par distillation sous vide plutôt qu'atmosphérique ?

- A. Pour accélérer le procédé
- B. Pour éviter sa décomposition thermique (craquage) à haute température
- C. Pour le refroidir plus vite
- D. Pour changer sa couleur

3. Quelle représentation moléculaire fait apparaître tous les atomes et toutes les liaisons ?

- A. La formule brute
- B. La formule développée
- C. La formule semi-développée
- D. La formule topologique

4. Le groupe caractéristique -COOH correspond à la famille des...

- A. Alcènes
- B. Acides carboxyliques
- C. Alcools
- D. Amines

5. Quel type de polymère se ramollit à chaud puis redevient rigide de façon réversible au refroidissement ?

- A. Le thermodurcissable
- B. L'élastomère
- C. Le thermoplastique
- D. Le composite

6. Dans une réaction de polyaddition, que se passe-t-il du point de vue du bilan de matière ?

- A. Une petite molécule est éliminée à chaque étape
- B. Les monomères insaturés s'additionnent, sans perte de matière
- C. Il se produit une réaction acide-base
- D. Du CO₂ est systématiquement dégagé

7. Parmi les propositions suivantes, lequel N'EST PAS un facteur classique de vieillissement des polymères ?

- A. Les UV
- B. La température
- C. Une pression atmosphérique normale et constante
- D. L'oxygène

8. Un ion portant une charge négative est appelé...

- A. Un cation
- B. Un anion
- C. Un atome neutre
- D. Un isotope

9. Quelle relation relie la quantité de matière n , la masse m et la masse molaire M ?

- A. $n = m \times M$
- B. $n = m / M$
- C. $n = M / m$
- D. $n = m + M$

10. Dans un bilan de matière, comment identifie-t-on le réactif limitant ?

- A. C'est toujours celui présent en plus grande quantité
- B. En comparant les quantités de matière disponibles aux coefficients stœchiométriques
- C. C'est le réactif le moins coûteux
- D. Il n'existe pas de méthode systématique

11. Une transformation chimique est dite totale lorsque...

- A. $x_f = x_{\max}$ (l'avancement final atteint l'avancement maximal)
- B. $x_f < x_{\max}$
- C. $x_f = 0$
- D. Elle dure très longtemps

12. Selon la théorie de Brønsted, un acide est une espèce capable de...

- A. Capturer un proton H^+
- B. Céder un proton H^+
- C. Céder un électron
- D. Capturer un électron

13. Quelle est la formule du pH d'une solution aqueuse ?

- A. $pH = [H_3O^+]$
- B. $pH = -\log[H_3O^+]$
- C. $pH = \log[H_3O^+]$
- D. $pH = 14 - [H_3O^+]$

14. Un diagramme de prédominance acido-basique permet de déterminer...

- A. La température de la réaction
- B. La forme (acide ou basique) majoritaire d'une espèce selon le pH
- C. La vitesse de la réaction
- D. La couleur de l'indicateur uniquement

15. Dans une réaction d'oxydoréduction, le réducteur est l'espèce qui...

- A. Capte des électrons
- B. Cède des électrons
- C. Capte des protons
- D. Cède des protons

16. Sur un diagramme potentiel-pH, la zone de passivation correspond à...

- A. Une corrosion rapide et généralisée du métal
- B. La formation d'une couche protectrice stable à la surface du métal
- C. L'absence totale de toute réaction chimique possible
- D. La dissolution totale et immédiate du métal

17. Le principe de la protection par anode sacrificielle consiste à...

- A. Isoler totalement la structure de l'eau
- B. Relier la structure à un métal plus réducteur, qui se corrode à sa place
- C. Peindre uniquement la structure
- D. Augmenter la teneur en oxygène au contact du métal

18. La valorisation des matériaux de chantier (économie circulaire) vise notamment à...

- A. Augmenter systématiquement la mise en décharge
- B. Réduire, réemployer et recycler les matériaux (les « 3R »)
- C. Interdire tout recyclage sur chantier
- D. Ignorer le cycle de vie des matériaux

DOMAINE C

Mécanique du solide

Pourquoi ce chapitre ?

Une pile de pont, une glissière de sécurité, la chaussée d'un virage ou le tambour d'une toupie à béton sont tous des systèmes mécaniques soumis à des forces qu'il faut savoir modéliser pour les dimensionner et vérifier leur stabilité. Ce chapitre construit progressivement les outils de la mécanique du solide : décrire un mouvement (cinématique), puis analyser les actions mécaniques et leurs effets (statique et dynamique), jusqu'à l'étude d'un cas particulier omniprésent en travaux publics — l'effet centrifuge, à la base du dimensionnement du dévers des chaussées.

C1 Référentiel. Caractère relatif du mouvement

1. Contexte

Décrire le mouvement d'un godet de pelle, d'une benne ou d'un caillou projeté par une roue d'engin n'a de sens que si l'on précise par rapport à quoi ce mouvement est observé.

2. Définitions et méthode

- Référentiel : solide de référence auquel on associe un repère d'espace et une horloge, permettant de repérer la position d'un point au cours du temps.
- Caractère relatif du mouvement : le mouvement d'un point dépend du référentiel choisi — un point immobile dans un référentiel peut être en mouvement dans un autre.
- Référentiels usuels de chantier : référentiel terrestre (lié au sol, considéré fixe pour la plupart des mouvements de chantier) ; référentiel lié à un engin ou véhicule (pour étudier un mouvement relatif à sa cabine ou à son châssis).

Méthode : caractériser le référentiel choisi pour l'étude d'un mouvement, c'est-à-dire préciser le solide de référence et justifier sa pertinence au regard de l'échelle de temps et d'espace de la problématique.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — trajectoire d'un caillou projeté par la roue d'un compacteur

Un caillou est coincé dans la sculpture du pneu d'un compacteur qui roule en ligne droite, puis se détache.

Dans le référentiel lié à la roue (référentiel de l'engin) : le caillou suit, avant détachement, une trajectoire circulaire.

Dans le référentiel terrestre (lié à la route) : la trajectoire du point de la roue est une cycloïde (combinaison de la rotation et de la translation de l'engin) ; une fois détaché, le caillou suit une trajectoire parabolique sous l'effet de son inertie et de la pesanteur.

Conclusion : la même situation physique donne deux descriptions de trajectoire totalement différentes selon le référentiel choisi.

À retenir

- Un mouvement n'existe que relativement à un référentiel : toujours préciser le référentiel avant de décrire un mouvement.
- Le choix du référentiel se justifie par la problématique posée (échelle de temps, d'espace, solide dont on étudie le mouvement).

C1 – Référentiel. Caractère relatif du mouvement

Un caillou éjecté par le pneu d'un compacteur de chantier

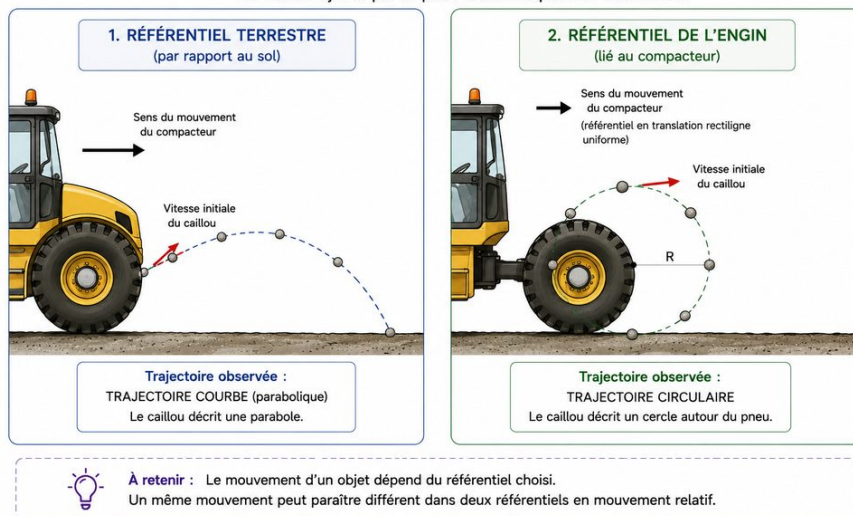


Illustration — C1 Référentiel. Caractère relatif du mouvement

EXERCICE D'APPLICATION

Un ouvrier assis dans la cabine d'une pelle mécanique en train de tourner sur elle-même observe le godet à l'extrémité du bras.

Décrire qualitativement le mouvement du godet dans le référentiel lié à la cabine, puis dans le référentiel terrestre. Les deux descriptions sont-elles en contradiction ?

Votre résolution (au crayon)

C2 Description du mouvement d'un solide : translation, rotation autour d'un axe fixe

1. Contexte

De nombreux éléments de chantier sont en translation (levée d'une benne, lancement d'un tablier de pont) ou en rotation autour d'un axe fixe (tambour de toupie à béton, meule, bras d'une pelle articulée) : savoir reconnaître et caractériser ces deux mouvements est indispensable.

2. Définitions et méthode

- Translation : à chaque instant, tous les points du solide ont le même vecteur vitesse (même direction, sens et norme). On distingue la translation rectiligne (trajectoires = droites parallèles) et la translation circulaire (trajectoires = cercles de même rayon, les segments du solide restant parallèles à eux-mêmes).
- Rotation autour d'un axe fixe : tous les points du solide décrivent des cercles centrés sur l'axe, avec la même vitesse angulaire ω à un instant donné.

Vitesse angulaire de rotation, reliée à la fréquence de rotation N :

$$\omega = 2\pi \times N \text{ (\omega en rad/s, N en tr/s)}$$

Vitesse d'un point M situé à une distance r de l'axe de rotation :

$$\mathbf{v} = \omega \times \mathbf{r}$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — tambour d'une toupie à béton

Le tambour d'une toupie à béton, de rayon $R = 1,20 \text{ m}$, tourne à la fréquence $N = 12 \text{ tr/min}$ pendant le malaxage.

Conversion : $N = 12 / 60 = 0,20 \text{ tr/s}$

Vitesse angulaire : $\omega = 2\pi \times N = 2\pi \times 0,20 \approx 1,257 \text{ rad/s}$

Vitesse d'un point situé à la paroi du tambour : $v = \omega \times R = 1,257 \times 1,20 \approx 1,51 \text{ m/s}$

Capacité expérimentale associée : mettre en œuvre un dispositif (chronophotographie, capteur de position, application smartphone) pour collecter et exploiter des données réelles sur un mouvement de translation ou de rotation.

À retenir

- Translation : tous les points ont le même vecteur vitesse. Rotation autour d'un axe fixe : tous les points ont la même vitesse angulaire, mais une vitesse linéaire proportionnelle à leur distance à l'axe.
- $\omega = 2\pi N$ et $v = \omega \times r$ sont les deux relations clés à mobiliser systématiquement.

C2 – Description du mouvement d'un solide

Rotation d'une toupie à béton autour d'un axe fixe

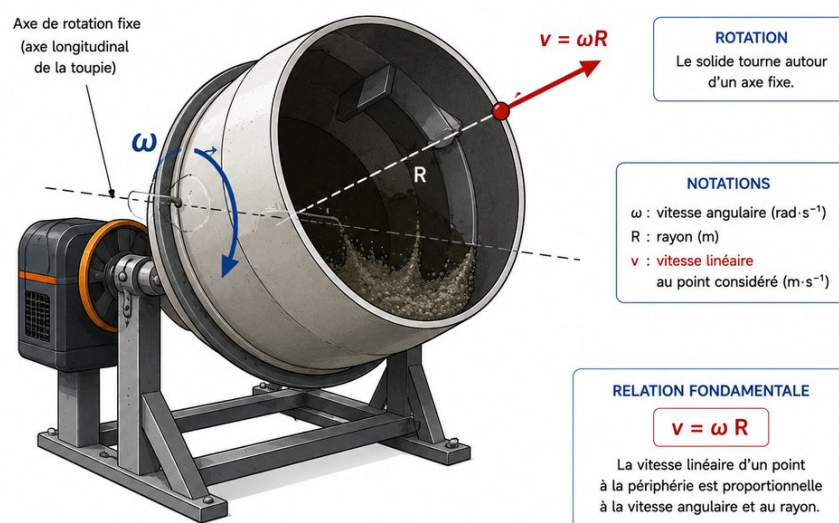


Illustration — C2 Description du mouvement d'un solide : translation, rotation autour d'un axe fixe

EXERCICE D'APPLICATION

Le tambour d'une centrale à béton, de rayon $R = 0,9 \text{ m}$, tourne à une fréquence $N = 15 \text{ tr/min}$.

Calculer sa vitesse angulaire ω et la vitesse d'un point situé à la paroi du tambour.

Votre résolution (au crayon)

C3 Actions mécaniques sur un système. Force résultante et moment. Couple

2. Statique et dynamique

1. Contexte

Dimensionner une pile de pont, une glissière de sécurité ou un pare-avalanche impose de recenser toutes les actions mécaniques qui s'exercent sur l'ouvrage et d'évaluer leurs effets, y compris leur tendance à faire tourner la structure autour d'un point ou d'un axe.

2. Définitions et méthode

- Action mécanique : toute cause capable de modifier le mouvement d'un système ou de le déformer ; modélisée par une force (point d'application, direction, sens, norme en newton) ou par une répartition de forces (volumique, surfacique, linéique).
- Bilan des actions mécaniques : recensement de toutes les forces extérieures appliquées à un système (poids, réactions d'appui, forces de contact, poussées, etc.).
- Force résultante : somme vectorielle de toutes les forces d'un système d'actions mécaniques.

Moment d'une force par rapport à un axe (mesure de son aptitude à faire tourner le solide autour de cet axe) :

$$M = F \times d$$

où d est le bras de levier : la distance entre l'axe et la droite d'action de la force.

- Couple : ensemble de deux forces parallèles, de même norme, de sens opposés, appliquées sur des droites d'action distinctes — leur résultante est nulle, mais leur moment ne l'est pas.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — choc d'un véhicule sur une glissière de sécurité

Un véhicule heurte une glissière de sécurité avec une force horizontale $F = 50 \text{ kN}$, appliquée à une hauteur $h = 0,60 \text{ m}$ au-dessus du point d'ancrage au sol du poteau support.

Moment de cette force par rapport à l'axe horizontal du point d'ancrage : $M = F \times d = 50\,000 \times 0,60 = 30\,000 \text{ N}\cdot\text{m} = 30 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Ce moment doit être repris par le système de fixation du poteau dans le sol : c'est une donnée d'entrée essentielle pour dimensionner l'ancrage.

À retenir

- Toujours commencer par un bilan des actions mécaniques exhaustif avant tout calcul.
- Moment = force $\times$ bras de levier ; un couple a une résultante nulle mais un moment non nul.

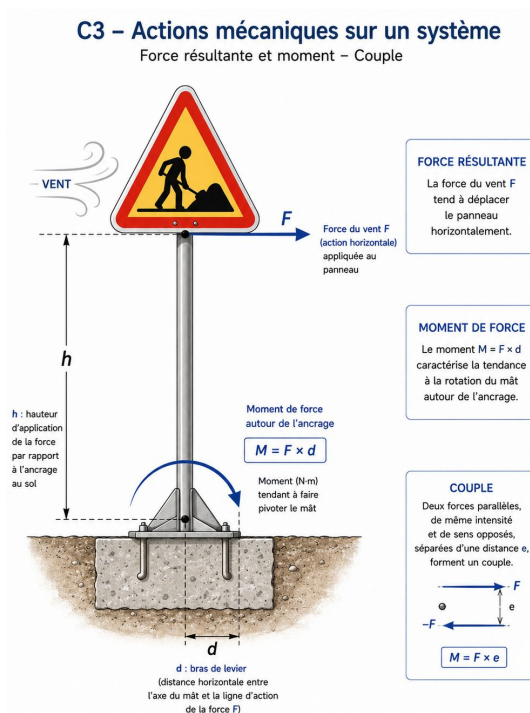


Illustration — C3 Actions mécaniques sur un système. Force résultante et moment. Couple

EXERCICE D'APPLICATION

Un panneau de signalisation de chantier fixé sur un mât subit une force du vent $F = 800 \text{ N}$, appliquée horizontalement à $h = 1,8 \text{ m}$ au-dessus de l'ancrage au sol.

Calculer le moment de cette force par rapport à l'axe horizontal de l'ancrage.

Votre résolution (au crayon)

C4 Référentiel galiléen. Principe de l'inertie

1. Contexte

Avant d'appliquer les lois de Newton à un système (pile de pont, engin, véhicule), il faut vérifier que le référentiel choisi peut raisonnablement être considéré comme galiléen.

2. Définitions et méthode

- Principe de l'inertie : dans un référentiel galiléen, un système mécaniquement isolé (soumis à aucune force) ou pseudo-isolé (soumis à des forces qui se compensent) persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme.
- Référentiel galiléen : référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié.

Méthode : discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel pour une situation donnée, en tenant compte de l'échelle de temps et d'espace du problème, et de l'éventuelle rotation ou accélération du référentiel lui-même.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — le référentiel terrestre est-il galiléen ?

Étude de la chute d'un objet depuis le bras d'une grue de chantier (quelques secondes, quelques dizaines de mètres) : le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen avec une très bonne approximation.

Étude du mouvement du béton à l'intérieur du tambour d'une toupie en rotation (voir C2) : le référentiel lié au tambour n'est pas galiléen, car il est en rotation par rapport au référentiel terrestre — c'est dans ce type de référentiel qu'apparaît l'effet centrifuge étudié en C7.

À retenir

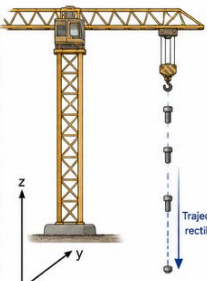
- Le référentiel terrestre est galiléen en très bonne approximation pour la plupart des situations de chantier « à échelle humaine ».
- Un référentiel en rotation (tambour, virage) n'est jamais rigoureusement galiléen.

C4 – Référentiel galiléen. Principe de l'inertie

Comparaison de deux référentiels

✓ RÉFÉRENTIEL GALILÉEN
(supposé inertiel)

Exemple : chute libre d'un boulon depuis un mât de chantier



PRINCIPE DE L'INERTIE
(1^{ère} loi de Newton)

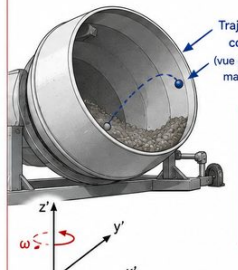
Dans un référentiel galiléen, si la résultante des forces extérieures est nulle, un corps conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme.

Trajectoire rectiligne

Axes fixes par rapport au sol

✗ RÉFÉRENTIEL NON GALILÉEN
(accélééré ou en rotation)

Exemple : bille à l'intérieur d'un malaxeur à béton en rotation



RÉFÉRENTIEL EN ROTATION

La bille n'a pas un mouvement rectiligne uniforme : des forces d'inertie (centrifuge, de Coriolis...) doivent être introduites pour décrire son mouvement.

Trajectoire courbe (vue depuis le malaxeur)

Axes tournants avec le malaxeur (vitesse angulaire ω)

À RETENIR

✓ Référentiel galiléen : axes fixes ou en translation rectiligne uniforme → principe de l'inertie valable.

✗ Référentiel non galiléen : axes accélérés ou en rotation → principe de l'inertie non valable sans forces d'inertie.

Illustration — C4 Référentiel galiléen. Principe de l'inertie

EXERCICE D'APPLICATION

Justifier si le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen pour étudier :

- la chute d'un boulon depuis le haut d'un mât de 25 m ;
- le mouvement d'une bille à l'intérieur d'un malaxeur à béton en rotation rapide.

Votre résolution (au crayon)

C5 Principe fondamental de la dynamique

1. Contexte

Relier les forces appliquées à un système à son accélération est la base du dimensionnement de tout équipement de levage ou de tout élément en mouvement accéléré sur un chantier.

2. Définitions et méthode

Principe fondamental de la dynamique (PFD) en translation, dans un référentiel galiléen :

$$\Sigma F_{ext} = m \times a$$

La somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un système de masse m est égale au produit de sa masse par son vecteur accélération.

PFD en rotation autour d'un axe fixe Δ (l'expression du moment cinétique $L_{\Delta} = J_{\Delta} \times \omega$ étant fournie, avec J_{Δ} le moment d'inertie du solide par rapport à Δ) :

$$\Sigma M_{\Delta}(F_{ext}) = J_{\Delta} \times (d\omega/dt)$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — levage d'une benne de chantier avec accélération

Un monte-charge de chantier lève une benne chargée de masse totale $m = 800$ kg avec une accélération constante $a = 0,50$ m/s² (vers le haut).

Bilan des forces sur l'axe vertical (ascendant positif) : le poids $P = m \cdot g$ (vers le bas) et la tension T du câble (vers le haut).

PFD : $T - m \cdot g = m \cdot a$, donc $T = m \times (g + a) = 800 \times (9,81 + 0,50) = 800 \times 10,31 \approx 8248$ N $\approx 8,25$ kN

Ce calcul montre que la tension nécessaire au levage accéléré dépasse le simple poids statique ($800 \times 9,81 = 7848$ N) : c'est cette surtension qu'il faut intégrer dans le choix du câble et du treuil.

À retenir

- $\Sigma F = m \cdot a$ en translation ; $\Sigma M_{\Delta} = J_{\Delta} \cdot (d\omega/dt)$ en rotation — bien identifier le référentiel (supposé galiléen) avant d'appliquer le PFD.
- Une accélération, même modeste, modifie sensiblement les efforts par rapport au cas statique (poids seul) : à ne jamais négliger dans un calcul de levage.

C5 – Principe fondamental de la dynamique

Benne de chantier suspendue à un câble de treuil

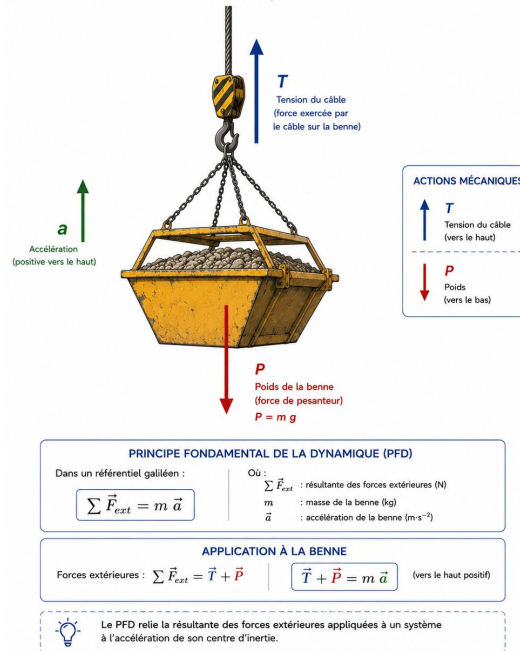


Illustration — C5 Principe fondamental de la dynamique

EXERCICE D'APPLICATION

Une benne de chantier de masse $m = 650 \text{ kg}$ est descendue par un treuil avec une décélération constante $a = 0,3 \text{ m/s}^2$ en fin de descente.

Calculer la tension T du câble pendant cette phase ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$, axe vertical ascendant positif).

Votre résolution (au crayon)

C6 Conditions d'équilibre d'un solide

1. Contexte

Vérifier la stabilité d'un échafaudage, d'un étalement provisoire ou d'une benne suspendue à une grue repose sur l'écriture des conditions d'équilibre d'un solide.

2. Définitions et méthode

- Solide soumis à deux forces : équilibre si et seulement si les deux forces sont directement opposées (même droite d'action, sens opposés, même norme).
- Solide soumis à trois forces (non parallèles) : équilibre si et seulement si (1) la somme vectorielle des trois forces est nulle, et (2) leurs droites d'action sont concourantes en un même point (ou toutes trois parallèles).

Méthode : écrire et exploiter les conditions d'équilibre d'un solide soumis à trois forces au maximum ; discuter expérimentalement ces conditions (ex. banc d'essai à trois dynamomètres).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — benne suspendue par deux élingues symétriques

Une benne chargée, de poids $P = 12 \text{ kN}$, est suspendue au crochet d'une grue par deux élingues symétriques faisant chacune un angle $\alpha = 30^\circ$ avec la verticale.

Système à l'équilibre soumis à trois forces : le poids P et les deux tensions T (égales par symétrie).

Équilibre selon l'axe vertical : $2 \times T \times \cos(\alpha) = P$, donc $T = P / (2 \cdot \cos \alpha) = 12\,000 / (2 \times 0,866) \approx 6928 \text{ N} \approx 6,93 \text{ kN}$

Chaque élingue doit donc être choisie pour supporter au moins 6,93 kN, avec un coefficient de sécurité additionnel selon la réglementation de levage.

À retenir

- Deux forces : opposées. Trois forces : résultante nulle ET droites d'action concourantes (ou parallèles).
- Le triangle des forces (fermeture vectorielle) est l'outil graphique complémentaire du calcul analytique.

C6 – Conditions d'équilibre d'un solide

Panneau de coffrage vertical maintenu par un étai incliné à 60°

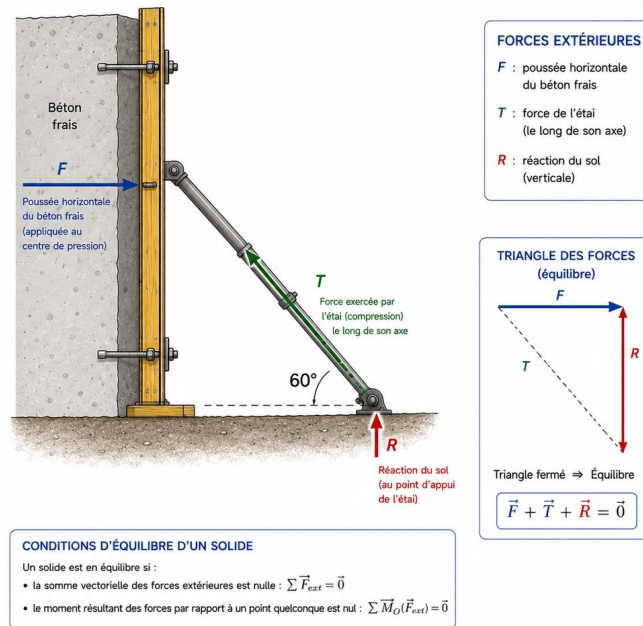


Illustration — C6 Conditions d'équilibre d'un solide

EXERCICE D'APPLICATION

Un panneau de coffrage vertical (poids négligeable) est maintenu par un étai incliné à 60° par rapport à l'horizontale. Le panneau subit une poussée horizontale du béton frais $F = 4,5 \text{ kN}$, équilibrée par la composante horizontale de la force de l'étai. Calculer la norme de la force exercée par l'étai.

Votre résolution (au crayon)

C7 Effet centrifuge

1. Contexte

Le dimensionnement du dévers d'une chaussée en courbe, tout comme la compréhension du comportement d'un véhicule ou d'un mélange en cuve tournante

(toupie à béton), repose sur l'effet centrifuge.

2. Définitions et méthode

Dans un référentiel non galiléen en rotation uniforme (par exemple un référentiel lié à un véhicule en virage), il faut introduire une force d'inertie d'entraînement fictive — la « force centrifuge » — dirigée vers l'extérieur de la courbe, pour pouvoir appliquer le principe fondamental de la dynamique dans ce référentiel.

$$F_{ie} = m \times \omega^2 \times r = m \times v^2 / r$$

où r est le rayon de la trajectoire circulaire, v la vitesse (mesurée dans le référentiel terrestre) et ω la vitesse angulaire. Dans le référentiel terrestre (galiléen), il n'existe pas de « force centrifuge » réelle : c'est au contraire une force centripète réelle (dirigée vers le centre de la courbe), fournie par l'adhérence pneu/chaussée et par le dévers, qui permet au véhicule de suivre sa trajectoire circulaire.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — dimensionnement théorique du dévers d'une chaussée en courbe

Un virage de rayon $R = 300$ m est emprunté à la vitesse $v = 90$ km/h = 25 m/s.

Modèle simplifié « sans frottement » (fourni) : à la limite du glissement, la composante du poids selon la pente compense exactement la force centrifuge, ce qui donne $\tan(\beta) = v^2 / (g \cdot R)$, avec β l'angle de dévers théorique.

$$\tan(\beta) = 25^2 / (9,81 \times 300) = 625 / 2943 \approx 0,212, \text{ soit } \beta \approx 12^\circ$$

Commentaire physique important : ce résultat théorique (dévers ≈ 12 %) est très supérieur aux dévers réels des chaussées, réglementairement limités à quelques pourcents (de l'ordre de 7 % maximum en France). Cela s'explique par le fait que l'adhérence pneu-chaussée (frottement), non prise en compte dans ce modèle simplifié, fournit en réalité l'essentiel de la force centripète nécessaire ; le dévers réel ne vient qu'en complément.

À retenir

- Effet centrifuge = force d'inertie fictive, uniquement dans un référentiel non galiléen en rotation ($F_{ie} = m \cdot v^2 / r$).
- Dans le référentiel terrestre, c'est une force centripète réelle (adhérence + dévers) qui impose la trajectoire circulaire.
- Le modèle « sans frottement » surestime le dévers nécessaire : en pratique, l'adhérence pneu-chaussée joue un rôle central, complété seulement par le dévers réglementaire.

C7 – Effet centrifuge

Lors d'un virage, la charge est soumise à une force centrifuge dirigée vers l'extérieur de la courbe.

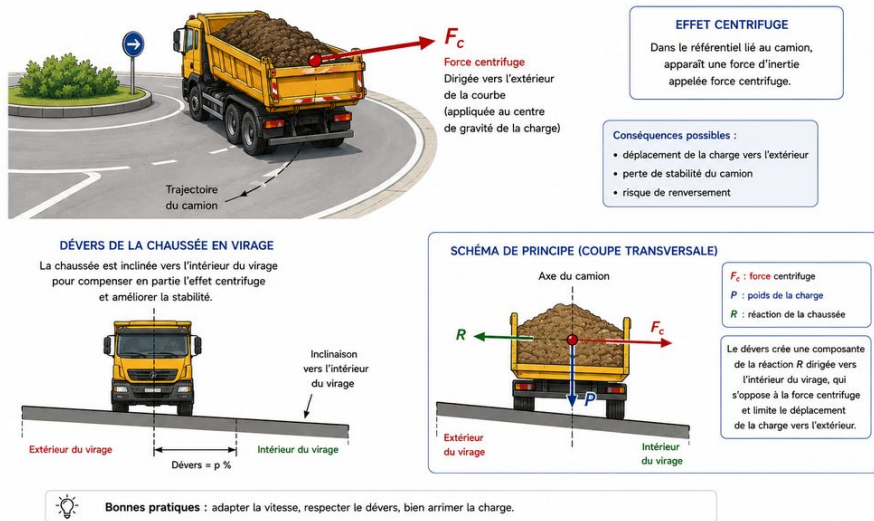


Illustration — C7 Effet centrifuge

EXERCICE D'APPLICATION

Un camion de chantier de masse $m = 18 \text{ t}$ aborde un rond-point de rayon $R = 25 \text{ m}$ à la vitesse $v = 30 \text{ km/h}$ ($= 8,33 \text{ m/s}$).

Calculer la force centrifuge (dans le référentiel du camion) subie par le chargement.

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE C Evaluation — Mécanique du solide

7 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. Le mouvement d'un solide ne peut être décrit que...

- A. Dans l'absolu, sans aucune référence
- B. Par rapport à un référentiel explicitement précisé

- C. Uniquement en laboratoire
- D. Sans notion de temps

2. Lors d'une rotation d'un solide autour d'un axe fixe, quelle grandeur est identique pour tous les points du solide ?

- A. La vitesse linéaire v
- B. La vitesse angulaire ω
- C. L'accélération linéaire
- D. La distance à l'axe

3. Le moment d'une force F par rapport à un axe, à la distance d (bras de levier), se calcule par...

- A. $M = F + d$
- B. $M = F \times d$
- C. $M = F / d$
- D. $M = F - d$

4. Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel...

- A. Le principe de l'inertie est vérifié
- B. Tous les objets sont nécessairement immobiles
- C. Seule la Terre existe
- D. Les vitesses sont toujours nulles

5. Le principe fondamental de la dynamique en translation s'écrit...

- A. $\Sigma F = m \times v$
- B. $\Sigma F = m \times a$
- C. $\Sigma F = m / a$
- D. $\Sigma F = a / m$

6. Pour qu'un solide soumis à trois forces soit en équilibre, il faut que...

- A. Les trois forces soient toutes égales entre elles
- B. La résultante soit nulle ET les droites d'action soient concourantes (ou parallèles)
- C. Une seule des trois forces suffise à l'expliquer
- D. Le solide soit immobile depuis toujours

7. L'effet centrifuge ressenti par un passager dans un virage est...

- A. Une force réelle qui s'exerce dans le référentiel terrestre
- B. Une force d'inertie fictive, ressentie uniquement dans le référentiel tournant
- C. Strictement identique à la force centripète

- D. Indépendant de la vitesse du véhicule

DOMAINE D

Mécanique des fluides

Pourquoi ce chapitre ?

Coffrages, granulats, sols, canalisations d'assainissement ou d'adduction d'eau, coulis d'injection : les travaux publics manipulent en permanence des fluides, au repos (statique) ou en écoulement (dynamique). Ce chapitre donne les outils pour calculer une poussée, dimensionner un coffrage, comprendre le fonctionnement d'un vérin hydraulique, vérifier la capacité d'un réseau ou évaluer les pertes de charge d'une canalisation.

D1 Pression dans un fluide, force pressante

1. Contexte

Dimensionner un coffrage de voile béton ou vérifier la poussée des terres sur un mur de soutènement provisoire nécessite de savoir calculer la pression exercée par un fluide (béton frais, eau, sol assimilé à un fluide) sur une paroi, et la force qui en résulte.

2. Définitions et méthode

Pression en un point d'un fluide, rapport de la force pressante normale à la surface sur laquelle elle s'exerce :

$$p = F / S$$

Unité SI : le pascal (Pa = N/m²). Unités usuelles de chantier : le bar (1 bar = 10⁵ Pa), le kPa, le MPa.

Force pressante résultante sur une surface S soumise à une pression p supposée uniforme, orientée perpendiculairement à la surface :

$$F = p \times S$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — force pressante du béton frais sur un panneau de coffrage

Un panneau de coffrage de largeur 1,0 m et de hauteur 2,5 m ($S = 2,5 \text{ m}^2$) subit une pression moyenne de béton frais $p = 25 \text{ kPa}$.

Force pressante résultante : $F = p \times S = 25\,000 \times 2,5 = 62\,500 \text{ N} = 62,5 \text{ kN}$

Cet ordre de grandeur (plusieurs dizaines de kN sur un simple panneau) explique pourquoi les banches de coffrage doivent être fortement raidies et étrépillonnées.

À retenir

- $p = F/S$ et $F = p \times S$: la pression est une grandeur locale, la force pressante dépend en plus de la surface concernée.
- Une pression modeste peut engendrer une force considérable sur une grande surface (coffrage, panneau de blindage de fouille).

D1 – Pression dans un fluide, force pressante

Panneau de coffrage soumis à la pression du béton frais

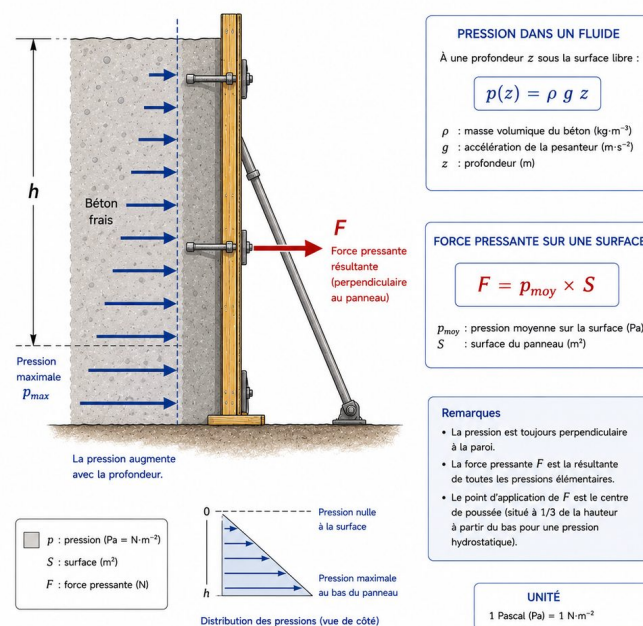


Illustration — D1 Pression dans un fluide, force pressante

EXERCICE D'APPLICATION

Un panneau de blindage de fouille (largeur 1,2 m, hauteur 2,0 m) est soumis à une pression moyenne des terres $p = 18 \text{ kPa}$.

Calculer la force pressante résultante sur ce panneau.

Votre résolution (au crayon)

D2 Relation fondamentale de l'hydrostatique

1. Contexte

Calculer la pression du béton frais sur un coffrage en fonction de la hauteur coulée, ou la pression de l'eau sur un mur de soutènement partiellement immergé, repose sur la relation fondamentale de l'hydrostatique.

2. Définitions et méthode

Pour un fluide au repos, de masse volumique ρ , la pression au pied d'une colonne de hauteur h de ce fluide (par rapport à la pression en surface libre) vaut :

$$p(\text{bas}) = p(\text{haut}) + \rho \times g \times h$$

Cette relation permet de calculer une différence de pression entre deux points d'un même fluide au repos, ou la hauteur de fluide correspondant à une différence de pression donnée.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — pression du béton frais en pied de coffrage

Un voile en béton armé est coulé sur une hauteur $h = 3,0$ m. Masse volumique du béton frais : $\rho \approx 2400$ kg/m³.

Pression hydrostatique théorique au pied du coffrage : $p = \rho \times g \times h = 2400 \times 9,81 \times 3,0 \approx 70\,632$ Pa $\approx 70,6$ kPa

Remarque professionnelle : ce calcul hydrostatique donne un majorant ; les recommandations professionnelles de coffrage tiennent compte en plus de la vitesse de bétonnage et du début de prise, qui réduisent en pratique la pression réelle par rapport à ce calcul enveloppe.

À retenir

- La pression hydrostatique augmente linéairement avec la profondeur (ou la hauteur de fluide) : $p = \rho \cdot g \cdot h$.
- Elle est indépendante de la forme du récipient (ou du coffrage) — seule la hauteur de fluide compte.

D2 – Relation fondamentale de l'hydrostatique

Coffrage vertical rempli de béton frais

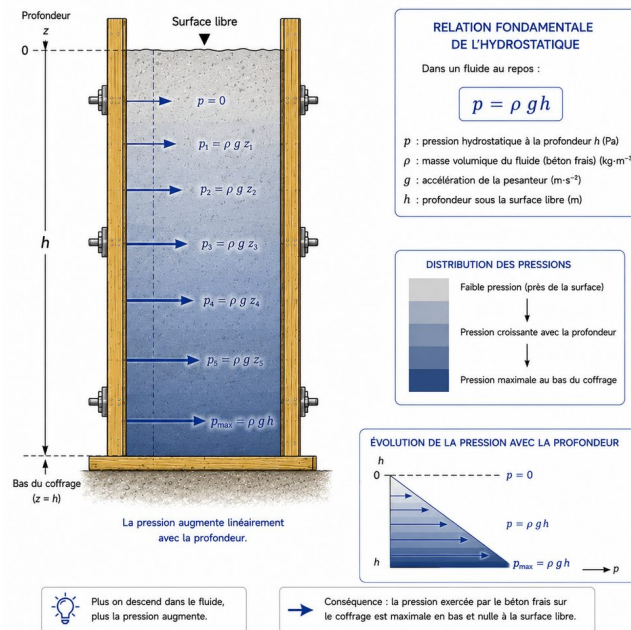


Illustration — D2 Relation fondamentale de l'hydrostatique

EXERCICE D'APPLICATION

Calculer la pression hydrostatique de l'eau au fond d'une fouille inondée sur une hauteur $h = 2,5 \text{ m}$ ($\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$).

Votre résolution (au crayon)

D3 Théorème de Pascal

1. Contexte

Les circuits hydrauliques des engins de chantier (pelles, nacelles, bennes) exploitent la transmission intégrale de la pression dans un fluide incompressible pour démultiplier les efforts.

2. Définitions et méthode

Théorème de Pascal : toute variation de pression appliquée en un point d'un fluide incompressible en équilibre se transmet intégralement en tout point de ce fluide.

Application directe — le vérin hydraulique : la pression étant la même en tout point du circuit, on a :

$$p = F1 / S1 = F2 / S2$$

ce qui permet, avec un petit piston de commande (section S1) et un grand piston de vérin (section S2), de démultiplier la force disponible.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — démultiplication de force dans un vérin de pelle hydraulique

Piston de commande : $S1 = 5 \text{ cm}^2$. Piston du vérin de godet : $S2 = 80 \text{ cm}^2$. Force appliquée au piston de commande : $F1 = 300 \text{ N}$.

Pression transmise : $p = F1 / S1 = 300 / (5 \times 10^{-4}) = 600\,000 \text{ Pa} = 600 \text{ kPa}$

Force disponible au vérin : $F2 = p \times S2 = 600\,000 \times (80 \times 10^{-4}) = 4800 \text{ N} = 4,8 \text{ kN}$

Le rapport des surfaces (ici $\times 16$) démultiplie directement la force disponible : c'est le principe de tous les circuits hydrauliques d'engins de chantier.

À retenir

- Dans un fluide incompressible au repos, la pression se transmet intégralement en tout point.
- Un vérin hydraulique démultiplie une force par le simple rapport des surfaces des pistons.

D3 – Théorème de Pascal

Vérin hydraulique d'un engin de chantier

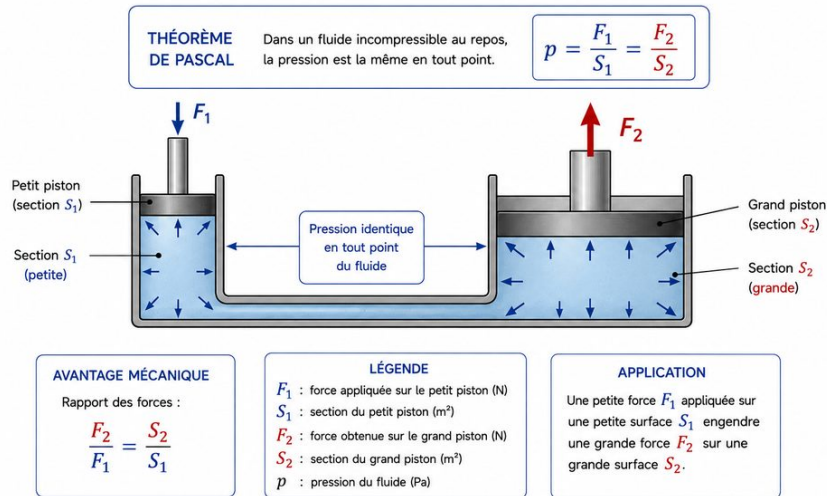


Illustration — D3 Théorème de Pascal

EXERCICE D'APPLICATION

Un vérin hydraulique de nacelle élévatrice a un piston de commande de section $S_1 = 8 \text{ cm}^2$ et un piston de levage de section $S_2 = 120 \text{ cm}^2$.

Quelle force F_1 faut-il exercer sur le piston de commande pour soulever une charge de $F_2 = 6000 \text{ N}$?

Votre résolution (au crayon)

D4 Poussée d'Archimède

1. Contexte

Vérifier la stabilité d'un batardeau, d'un caisson de fondation ou d'un ouvrage flottant (déjà rencontré avec l'éolienne flottante Floatgen) nécessite d'exploiter la poussée d'Archimède.

2. Définitions et méthode

Tout corps immergé, totalement ou partiellement, dans un fluide subit de la part de celui-ci une force verticale, dirigée vers le haut, appelée poussée d'Archimède, dont la valeur est égale au poids du volume de fluide déplacé :

$$F_A = \rho_{\text{fluide}} \times V_{\text{immergé}} \times g$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — stabilité d'un caisson de fondation (batardeau)

Un batardeau (caisson étanche provisoire) a un volume immergé $V_{\text{immergé}} = 45 \text{ m}^3$ dans l'eau de mer ($\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$).

Poussée d'Archimède : $F_A = \rho \times V_{\text{immergé}} \times g = 1030 \times 45 \times 9,81 \approx 454\,694 \text{ N} \approx 454,7 \text{ kN}$

Cette poussée doit être comparée au poids total du caisson (structure + lestage éventuel) pour vérifier qu'il ne flotte pas involontairement avant clavage — même logique que pour la flottabilité du flotteur de l'éolienne Floatgen déjà étudiée.

À retenir

- $F_A = \rho_{\text{fluide}} \times V_{\text{immergé}} \times g$, toujours verticale et dirigée vers le haut.
- Seul compte le volume réellement immergé, pas le volume total de l'objet.

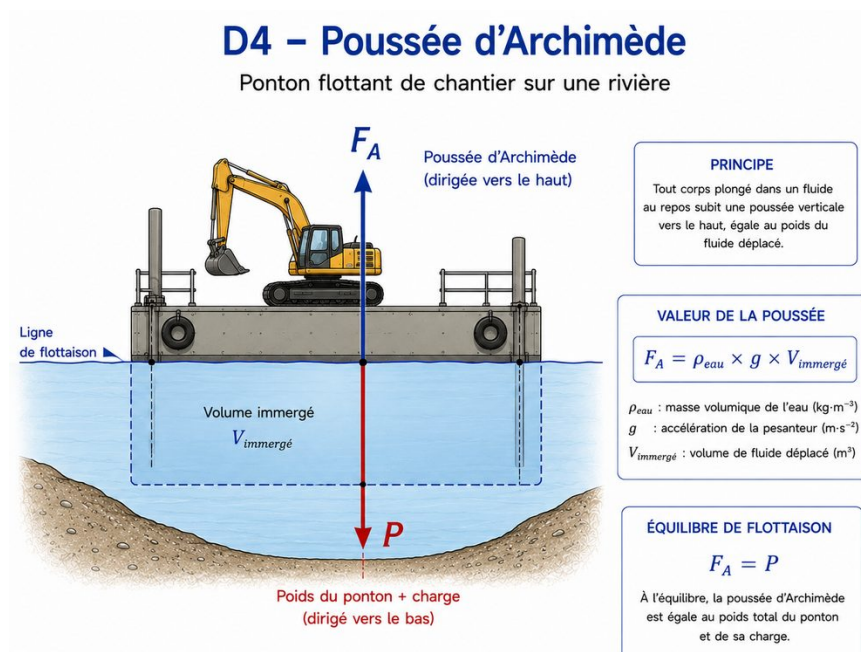


Illustration — D4 Poussée d'Archimède

EXERCICE D'APPLICATION

Un ponton flottant de chantier a un volume immergé $V = 12 \text{ m}^3$ sur une rivière (eau douce, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$).

Calculer la poussée d'Archimède exercée sur le ponton et en déduire sa masse totale à l'équilibre flottant.

Votre résolution (au crayon)

D5 Tension superficielle et capillarité

2. Tension superficielle et capillarité

1. Contexte

Les remontées d'humidité dans les maçonneries, la pénétration de l'eau dans un béton poreux ou dans un sol fin s'expliquent par des phénomènes de tension superficielle et de capillarité — des paramètres clés pour la durabilité des ouvrages (gel-dégel, corrosion des armatures, voir domaine B).

2. Définitions et méthode

- Tension superficielle : grandeur caractérisant l'énergie associée à la surface libre d'un liquide (interface liquide-air) ; elle traduit la tendance du liquide à minimiser cette surface.
- Capillarité : phénomène de montée (ou de descente) d'un liquide dans un tube très fin ou un matériau poreux, résultant de la tension superficielle et du mouillage de la paroi par le liquide.

Méthode : citer des applications de la tension superficielle dans le domaine professionnel ; mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à étudier les phénomènes de capillarité et leurs conséquences sur les matériaux poreux.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — essai de remontée capillaire sur une éprouvette de mortier

Protocole : la base d'une éprouvette de mortier est mise en contact avec une fine lame d'eau (colorée pour faciliter la lecture) ; on mesure la hauteur du front humide après un temps donné (par exemple 24 h).

Interprétation : une hauteur de remontée importante traduit une porosité capillaire élevée du matériau, donc une sensibilité accrue aux remontées d'humidité, au gel-dégel et, pour un béton armé, à la corrosion des armatures (voir domaine B).

Application chantier : ce type d'essai guide le choix d'un béton pour un ouvrage en contact prolongé avec l'eau (fondation, réseau, ouvrage maritime).

À retenir

- La capillarité résulte de la tension superficielle et du mouillage : elle explique la remontée d'eau dans les matériaux poreux.
- Un matériau plus poreux capillairement est plus vulnérable à l'humidité, au gel et à la corrosion des armatures qu'il contient.

D5 – Tension superficielle et capillarité

Essai de remontée capillaire sur éprouvettes de mortier

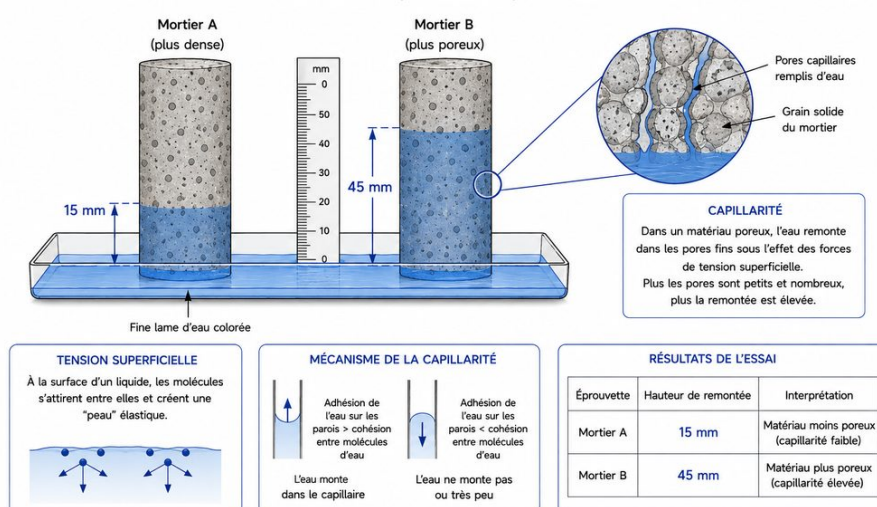


Illustration — D5 Tension superficielle et capillarité

EXERCICE D'APPLICATION

Deux échantillons de béton A et B sont soumis au même essai de remontée capillaire pendant 24 h : A présente une hauteur de front humide de 15 mm, B de 45 mm.

Lequel a la porosité capillaire la plus faible ? Quelle conséquence sur leur durabilité respective ?

Votre résolution (au crayon)

D6 Débit massique et débit volumique

3. Dynamique des fluides incompressibles

1. Contexte

Le dimensionnement de toute canalisation (assainissement, adduction d'eau) part du débit à transporter.

2. Définitions et méthode

$$Q_v = V / t \text{ et } Q_m = m / t = \rho \times Q_v$$

Q_v : débit volumique (m^3/s), Q_m : débit massique (kg/s), V le volume écoulé pendant la durée t , ρ la masse volumique du fluide.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — débit en sortie d'une canalisation d'évacuation

Une canalisation évacue $V = 1200 \text{ L}$ d'eau en $t = 2 \text{ min} = 120 \text{ s}$.

Débit volumique : $Q_v = V / t = 1,200 / 120 = 0,010 \text{ m}^3/\text{s} = 10 \text{ L/s}$

Débit massique (eau, $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$) : $Q_m = \rho \times Q_v = 1000 \times 0,010 = 10 \text{ kg/s}$

À retenir

- Toujours homogénéiser les unités ($\text{L} \rightarrow \text{m}^3$, $\text{min} \rightarrow \text{s}$) avant de calculer un débit.
- $Q_m = \rho \times Q_v$ relie directement les deux types de débit pour un fluide donné.

D6 – Débit massique et débit volumique

Mesure du débit d'eau à la sortie d'une canalisation de chantier

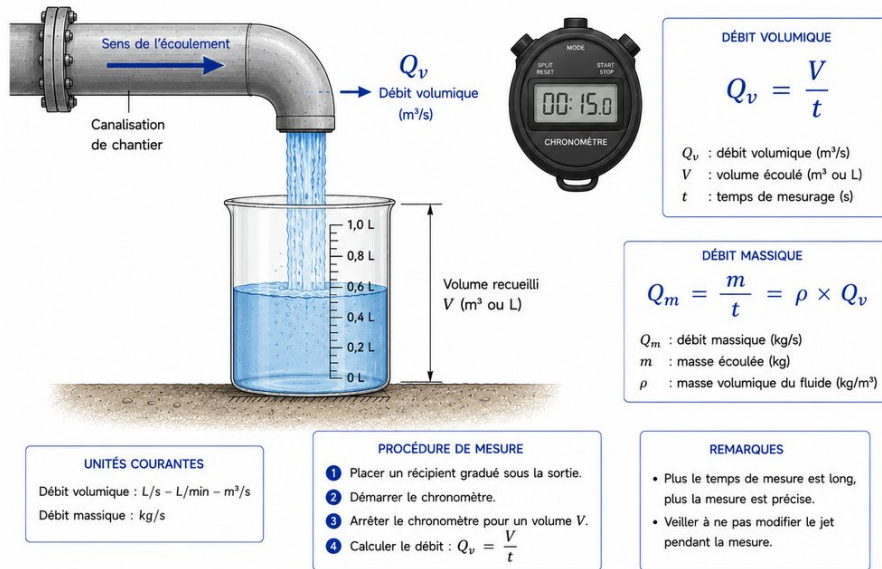


Illustration — D6 Débit massique et débit volumique

EXERCICE D'APPLICATION

Une pompe de chantier refoule $V = 3600 \text{ L}$ d'eau en $t = 6 \text{ min}$.

Calculer le débit volumique Q_v (en m^3/s) et le débit massique Q_m correspondant.

Votre résolution (au crayon)

D7 Conservation du débit

1. Contexte

Un changement de diamètre de canalisation (raccord, réduction) fait varier la vitesse d'écoulement : ce point conditionne notamment l'auto-curage des réseaux d'assainissement (vitesse minimale requise pour éviter les dépôts).

2. Définitions et méthode

Pour un fluide incompressible en écoulement permanent dans une conduite, le débit volumique se conserve d'une section à l'autre (équation de continuité) :

$$Q_v = S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — variation de vitesse à un changement de diamètre

Une canalisation de diamètre $D_1 = 200 \text{ mm}$ ($S_1 = \pi \cdot D_1^2 / 4 = 0,0314 \text{ m}^2$) se raccorde à une conduite de diamètre $D_2 = 125 \text{ mm}$ ($S_2 = \pi \cdot D_2^2 / 4 = 0,01227 \text{ m}^2$).

Vitesse dans la grande conduite : $v_1 = 0,80 \text{ m/s}$. Débit : $Q_v = S_1 \times v_1 = 0,0314 \times 0,80 \approx 0,0251 \text{ m}^3/\text{s}$

Vitesse dans la petite conduite : $v_2 = Q_v / S_2 = 0,0251 / 0,01227 \approx 2,05 \text{ m/s}$

La réduction de section multiplie la vitesse par plus de 2,5 : un point de vigilance pour les pertes de charge (voir D11) et l'usure des canalisations.

À retenir

- $Q_v = S \times v = \text{constante}$ le long d'une conduite sans dérivation : une réduction de section augmente la vitesse.

D7 – Conservation du débit

Écoulement d'un fluide incompressible dans une canalisation rétrécie

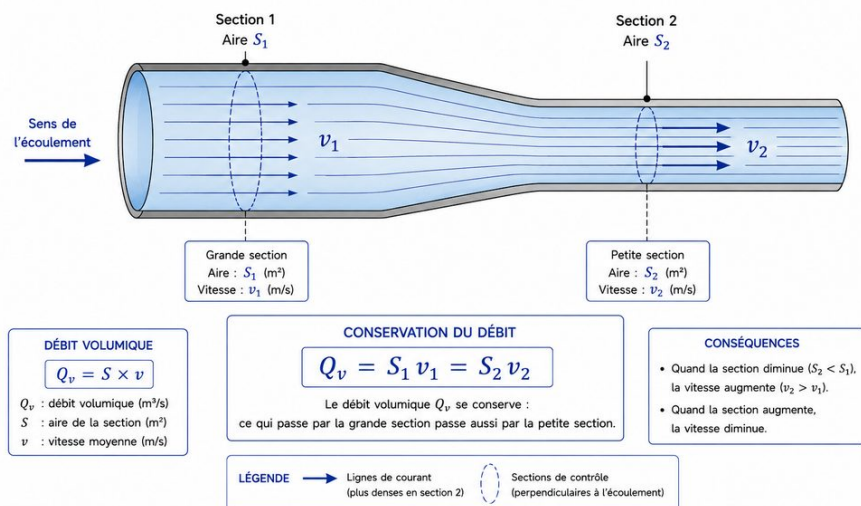


Illustration — D7 Conservation du débit

EXERCICE D'APPLICATION

Une conduite de diamètre $D1 = 160$ mm transporte de l'eau à $v1 = 1,0$ m/s. Elle se raccorde à une conduite de diamètre $D2 = 100$ mm.

Calculer la vitesse $v2$ dans la petite conduite.

Votre résolution (au crayon)

D8 Conservation de l'énergie, relation de Bernoulli

1. Contexte

Le dimensionnement d'un réseau d'adduction d'eau gravitaire, d'une vidange ou d'un siphon de chantier s'appuie sur la relation de Bernoulli, qui traduit la conservation de l'énergie le long d'un écoulement.

2. Définitions et méthode

Pour un fluide parfait incompressible en écoulement permanent, le long d'une ligne de courant (relation fournie à l'étudiant) :

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$$

avec p la pression, v la vitesse, z l'altitude du point considéré et ρ la masse volumique du fluide.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — vitesse de sortie d'une conduite gravitaire (formule de Torricelli)

Une conduite relie un réservoir à surface libre (point A, vitesse quasi nulle $v_A \approx 0$, altitude $z_A = 50$ m, pression atmosphérique) à une sortie au sol (point B, altitude $z_B = 0$, pression atmosphérique également).

Bernoulli entre A et B (pression identique de part et d'autre, simplification) : $\rho \cdot g \cdot z_A = \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$

D'où : $v_B = \sqrt{(2 \cdot g \cdot (z_A - z_B))} = \sqrt{(2 \times 9,81 \times 50)} = \sqrt{981} \approx 31,3$ m/s

Ce cas particulier (formule de Torricelli) illustre comment une dénivelée se convertit en vitesse d'écoulement — utile pour dimensionner une vidange ou une évacuation gravitaire.

À retenir

- La relation de Bernoulli traduit un échange entre pression, énergie cinétique et énergie potentielle de pesanteur, à énergie totale constante.
- Elle est toujours fournie à l'étudiant : l'enjeu est de bien identifier les deux points d'étude et leurs grandeurs connues/inconnues.

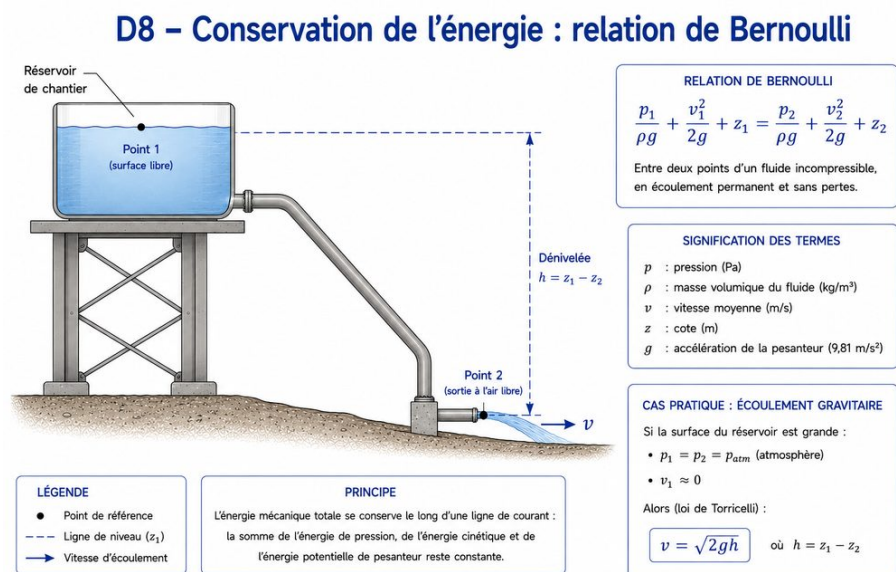


Illustration — D8 Conservation de l'énergie, relation de Bernoulli

EXERCICE D'APPLICATION

Un réservoir de chantier alimente gravitairement une conduite dont la sortie se trouve $h = 15$ m plus bas que la surface libre. On néglige les pertes de charge et on suppose la vitesse nulle en surface.

Calculer la vitesse théorique de sortie de l'eau.

Votre résolution (au crayon)

D9 Viscosité

1. Contexte

La viscosité d'un coulis d'injection, d'un béton auto-plaçant ou d'un liant bitumineux conditionne directement sa facilité de mise en œuvre sur chantier.

2. Définitions et méthode

La viscosité dynamique η (unité : Pa·s) caractérise la résistance interne d'un fluide à l'écoulement, due aux frottements entre couches de fluide en mouvement relatif. Plus η est élevé, plus l'écoulement est ralenti pour une même différence de pression motrice, et plus les pertes de charge sont importantes (voir D11).

Méthode : citer les conséquences principales du phénomène de viscosité dans les écoulements ; mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à mesurer la viscosité d'un fluide (par exemple viscosimètre à chute de bille, loi de Stokes fournie).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — mesure de la viscosité d'un coulis d'injection

Protocole (viscosimètre à chute de bille) : on mesure le temps de chute d'une bille calibrée sur une hauteur connue dans le coulis à caractériser, placé dans une éprouvette verticale.

À l'aide de la loi de Stokes (relation fournie, reliant vitesse limite de chute, diamètre de la bille, masses volumiques de la bille et du fluide, et viscosité), on détermine η .

Un coulis trop visqueux sera difficile à injecter dans un sol fin ; un coulis trop fluide risque de migrer hors de la zone à traiter : la mesure de viscosité guide le dosage en eau et en adjuvants.

À retenir

- La viscosité traduit les frottements internes d'un fluide en écoulement : elle augmente les pertes de charge.
- Elle se mesure expérimentalement (chute de bille, viscosimètre rotatif) et conditionne le choix des paramètres de mise en œuvre (coulis, bitume, béton).

D9 – Viscosité

Viscosimètre à chute de bille – Essai sur coulis d'injection

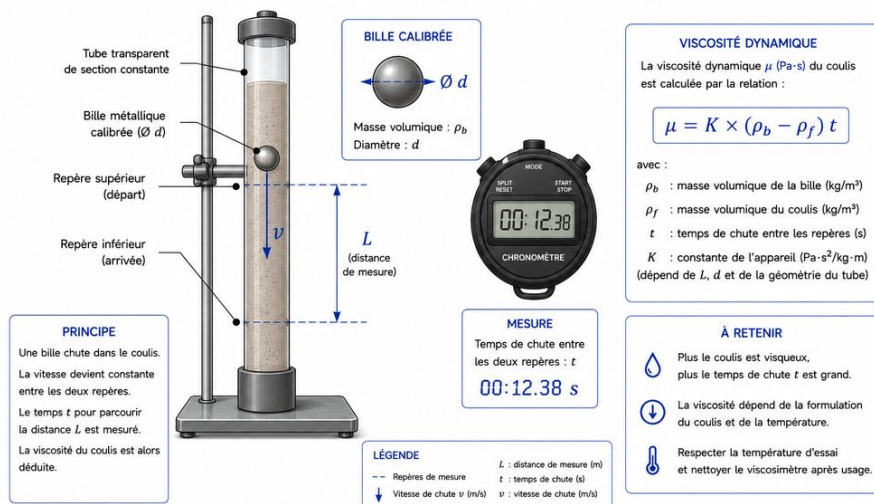


Illustration — D9 Viscosité

EXERCICE D'APPLICATION

Expliquer pourquoi, à débit imposé constant, un coulis d'injection très visqueux nécessite une pression de pompage plus élevée qu'un coulis peu visqueux dans le même circuit. Citer une méthode expérimentale de mesure de viscosité.

Votre résolution (au crayon)

D10 Nombre de Reynolds. Régimes laminaire et turbulent

1. Contexte

Le régime d'écoulement dans une canalisation d'assainissement ou d'adduction conditionne les pertes de charge et le risque de dépôt de matières en suspension.

2. Définitions et méthode

Le nombre de Reynolds (grandeur sans dimension, expression fournie) permet d'identifier le régime d'écoulement :

$$Re = \rho \times v \times D / \eta$$

- Re faible (typiquement < 2000) : régime laminaire — écoulement ordonné, en couches parallèles.
- Re élevé (typiquement > 4000) : régime turbulent — écoulement désordonné, tourbillonnaire.
- Entre les deux : régime transitoire.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — régime d'écoulement dans une canalisation d'assainissement

Eau ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 1,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) circulant dans une canalisation de diamètre $D = 200 \text{ mm} = 0,20 \text{ m}$ à la vitesse $v = 1,5 \text{ m/s}$.

$$Re = \rho \times v \times D / \eta = (1000 \times 1,5 \times 0,20) / (1,0 \times 10^{-3}) = 300 / 0,001 = 300\,000$$

Re est très largement supérieur à 4000 : l'écoulement est turbulent — comme la quasi-totalité des écoulements réels en réseau d'assainissement ou d'adduction d'eau.

À retenir

- $Re < 2000$: laminaire ; $Re > 4000$: turbulent (expression de Re toujours fournie).
- Les écoulements d'eau dans les réseaux de travaux publics sont très majoritairement turbulents.

D10 – Nombre de Reynolds. Régimes laminaire et turbulent

Écoulement d'un fluide dans une conduite circulaire droite

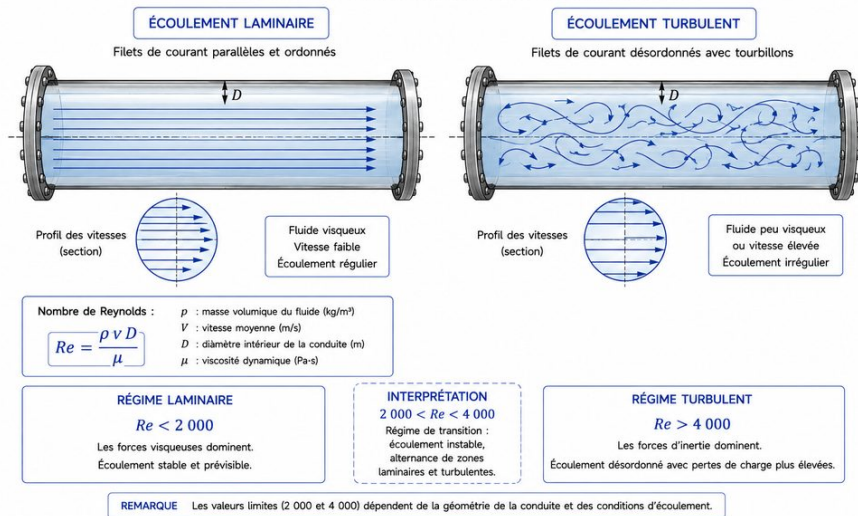


Illustration — D10 Nombre de Reynolds. Régimes laminaire et turbulent

EXERCICE D'APPLICATION

De l'eau ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 1,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) circule dans une conduite de diamètre $D = 100 \text{ mm}$ à $v = 0,5 \text{ m/s}$.

Calculer le nombre de Reynolds et en déduire le régime d'écoulement.

Votre résolution (au crayon)

D11 Perte de charge en régime laminaire

1. Contexte

Dimensionner une pompe de relevage ou vérifier la capacité hydraulique d'un réseau (adduction, injection de coulis) nécessite de quantifier les pertes de charge le long du circuit.

2. Définitions et méthode

- Perte de charge régulière : diminution progressive de la pression motrice le long d'une conduite rectiligne, due à la viscosité du fluide et à la rugosité de la paroi.
- Perte de charge singulière : diminution localisée de pression, due à un accident de forme du circuit (coude, vanne, rétrécissement, raccord, té).

En régime laminaire, la perte de charge régulière Δp le long d'une conduite cylindrique de longueur L et de diamètre D , pour un débit Q_v , est donnée par une formule fournie (loi de Poiseuille) :

$$\Delta p = (128 \times \eta \times L \times Q_v) / (\pi \times D^4)$$

3. Exemple d'application

Exemple d'application — perte de charge dans un tube d'injection de coulis

Coulis d'injection de viscosité $\eta = 0,05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, circulant dans un tuyau de longueur $L = 10 \text{ m}$ et de diamètre $D = 20 \text{ mm} = 0,020 \text{ m}$, avec un débit $Q_v = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 3 \text{ L/min}$).

$$\Delta p = (128 \times 0,05 \times 10 \times 5 \times 10^{-5}) / (\pi \times 0,020^4) = 0,0032 / (\pi \times 1,6 \times 10^{-7}) \approx 0,0032 / 5,03 \times 10^{-7} \approx 6366 \text{ Pa} \approx 6,4 \text{ kPa}$$

Cette perte de charge doit être compensée par la pompe d'injection : elle augmente rapidement si le diamètre du tuyau diminue (dépendance en D^4) ou si la longueur ou la viscosité augmentent.

À retenir

- Deux familles de pertes de charge à distinguer : régulières (le long de la conduite) et singulières (accidents de forme).
- En régime laminaire, la perte de charge est très sensible au diamètre (en $1/D^4$) : un tuyau plus étroit augmente très fortement la perte de charge à débit constant.

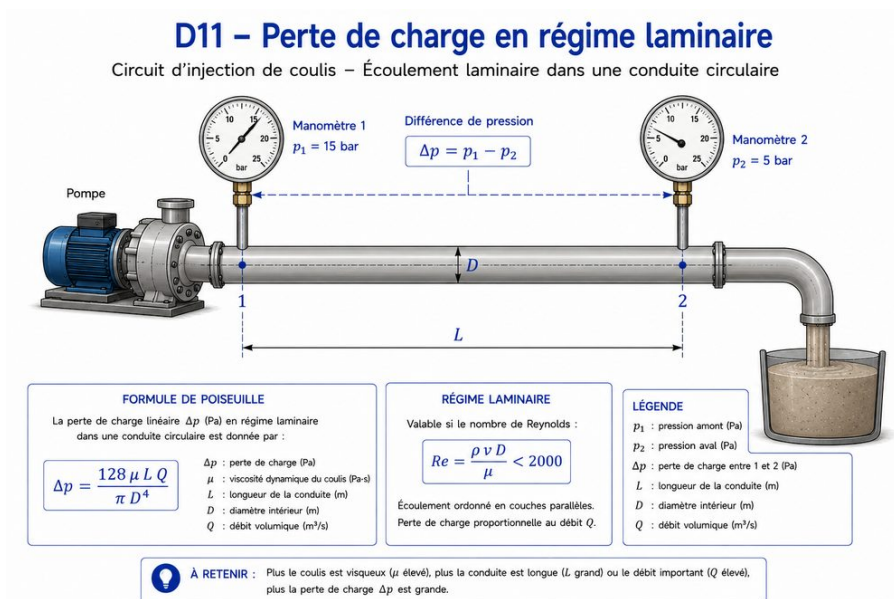


Illustration — D11 Perte de charge en régime laminaire

EXERCICE D'APPLICATION

Un coulis d'injection ($\eta = 0,08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) circule dans un tube de longueur $L = 15 \text{ m}$, diamètre $D = 25 \text{ mm}$, débit $Q_v = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Calculer la perte de charge Δp (loi de Poiseuille : $\Delta p = 128 \times \eta \times L \times Q_v / (\pi \times D^4)$).

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE D**Evaluation — Mécanique des fluides**

11 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. La relation entre pression p , force pressante F et surface S est...

- A. $p = F \times S$
- B. $p = F / S$
- C. $p = S / F$
- D. $p = F + S$

2. La pression hydrostatique au fond d'un liquide dépend principalement...

- A. De la forme du récipient
- B. De la hauteur de fluide au-dessus du point considéré ($p = \rho gh$)
- C. De la couleur du fluide
- D. De la masse totale du récipient

3. Le théorème de Pascal permet d'expliquer le fonctionnement...

- A. D'un thermomètre
- B. D'un vérin hydraulique
- C. D'un haut-parleur

- D. D'un anémomètre

4. La poussée d'Archimède $F_A = \rho_{\text{fluide}} \times V_{\text{immergé}} \times g$ dépend du volume...

- A. Total de l'objet, immergé ou non
- B. Réellement immergé de l'objet
- C. D'air ambiant autour de l'objet
- D. Cela dépend uniquement de la masse de l'objet

5. La remontée d'eau par capillarité dans un matériau poreux résulte de...

- A. La gravité seule
- B. La tension superficielle et le phénomène de mouillage
- C. La pression atmosphérique uniquement
- D. La température du matériau uniquement

6. Le débit massique Q_m se relie au débit volumique Q_v par...

- A. $Q_m = Q_v / \rho$
- B. $Q_m = \rho \times Q_v$
- C. $Q_m = \rho + Q_v$
- D. $Q_m = Q_v$ (identiques)

7. La conservation du débit dans une conduite sans dérivation implique que...

- A. Le produit $S \times v$ est constant le long de la conduite
- B. La vitesse v est constante partout
- C. La section S est toujours constante
- D. Le débit Q diminue avec la distance parcourue

8. La relation de Bernoulli traduit la conservation...

- A. De la masse uniquement
- B. De l'énergie totale (pression, cinétique, potentielle de pesanteur)
- C. De la température du fluide
- D. De la viscosité du fluide

9. La viscosité d'un fluide traduit...

- A. Sa couleur
- B. Les frottements internes lors de l'écoulement
- C. Sa masse volumique
- D. Sa température d'ébullition

10. Un régime d'écoulement est considéré comme turbulent lorsque le nombre de Reynolds Re est...

- A. Inférieur à 2000
- B. Supérieur à 4000
- C. Égal à 0
- D. Négatif

11. En régime laminaire, la perte de charge Δp est particulièrement sensible à...

- A. La couleur du fluide
- B. L'inverse du diamètre à la puissance 4 ($\Delta p \propto 1/D^4$)
- C. La température ambiante uniquement
- D. La pression atmosphérique

DOMAINE E Thermique

Pourquoi ce chapitre ?

Rails de chemin de fer, joints de chaussée, tabliers de pont, canalisations : tous les ouvrages linéaires de travaux publics subissent d'importantes variations de température qui les font se dilater ou se contracter, et qu'il faut savoir quantifier pour dimensionner les joints de dilatation. La thermique intervient aussi dans la protection hivernale des bétons frais et dans le comportement mécanique des matériaux avec la température. Ce chapitre construit les outils nécessaires : dilatation thermique, modes de transfert de chaleur, et calcul d'un flux thermique à travers une paroi.

E1 Propriétés thermoélastiques des matériaux

1. Contexte

Un rail de chemin de fer, un tablier de pont ou une canalisation s'allongent l'été et se rétractent l'hiver : sans dispositif de compensation (joint de dilatation, rail soudé en continu avec contraintes contrôlées), ces variations dimensionnelles peuvent générer des contraintes mécaniques considérables et endommager l'ouvrage.

2. Définitions et méthode

Principaux types de thermomètres et leur principe :

- Thermomètre à dilatation de liquide (mercure, alcool coloré) : mesure directe d'une dilatation volumique de liquide dans un tube capillaire gradué.
- Thermocouple : génère une tension électrique (effet Seebeck) proportionnelle à la différence de température entre deux jonctions de métaux différents.
- Sonde à résistance (Pt100, thermistance) : la résistance électrique du capteur varie avec la température.
- Pyromètre infrarouge : mesure sans contact, à partir du rayonnement thermique émis par la surface visée (voir aussi B/E — rayonnement, notion E2).

Dilatation linéaire d'un matériau soumis à une variation de température ΔT , caractérisée par le coefficient de dilatation linéaire α (en K^{-1} ou $^{\circ}C^{-1}$) :

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T$$

où L_0 est la longueur initiale. Par extension (approximation isotrope), le coefficient de dilatation surfacique vaut environ 2α et le coefficient de dilatation volumique environ 3α .

Méthode : mesurer des températures à l'aide d'un capteur judicieusement choisi ; estimer des dilatations linéaire, surfacique ou volumique ; déterminer expérimentalement un coefficient de dilatation d'un matériau (banc de dilatométrie).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — dilatation d'un rail de chemin de fer

Un rail d'acier (coefficient de dilatation linéaire $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) de longueur $L_0 = 18 \text{ m}$ est posé un jour d'hiver à $T_1 = -10^\circ \text{C}$.

On veut estimer son allongement lors d'une journée d'été à $T_2 = 40^\circ \text{C}$: $\Delta T = 40 - (-10) = 50^\circ \text{C} (= 50 \text{ K})$

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 18 \times 50 = 0,0108 \text{ m} = 10,8 \text{ mm}$$

Un allongement de près de 11 mm sur un seul rail de 18 m justifie la nécessité de joints de dilatation ou d'un rail soudé en continu avec des contraintes thermiques maîtrisées (rail neutralisé à pose).

À retenir

- $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$ est la relation clé ; retenir aussi les coefficients approchés 2α (surface) et 3α (volume).
- Le choix du capteur de température (contact ou sans contact) dépend du contexte de mesure (accessibilité, gamme de température, précision recherchée).

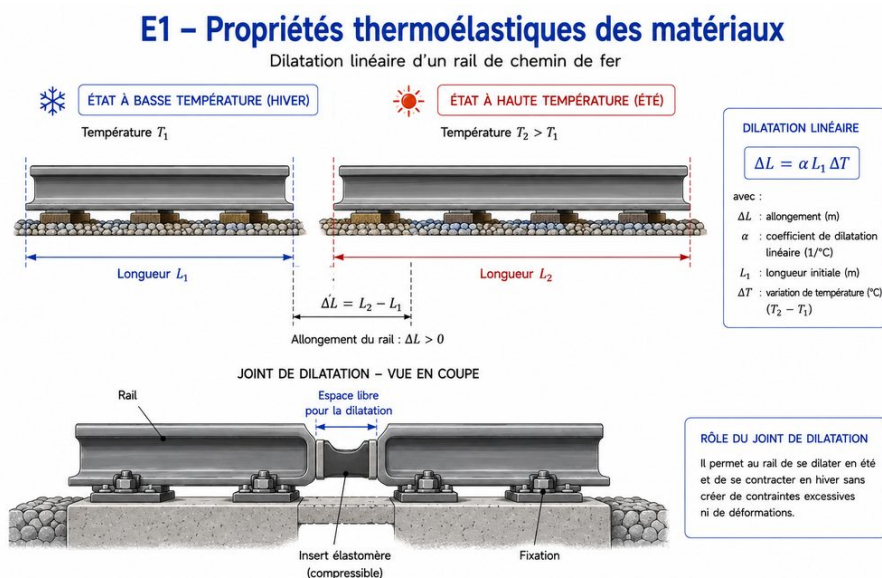


Illustration — E1 Propriétés thermoélastiques des matériaux

EXERCICE D'APPLICATION

Un tablier de pont métallique ($\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a une longueur $L_0 = 45 \text{ m}$ à $T_1 = 5 \text{ °C}$.

Calculer son allongement lorsque la température atteint $T_2 = 35 \text{ °C}$ en été.

Votre résolution (au crayon)

E2 Modes de transfert thermique

1. Contexte

Comprendre comment la chaleur se propage — à travers un mur, entre l'air et une paroi, ou depuis le soleil vers une chaussée — est indispensable pour raisonner sur l'isolation thermique, l'échauffement du béton lors de sa prise, ou le comportement d'un ouvrage exposé au rayonnement solaire.

2. Définitions et méthode

- Conduction : transfert de chaleur au sein d'un milieu matériel (le plus souvent solide), sans déplacement macroscopique de matière, de proche en proche par agitation des atomes/électrons. Exemple : la chaleur traverse l'épaisseur d'une dalle de béton.
- Convection : transfert de chaleur par déplacement macroscopique de matière dans un fluide (liquide ou gaz) ; convection naturelle (mouvement dû aux différences de masse volumique liées à la température) ou forcée (pompe, ventilateur, vent). Exemple : refroidissement d'une surface de béton par le vent.
- Rayonnement : transfert de chaleur par ondes électromagnétiques, sans nécessiter de support matériel (peut traverser le vide). Exemple : échauffement d'une chaussée sombre exposée au soleil ; mesure d'une température par pyromètre infrarouge (voir E1).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — les trois modes de transfert sur une dalle de béton en plein soleil

Une dalle de béton fraîchement coulée est exposée en plein soleil, par une journée sans vent puis venteuse.

Rayonnement : la dalle reçoit de l'énergie du soleil sous forme de rayonnement, qui chauffe sa surface.

Conduction : cette chaleur se propage ensuite de proche en proche à travers l'épaisseur de la dalle, de la surface vers les couches plus profondes.

Convection : la surface de la dalle échange de la chaleur avec l'air ambiant — convection naturelle par temps calme (mouvement d'air dû aux écarts de température), convection forcée si le site est venteux (refroidissement plus rapide de la surface).

À retenir

- Conduction = à travers la matière, sans déplacement de matière ; convection = par déplacement de matière dans un fluide ; rayonnement = par ondes électromagnétiques, sans support matériel.
- Une même situation combine généralement plusieurs modes simultanément.

E2 – Modes de transfert thermique

Dalle de béton fraîchement coulée en plein soleil

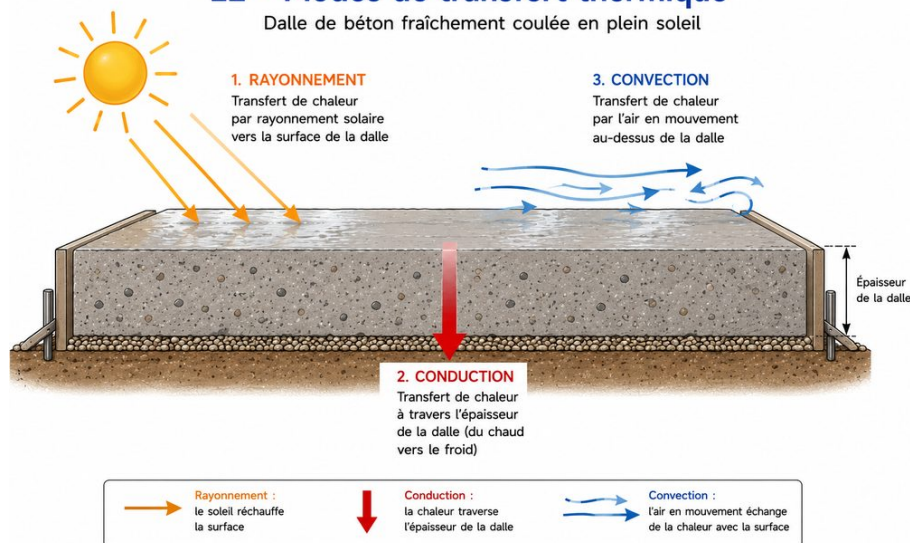


Illustration — E2 Modes de transfert thermique

EXERCICE D'APPLICATION

Une canalisation d'eau chaude enterrée traverse un sol froid.

Décrire, en identifiant le(s) mode(s) de transfert thermique en jeu, comment la chaleur se propage depuis l'eau circulant dans la canalisation jusqu'au sol environnant.

Votre résolution (au crayon)

E3 Flux thermique transféré par conduction en régime permanent. Résistance thermique

1. Contexte

Protéger un béton fraîchement coulé du gel en hiver (bâche isolante, coffrage isolant) ou évaluer les déperditions thermiques d'un local de chantier nécessite de savoir calculer un flux thermique à travers une paroi.

2. Définitions et méthode

En régime permanent, le flux thermique φ (en watts) transféré par conduction à travers une paroi plane homogène d'épaisseur e , de conductivité thermique λ (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et de surface S , entre deux faces aux températures $T1$ et $T2$, s'écrit :

$$\varphi = \lambda \times S \times (T1 - T2) / e = (T1 - T2) / R_{th}$$

où l'on définit la résistance thermique de la paroi :

$$R_{th} = e / (\lambda \times S)$$

Méthode : calculer, dans un cas simple, le flux thermique à travers une paroi homogène (résistance thermique fournie ou à calculer) ; mesurer la résistance thermique d'une paroi (dispositif expérimental).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — protection thermique d'un béton coffré en hiver

Un béton en cours d'hydratation est protégé par une bâche isolante en polystyrène expansé : épaisseur $e = 50 \text{ mm} = 0,050 \text{ m}$, conductivité thermique $\lambda = 0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, surface protégée $S = 20 \text{ m}^2$.

Température côté béton (intérieur) $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; température extérieure $T_2 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Résistance thermique de la protection : $R_{th} = e / (\lambda \times S) = 0,050 / (0,035 \times 20) = 0,050 / 0,70 \approx 0,0714 \text{ K/W}$

Flux thermique perdu à travers la protection : $\phi = (T_1 - T_2) / R_{th} = (25 - 2) / 0,0714 \approx 322 \text{ W}$

Ce calcul permet de dimensionner l'épaisseur d'isolant nécessaire pour limiter les déperditions et garantir que la température du béton reste favorable à sa prise (éviter le gel précoce, qui compromettrait sa résistance finale).

À retenir

- $\phi = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / e = \Delta T / R_{th}$, avec $R_{th} = e / (\lambda \cdot S)$: plus la résistance thermique est grande, plus le flux de déperdition est faible.
- Augmenter l'épaisseur d'isolant (e) ou choisir un matériau de plus faible conductivité (λ) réduit directement les pertes thermiques.

E3 – Flux thermique transféré par conduction en régime permanent. Résistance thermique

Paroi isolante en polystyrène protégeant un béton en cours d'hydratation

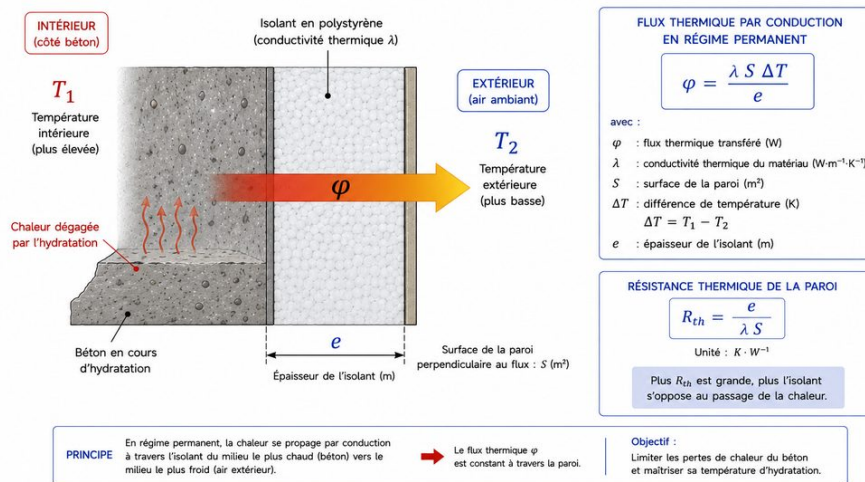


Illustration — E3 Flux thermique transféré par conduction en régime permanent. Résistance thermique

EXERCICE D'APPLICATION

Une paroi de local de chantier (panneau isolant, $e = 80 \text{ mm}$, $\lambda = 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $S = 12 \text{ m}^2$) sépare l'intérieur ($T_1 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$) de l'extérieur ($T_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Calculer la résistance thermique de la paroi et le flux thermique perdu à travers celle-ci.

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE E Evaluation — Thermique

3 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. La dilatation linéique d'un matériau, sous l'effet d'une variation de température ΔT , s'exprime par...

- A. $\Delta L = \alpha + L_0 + \Delta T$
- B. $\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T$
- C. $\Delta L = \alpha / (L_0 \times \Delta T)$
- D. $\Delta L = L_0 / (\alpha \times \Delta T)$

2. Quel mode de transfert thermique s'effectue sans support matériel, par ondes électromagnétiques ?

- A. La conduction
- B. La convection
- C. Le rayonnement
- D. La diffusion

3. La résistance thermique R_{th} d'une paroi d'épaisseur e et de conductivité λ (pour une surface S) s'exprime par...

- A. $R_{th} = \lambda \times e \times S$
- B. $R_{th} = e / (\lambda \times S)$

- C. $R_{th} = \lambda / (e \times S)$
- D. $R_{th} = S / (\lambda \times e)$

DOMAINE F

Vibrations et ondes

Pourquoi ce chapitre ?

Compacteurs, marteaux-piqueurs, résonance d'un ouvrage, auscultation sonique du béton, nuisances sonores de chantier, détection de réseaux enterrés, éclairage de chantier : les vibrations et les ondes (mécaniques, acoustiques, lumineuses) sont omniprésentes dans le métier de technicien travaux publics. Ce chapitre construit les outils pour décrire un oscillateur mécanique, caractériser une onde acoustique et l'exploiter pour le contrôle non destructif ou la protection contre le bruit, puis pour choisir et dimensionner un éclairage de chantier.

F1 Réponse d'un oscillateur mécanique à une excitation

1. Contexte

Compacteurs, engins de terrassement, marteaux-piqueurs et brise-roches sont des sources de vibrations omniprésentes sur un chantier : savoir les identifier et les situer en fréquence est la première étape avant toute analyse (compactage efficace, prévention des risques vibratoires).

2. Définitions et méthode

- Oscillateur mécanique : système capable d'effectuer un mouvement périodique (ou pseudo-périodique) autour d'une position d'équilibre, sous l'effet d'une excitation.
- Sources de vibrations en travaux publics : compacteurs à plaque ou à rouleau vibrant, engins de terrassement, marteaux-piqueurs, brise-roches, passage répété de véhicules, minage.
- Échelle de fréquence : infrasons (< 20 Hz), sons audibles (20 Hz - 20 kHz), ultrasons (> 20 kHz). Les vibrations mécaniques de chantier se situent le plus souvent entre quelques hertz et quelques centaines de hertz.

Méthode : mettre en œuvre un protocole expérimental pour enregistrer des vibrations d'un système mécanique (accéléromètre, capteur de vibration, application smartphone dédiée).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — fréquence de vibration d'un rouleau compacteur

Un rouleau vibrant de compactage fonctionne à une fréquence d'excitation $f = 30 \text{ Hz}$ (rotation d'un balourd interne au tambour).

Cette fréquence, combinée à l'amplitude du balourd, détermine l'accélération transmise au sol et donc l'efficacité du compactage de la couche de forme.

Situer cette fréquence sur l'échelle : 30 Hz appartient au domaine des sons audibles (grave), mais l'essentiel de l'énergie vibratoire transmise au corps de l'opérateur se situe dans une gamme de fréquences réglementée (risques vibratoires professionnels).

À retenir

- Identifier une source de vibration, c'est d'abord savoir la situer sur l'échelle des fréquences.
- Un capteur adapté (accéléromètre) permet d'enregistrer objectivement une vibration mécanique.

F1 – Réponse d'un oscillateur mécanique à une excitation

Rouleau compacteur vibrant sur un chantier de terrassement

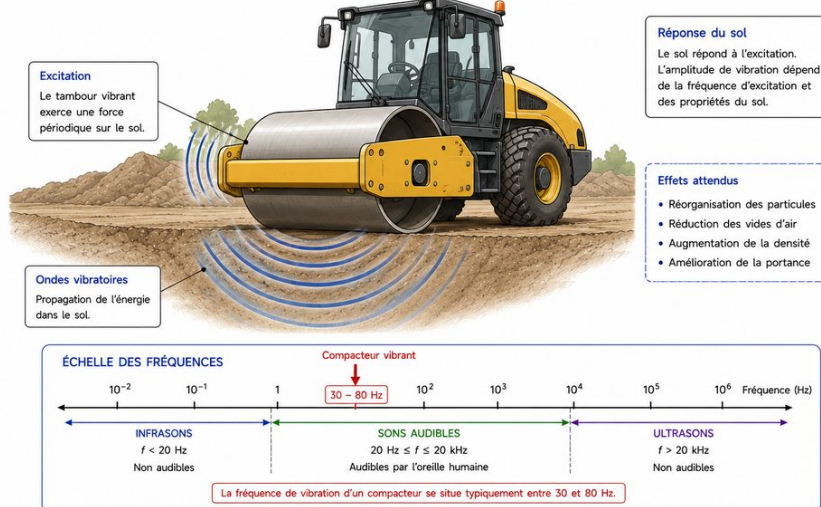


Illustration — F1 Réponse d'un oscillateur mécanique à une excitation

EXERCICE D'APPLICATION

Citer trois sources de vibrations mécaniques présentes sur un chantier de terrassement, et proposer pour chacune un ordre de grandeur de fréquence.

Votre résolution (au crayon)

F2 Oscillations libres ou forcées, amortissement

1. Contexte

Distinguer le comportement propre d'une structure (oscillation libre après un choc) de sa réponse à une excitation continue (oscillation forcée, passage répété d'engins) est indispensable pour comprendre le rôle des amortisseurs (plots antivibratiles, suspensions d'engins).

2. Définitions et méthode

- Oscillation libre : le système, écarté de sa position d'équilibre puis laissé évoluer seul (sans excitation entretenue), oscille à sa fréquence propre f_0 , caractéristique du système.
- Oscillation forcée : le système est soumis à une excitation extérieure périodique entretenue, de fréquence f imposée par l'excitateur ; en régime permanent, il oscille à la fréquence f de l'excitation, pas nécessairement à sa fréquence propre.
- Amortissement : dissipation progressive de l'énergie mécanique du système (frottements, viscosité) qui réduit l'amplitude des oscillations libres au cours du temps.
- Régime pseudopériodique : l'amortissement est modéré, l'amplitude décroît progressivement mais le système oscille encore plusieurs fois avant de s'arrêter.
- Régime apériodique : l'amortissement est trop fort, le système revient à l'équilibre sans osciller.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — réponse d'un plot antivibratile sous un compresseur

On écarte un compresseur de chantier posé sur des plots antivibratiles de sa position d'équilibre, puis on le relâche (mise en oscillation libre).

L'enregistrement de l'accélération au cours du temps montre une décroissance progressive de l'amplitude sur plusieurs oscillations avant retour au repos : c'est un régime pseudopériodique, caractéristique d'un amortisseur correctement dimensionné.

Un plot trop rigide (amortissement trop fort) donnerait un régime apériodique : retour lent à l'équilibre sans oscillation, mais transmission de chocs plus importante à la structure porteuse.

À retenir

- Libre = à sa propre fréquence f_0 ; forcée = à la fréquence f de l'excitation.
- Pseudopériodique (oscille en s'amortissant) vs apériodique (revient au repos sans osciller) : deux régimes possibles selon l'intensité de l'amortissement.

F2 – Oscillations libres ou forcées, amortissement

Plot antivibratile de compresseur

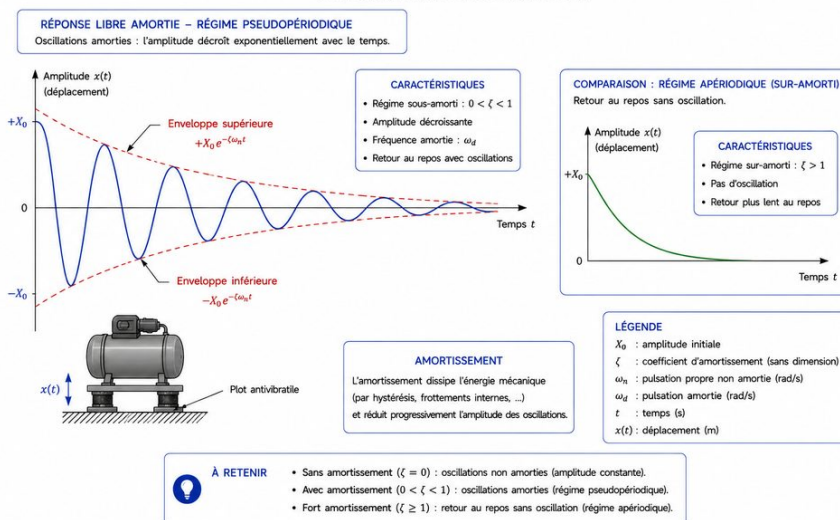


Illustration — F2 Oscillations libres ou forcées, amortissement

EXERCICE D'APPLICATION

On comprime puis relâche brutalement la suspension d'une cabine de pelle mécanique (moteur éteint). L'enregistrement montre trois oscillations d'amplitude décroissante avant stabilisation.

1) Régime libre ou forcé ? 2) Régime pseudopériodique ou apériodique ? Justifier.

Votre résolution (au crayon)

F3 Résonance mécanique

1. Contexte

La résonance peut être recherchée (efficacité du compactage par vibration) ou redoutée (résonance dangereuse d'un pont ou d'une passerelle sous l'effet du vent ou de la marche synchronisée de piétons).

2. Définitions et méthode

Résonance mécanique : phénomène par lequel l'amplitude des oscillations forcées d'un système devient maximale lorsque la fréquence d'excitation f se rapproche de la fréquence propre f_0 du système.

Méthode : mettre en œuvre un dispositif expérimental pour déterminer les conditions de la résonance mécanique ; identifier le phénomène ; citer des applications, recherchées ou nuisibles.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — résonance recherchée et résonance redoutée

Résonance recherchée : pour un compactage efficace, on règle la fréquence d'excitation du rouleau vibrant au voisinage de la fréquence propre de la couche de matériau à compacter, ce qui maximise l'amplitude de vibration transmise et donc l'efficacité du compactage.

Résonance redoutée : une passerelle piétonne peut entrer en résonance dangereuse si la fréquence des pas synchronisés d'une foule (ou de rafales de vent) se rapproche de sa fréquence propre — cas célèbre du Millennium Bridge à Londres, où une résonance latérale inattendue due à la marche synchronisée des piétons a nécessité l'ajout d'amortisseurs accordés après l'ouverture de l'ouvrage.

À retenir

- La résonance survient quand f (excitation) $\approx f_0$ (fréquence propre du système) : l'amplitude devient alors maximale.
- Un ingénieur de travaux publics doit savoir exploiter la résonance (compactage) et s'en prémunir (dimensionnement dynamique des ouvrages sensibles).

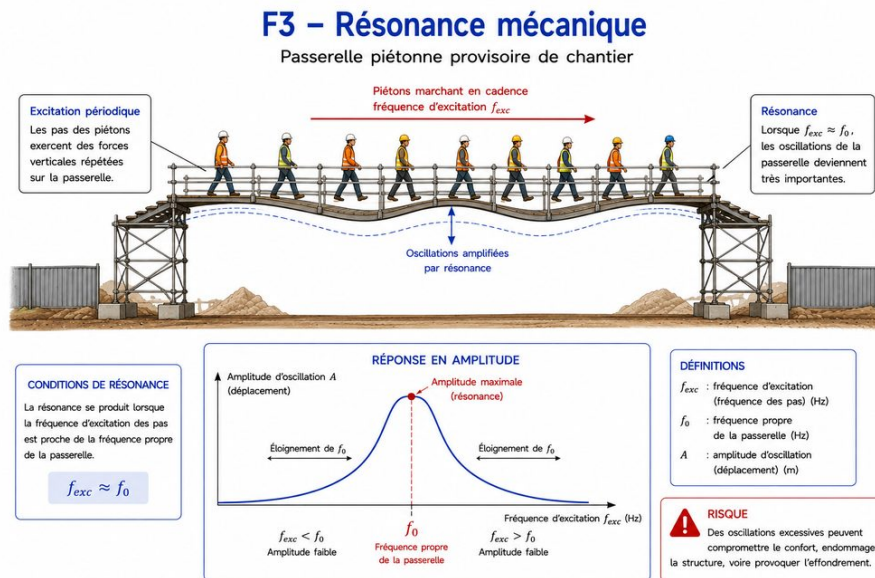


Illustration — F3 Résonance mécanique

EXERCICE D'APPLICATION

La fréquence propre d'une passerelle piétonne provisoire de chantier est estimée à $f_0 = 2,1$ Hz. Un groupe de piétons la traverse à une cadence de 2,0 pas/s.

Commenter le risque de résonance et proposer une mesure de prévention.

Votre résolution (au crayon)

F4 Onde acoustique. Pression acoustique. Célérité

2. Ondes acoustiques

1. Contexte

La propagation du son dans les matériaux est exploitée pour l'auscultation sonique du béton, la détection de réseaux enterrés, et pour évaluer les nuisances sonores d'un chantier.

2. Définitions et méthode

- Onde acoustique : propagation d'une perturbation mécanique (variation locale de pression) dans un milieu matériel élastique (solide, liquide, gaz), sans transport de matière.
- Pression acoustique : variation de pression, par rapport à la pression d'équilibre, associée au passage de l'onde.
- Célérité c : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu ; elle dépend de la nature du milieu (rigidité, compressibilité, masse volumique) et, pour un gaz, de la température.

Ordres de grandeur de la célérité du son à connaître :

- Air (20 °C) : $c \approx 340$ m/s
- Eau : $c \approx 1500$ m/s
- Béton : $c \approx 3500$ à 4500 m/s (selon compacité)
- Acier : $c \approx 5000$ à 5900 m/s

3. Exemple d'application

Exemple d'application — principe de l'auscultation sonique du béton

La célérité du son dans un béton sain (≈ 4000 m/s) est environ douze fois supérieure à celle dans l'air (340 m/s).

Principe de l'auscultation sonique : on mesure le temps de propagation d'une impulsion sonique entre deux points d'un élément en béton. En présence d'un vide, d'une fissure ou d'un défaut de compacité, l'onde doit contourner l'obstacle : le temps de trajet mesuré augmente localement, ce qui permet de détecter et localiser le défaut sans démolir l'ouvrage (contrôle non destructif).

À retenir

- La célérité du son dépend du milieu : très supérieure dans les solides denses (béton, acier) par rapport à l'air.
- Un allongement local du temps de trajet d'une onde sonique signale un défaut interne (auscultation sonique).

F4 – Onde acoustique. Pression acoustique. Célérité

Auscultation d'un pieu en béton par méthode sonique

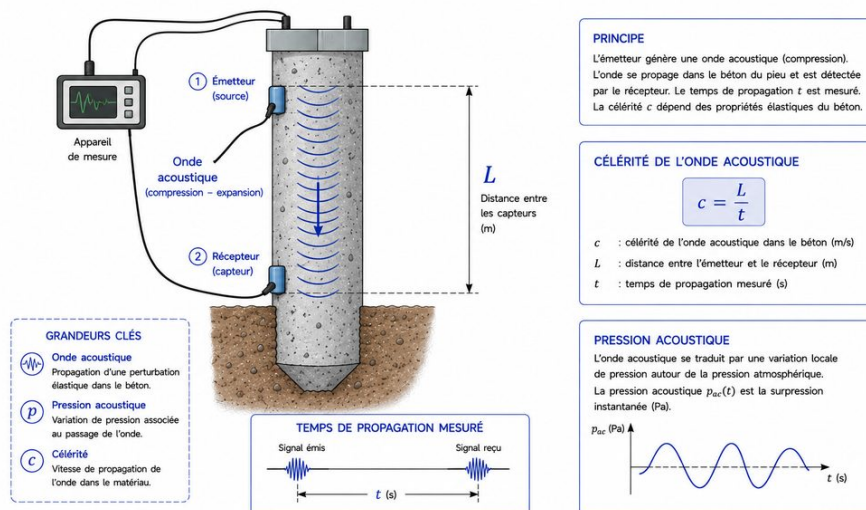


Illustration — F4 Onde acoustique. Pression acoustique. Célérité

EXERCICE D'APPLICATION

Pour ausculter un pieu en béton par méthode sonique, on mesure un temps de propagation $t = 3,5$ ms entre deux capteurs distants de $L = 14$ m.

Calculer la célérité de l'onde et comparer à la valeur usuelle pour un béton sain (≈ 4000 m/s). Conclure.

Votre résolution (au crayon)

F5 Son pur. Fréquence, période, amplitude. Longueur d'onde

1. Contexte

Caractériser précisément un signal acoustique (fréquence, longueur d'onde) est indispensable pour choisir la résolution d'un appareil de contrôle non destructif par ultrasons.

2. Définitions et méthode

- Son pur : onde acoustique sinusoïdale, caractérisée par une fréquence unique f (Hz), une période $T = 1/f$ (s) et une amplitude.
- Domaine des sons audibles : 20 Hz à 20 kHz. Ultrasons : $f > 20$ kHz — pénètrent bien la matière avec une faible longueur d'onde, donc une meilleure résolution de détection, d'où leur usage en auscultation et contrôle non destructif.

Relation entre célérité, longueur d'onde et fréquence d'une onde progressive sinusoïdale :

$$c = \lambda \times f \text{ soit } \lambda = c / f$$

Méthode : mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de visualiser le signal de pression acoustique et de mesurer la célérité de l'onde (émetteur-récepteur, oscilloscope, mesure du temps de vol entre deux capteurs distants d'une longueur connue).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — longueur d'onde d'un appareil d'auscultation sonique

Un appareil de contrôle par ultrasons du béton fonctionne à $f = 54$ kHz ; célérité mesurée dans le béton : $c = 4000$ m/s.

Longueur d'onde : $\lambda = c / f = 4000 / 54\,000 \approx 0,074$ m = 74 mm

Cette longueur d'onde fixe, en pratique, l'ordre de grandeur de la taille minimale des défauts détectables : plus f est élevée, plus λ est petite et plus la résolution de détection est fine (mais la portée dans le matériau diminue).

À retenir

- $c = \lambda \times f$ est la relation à mobiliser systématiquement pour relier fréquence, longueur d'onde et milieu de propagation.
- Augmenter la fréquence améliore la résolution de détection mais réduit la portée de l'onde dans le matériau.

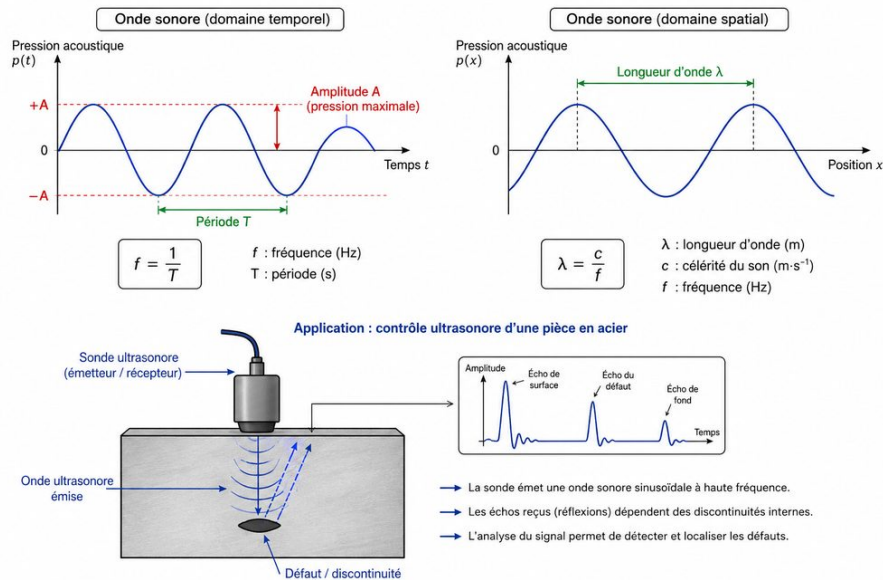


Illustration — F5 Son pur. Fréquence, période, amplitude. Longueur d'onde

EXERCICE D'APPLICATION

Un appareil de contrôle par ultrasons fonctionne à $f = 50 \text{ kHz}$. Célérité du son dans l'acier : $c \approx 5900 \text{ m/s}$.

Calculer la longueur d'onde de l'onde ultrasonore dans l'acier.

Votre résolution (au crayon)

F6 Son complexe, bruit

1. Contexte

Les bruits de chantier (engins, compresseurs) sont rarement des sons purs : leur analyse spectrale permet d'identifier leur origine et de cibler efficacement les actions de réduction du bruit.

2. Définitions et méthode

- Son complexe : superposition de plusieurs sons purs de fréquences différentes (harmoniques ou non).
- Spectre : représentation de l'amplitude (ou de l'intensité) d'un signal en fonction de la fréquence ; obtenu automatiquement par un sonomètre ou un analyseur de spectre.
- Bruit : son complexe dont le spectre est riche ou continu, sans structure harmonique nette, généralement perçu comme gênant.

Méthode : enregistrer et exploiter le spectre d'une onde sonore (capacité expérimentale, à l'aide d'un analyseur de spectre ou d'un logiciel dédié).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — analyse spectrale du bruit d'un compresseur de chantier

L'enregistrement du bruit d'un compresseur avec un analyseur de spectre révèle un pic marqué à 50 Hz (fréquence du moteur électrique), avec des composantes à ses harmoniques (100 Hz, 150 Hz...), superposées à un bruit de fond plus large lié aux frottements mécaniques et à l'écoulement d'air.

Cette analyse permet d'identifier la source dominante du bruit (ici le moteur) et de cibler l'action corrective la plus efficace : capotage acoustique, isolation du moteur, plutôt qu'une action générique sur l'ensemble de la machine.

À retenir

- Un spectre révèle la « signature » d'une source de bruit et guide le diagnostic et la correction.
- Un pic net dans le spectre pointe vers une cause mécanique identifiable (rotation, frottement, choc périodique).

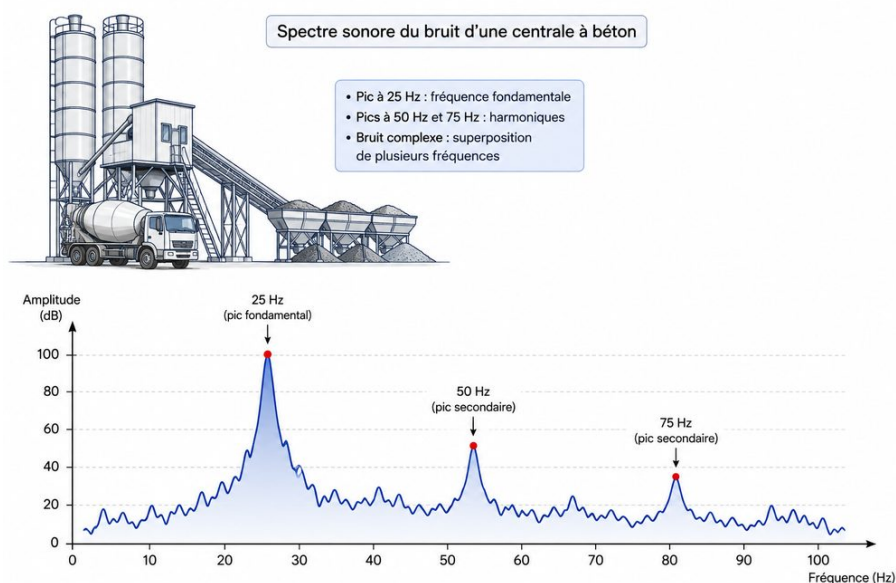


Illustration — F6 Son complexe, bruit

EXERCICE D'APPLICATION

Le spectre du bruit d'une centrale à béton présente un pic marqué à 25 Hz et des pics secondaires à 50 Hz et 75 Hz.

Proposer une interprétation de ce spectre et une piste d'action pour réduire le bruit à la source.

Votre résolution (au crayon)

F7 Intensité d'une onde acoustique et niveau sonore

1. Contexte

Quantifier objectivement le niveau sonore perçu sur un chantier est indispensable pour respecter la réglementation et protéger les travailleurs et les riverains.

2. Définitions et méthode

Le niveau sonore L (en décibels, dB) est relié à l'intensité acoustique I (en W/m^2) par la relation fournie :

$$L = 10 \times \log(I / I_0) \text{ avec } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \text{ (seuil d'audibilité)}$$

Superposition de sources incohérentes : ce sont les intensités qui s'additionnent, pas directement les niveaux en décibels. On calcule donc l'intensité totale, puis on en déduit le niveau sonore résultant.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — niveau sonore de deux compresseurs identiques en fonctionnement simultané

Chaque compresseur produit seul un niveau sonore $L_1 = L_2 = 80 \text{ dB}$ au point considéré.

Intensité correspondante : $I_1 = I_0 \times 10^{(L_1/10)} = 10^{-12} \times 10^8 = 10^{-4} \text{ W/m}^2$ (idem pour I_2 , sources identiques).

Intensité totale (sources incohérentes) : $I_{\text{total}} = I_1 + I_2 = 2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$

Niveau sonore résultant : $L_{\text{total}} = 10 \times \log(2 \times 10^{-4} / 10^{-12}) = 10 \times \log(2 \times 10^8) \approx 10 \times 8,301 \approx 83,01 \text{ dB}$

Point pédagogique important : doubler le nombre de sources identiques n'ajoute qu'environ 3 dB (et non pas le double du niveau) — l'échelle des décibels est logarithmique, non linéaire.

À retenir

- Les intensités s'additionnent, jamais directement les niveaux en dB.
- Doubler le nombre de sources sonores identiques n'augmente le niveau que d'environ 3 dB : réflexe à avoir pour interpréter correctement une mesure de bruit de chantier.

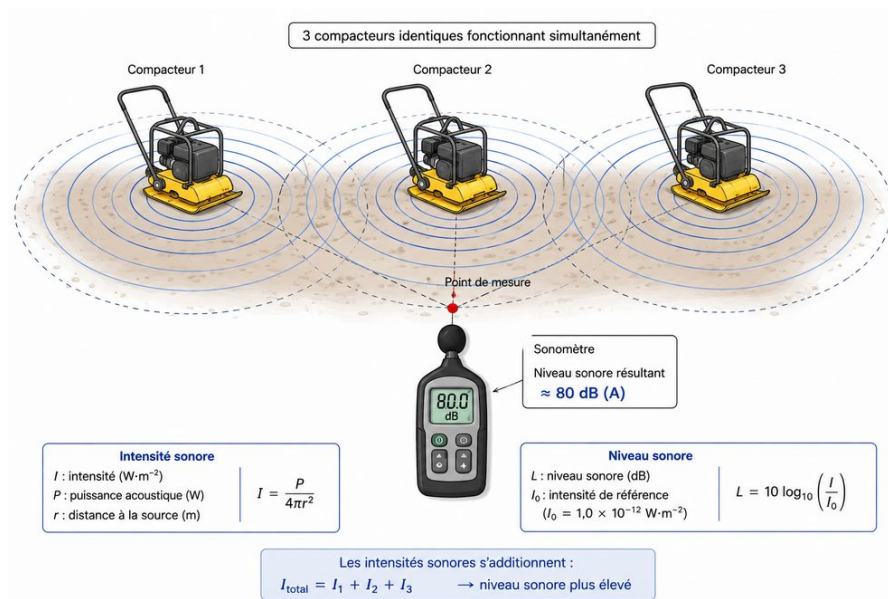


Illustration — F7 Intensité d'une onde acoustique et niveau sonore

EXERCICE D'APPLICATION

Trois compresseurs identiques, produisant chacun seul un niveau sonore de 75 dB au même point, fonctionnent simultanément.

Calculer le niveau sonore résultant.

Votre résolution (au crayon)

F8 Réflexion, transmission, absorption d'une onde acoustique

1. Contexte

Ces trois phénomènes sont au cœur du fonctionnement des murs anti-bruit routiers et du principe de l'auscultation sonique par réflexion (détection de défauts).

2. Définitions et méthode

Lorsqu'une onde acoustique rencontre une interface entre deux milieux différents :

- une partie de l'énergie est réfléchiée (renvoyée dans le milieu incident) ;
- une partie est transmise (poursuit sa propagation dans le second milieu) ;
- une partie est absorbée (convertie en une autre forme d'énergie, généralement de la chaleur, par le matériau traversé).

Méthode : extraire et exploiter des informations sur ces phénomènes ; mettre en évidence expérimentalement la réflexion, la transmission ou l'absorption (par exemple à l'aide d'un émetteur-récepteur acoustique et de différents écrans matériaux).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — principe d'un mur anti-bruit routier

Un panneau anti-bruit associe souvent deux fonctions : une face absorbante (matériau poreux) côté route, qui limite la réflexion du bruit vers la chaussée (évite d'amplifier le niveau sonore perçu par les autres usagers) ; et une masse importante (béton, matériau dense), qui limite la transmission du bruit vers le côté protégé (riverains).

L'efficacité globale du dispositif dépend du bon équilibre entre absorption (face route) et isolation par masse (limitation de la transmission).

À retenir

- Réflexion + transmission + absorption se partagent l'énergie incidente d'une onde à une interface.
- Un écran acoustique efficace combine généralement absorption et forte masse (limitation de la transmission).

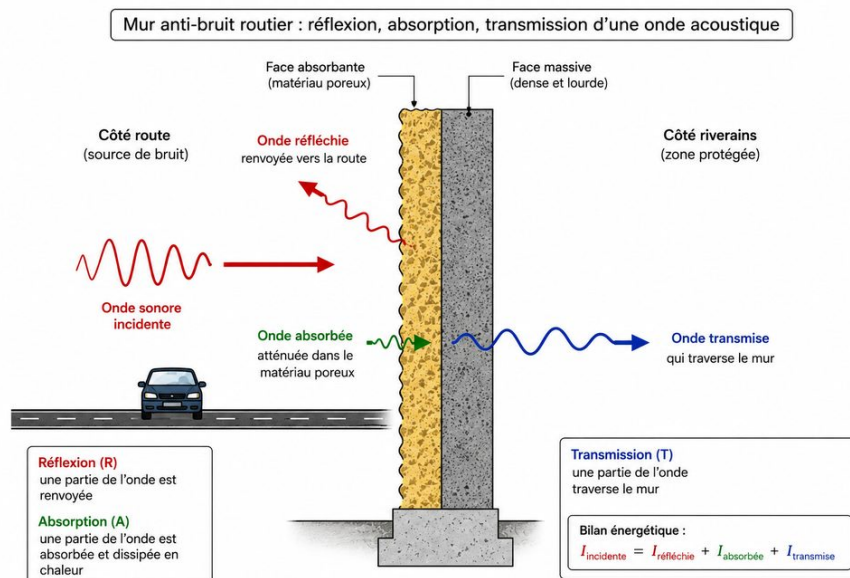


Illustration — F8 Réflexion, transmission, absorption d'une onde acoustique

EXERCICE D'APPLICATION

Un mur anti-bruit routier a un panneau absorbant côté route et une masse dense côté riverains.

Expliquer ce qui se passerait si l'on inversait l'orientation du panneau (masse côté route, absorbant côté riverains).

Votre résolution (au crayon)

F9 Perception sonore humaine. Protection acoustique : normes et équipement de protection individuel (EPI)

1. Contexte

Protéger les travailleurs du bruit de chantier est une obligation réglementaire : il faut savoir mesurer un niveau sonore de manière pertinente et le comparer aux seuils d'action.

2. Définitions et méthode

- Deux grandeurs influencent la perception sensorielle d'un son : l'intensité (perçue comme le caractère « fort/faible ») et la fréquence (perçue comme le caractère « grave/aigu »).
- L'oreille humaine n'est pas également sensible à toutes les fréquences : la pondération A (notée dBA) corrige le niveau sonore physique pour refléter la sensibilité auditive réelle (moins sensible aux très basses et très hautes fréquences).

Échelle de niveaux sonores caractéristiques à connaître : seuil d'audibilité ≈ 0 dB ; conversation normale ≈ 60 dB ; circulation routière ≈ 70 -80 dB ; marteau-piqueur ≈ 100 -110 dB ; seuil de douleur ≈ 120 dB.

Méthode : utiliser un sonomètre pour mesurer un niveau sonore avec ou sans pondération (expérimental) ; exploiter les normes relatives aux nuisances sonores pour choisir une protection adaptée.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — choix d'une protection auditive pour un poste au marteau-piqueur

Un ouvrier utilise un marteau-piqueur produisant un niveau $L_{Aeq} = 102$ dBA au poste de travail sur la journée.

Seuils réglementaires français (niveaux d'exposition quotidienne) : valeur d'action inférieure 80 dBA, valeur d'action supérieure 85 dBA, valeur limite d'exposition 87 dBA (niveau réellement reçu par l'oreille, protection comprise).

102 dBA dépasse largement la valeur d'action supérieure : port obligatoire d'une protection auditive individuelle (bouchons ou casque antibruit adapté), et recherche prioritaire de mesures de réduction du bruit à la source (organisation du travail, choix de matériel moins bruyant).

À retenir

- Le dBA reflète la sensibilité réelle de l'oreille humaine, contrairement au dB physique brut.
- Comparer systématiquement une mesure de bruit de chantier aux seuils réglementaires d'action pour décider de la protection à mettre en œuvre.

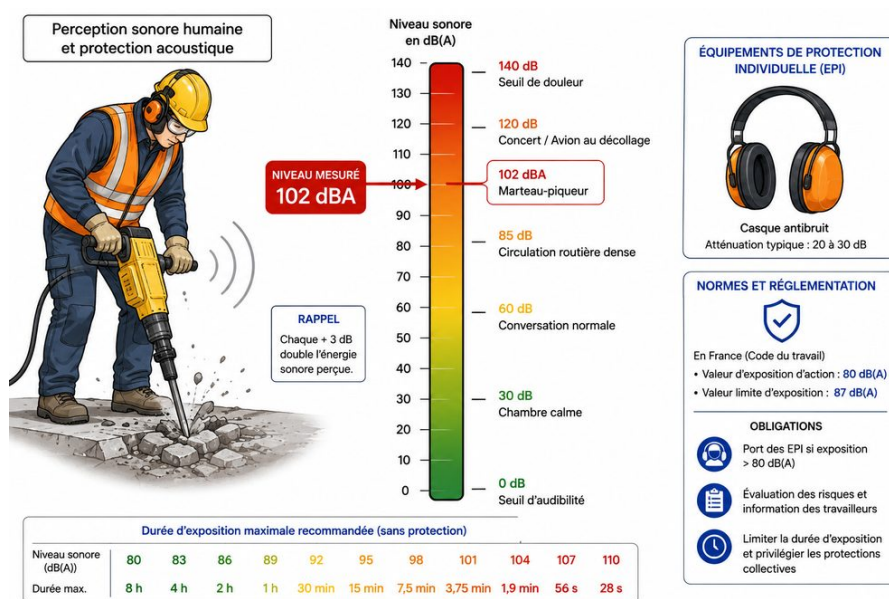


Illustration — F9 Perception sonore humaine. Protection acoustique : normes et équipement de protection individuel (EPI)

EXERCICE D'APPLICATION

Un salarié est exposé à $L_{Aeq} = 88$ dBA pendant 8h. Comparer aux seuils réglementaires ($VAI = 80$ dBA, $VAS = 85$ dBA, $VLE = 87$ dBA) et indiquer les mesures à mettre en œuvre.

Votre résolution (au crayon)

F10 Sources lumineuses

3. Ondes lumineuses

1. Contexte

Choisir un éclairage de chantier adapté (LED, lampe à décharge) suppose de comprendre les caractéristiques spectrales des différentes sources lumineuses disponibles.

2. Définitions et méthode

Le spectre d'une source décrit la répartition de l'intensité lumineuse émise en fonction de la longueur d'onde. Types de sources à connaître :

- Laser : spectre quasi-monochromatique (une longueur d'onde très précise) — utilisé notamment dans les appareils topographiques (niveaux laser).
- LED : spectre relativement étroit centré sur une couleur, ou blanc par mélange de plusieurs LED/phosphores.
- Lampe à incandescence : spectre continu et large, riche en infrarouge, faible rendement lumineux.
- Lampe spectrale (à décharge, ex. vapeur de sodium) : raies d'émission caractéristiques de l'élément excité — éclairage public traditionnel à teinte orangée.
- Température de couleur (en kelvin) : caractérise la teinte apparente d'une source blanche (« chaude », orangée, $\approx 2700-3000$ K, à « froide », bleutée, $\approx 5000-6500$ K).
- Indice de rendu des couleurs (IRC) : capacité d'une source à restituer fidèlement les couleurs des objets éclairés, sur une échelle de 0 à 100.

Méthode : caractériser différentes sources à l'aide de leur spectre ; associer qualitativement longueurs d'onde et couleurs perçues ; obtenir expérimentalement et comparer les spectres de différentes sources (spectroscope).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — choix entre projecteur LED et éclairage public au sodium

Projecteur de chantier LED : température de couleur ≈ 5000 K (« blanc froid »), IRC souvent supérieur à 80.

Éclairage public au sodium haute pression : spectre à raies orangées, température de couleur basse, IRC faible ($\approx 20-25$) — mauvaise restitution des couleurs, mais très bon rendement lumineux.

Conclusion pratique : les LED sont préférées pour les zones de chantier nécessitant une bonne discrimination des couleurs (contrôle qualité, sécurité, lecture de plans), malgré un coût d'achat plus élevé.

À retenir

- Le spectre d'une source détermine sa couleur perçue, sa température de couleur et son IRC.
- Une source à raies (sodium) a un mauvais IRC malgré un bon rendement énergétique : un compromis à connaître pour choisir un éclairage adapté à l'usage.

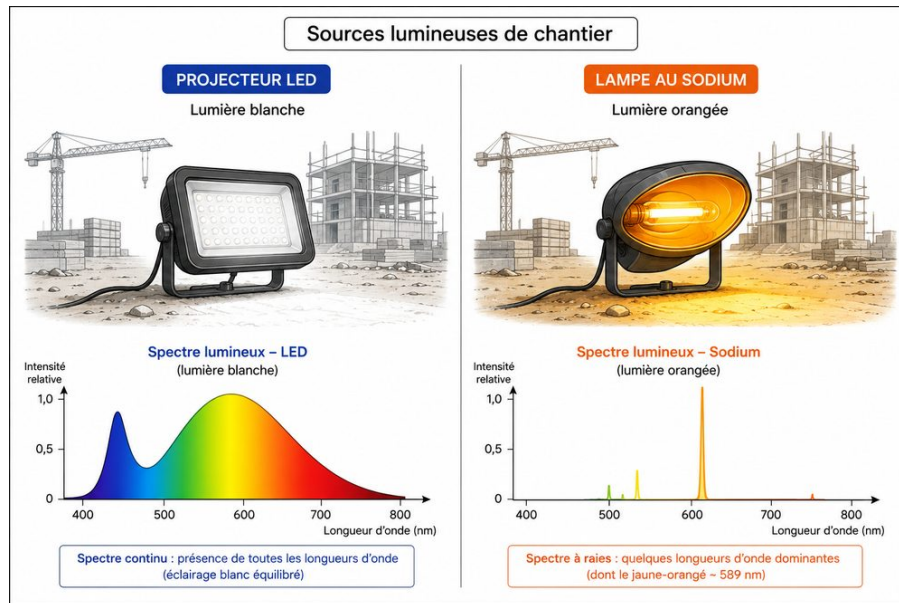


Illustration — F10 Sources lumineuses

EXERCICE D'APPLICATION

Comparer, en spectre et température de couleur, un projecteur LED (« blanc froid », $\approx 5700\text{K}$) et une lampe au sodium (spectre à raies, teinte orangée).

Laquelle choisir pour bien distinguer les couleurs des câbles électriques ? Justifier.

Votre résolution (au crayon)

F11 Photométrie

1. Contexte

Dimensionner l'éclairage d'un chantier ou d'une voirie nécessite de manipuler correctement les grandeurs photométriques et de savoir prévoir l'éclairement reçu en fonction de la distance à la source.

2. Définitions et méthode

- Flux lumineux Φ (lumen, lm) : quantité totale de lumière émise par une source, dans toutes les directions.
- Intensité lumineuse I (candela, cd) : flux lumineux émis par unité d'angle solide, dans une direction donnée.
- Éclairement lumineux E (lux, lx) : flux lumineux reçu par unité de surface.

Pour une source ponctuelle et une surface en incidence normale, à une distance d de la source (loi de l'inverse du carré de la distance) :

$$E = I / d^2$$

- Efficacité lumineuse d'une source : rapport du flux lumineux émis à la puissance électrique consommée (en lm/W) — permet de comparer l'efficacité énergétique de différentes sources (LED nettement supérieures aux lampes à incandescence).
- L'œil, récepteur sélectif de lumière : sensibilité maximale dans le vert-jaune (≈ 555 nm) en vision diurne, décalée vers le bleu-vert en vision nocturne.

Méthode : mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de déterminer l'éclairement en fonction de la distance à la source (vérification de la loi en $1/d^2$) ; choisir un mode d'éclairage adapté à ses caractéristiques.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — éclairage produit par un projecteur de chantier

Un projecteur de chantier LED a une intensité lumineuse $I = 15\,000$ cd dans son axe.

Éclairement au sol à $d = 8$ m, en incidence normale : $E = I / d^2 = 15\,000 / 8^2 = 15\,000 / 64 \approx 234$ lx

Comparaison aux exigences usuelles de chantier (de l'ordre de 20 à 50 lx pour une zone de circulation, jusqu'à environ 200 lx pour une zone de travail fin) : ce projecteur convient largement pour une zone de travail située à 8 m.

À retenir

- $E = I/d^2$: l'éclairement décroît très rapidement avec la distance à la source (loi en carré inverse).
- Vérifier l'éclairement obtenu par rapport aux exigences réglementaires ou aux besoins de la tâche à réaliser est une démarche systématique de dimensionnement.

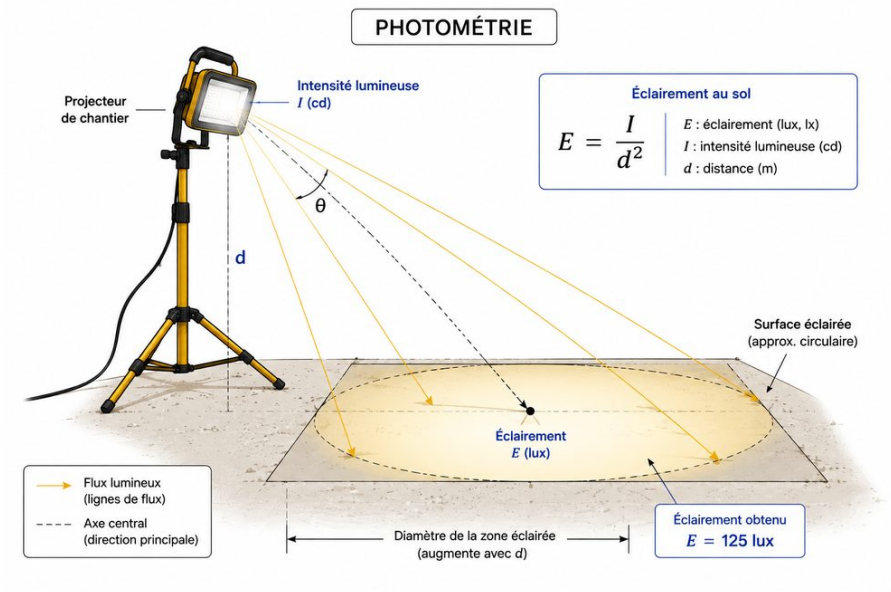


Illustration — F11 Photométrie

EXERCICE D'APPLICATION

Un projecteur de chantier a une intensité lumineuse $I = 25\,000$ cd dans l'axe.
 Calculer l'éclairement à $d = 10$ m (incidence normale). Ce niveau est-il suffisant pour une zone exigeant au moins 150 lx ?

Votre résolution (au crayon)

F12 Transmission et absorption de la lumière par un matériau. Filtres

1. Contexte

Comprendre pourquoi un verre teinté ou un écran de protection de soudage modifie l'intensité et la couleur de la lumière transmise est essentiel pour choisir un équipement de protection individuelle adapté.

2. Définitions et méthode

Lorsqu'une lumière traverse un matériau, une partie est transmise (traverse le matériau), une partie est absorbée (convertie en chaleur ou autre forme d'énergie), une partie peut être réfléchiée. Un filtre optique transmet sélectivement certaines longueurs d'onde et absorbe les autres, ce qui modifie le spectre — et donc la couleur perçue — de la lumière transmise.

Méthode : analyser expérimentalement l'effet d'un filtre sur le spectre d'une source lumineuse (spectroscopie associée à différents filtres colorés ou écrans de protection).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — écran de protection pour le soudage à l'arc

Un écran de protection pour soudage à l'arc électrique est un filtre à fort indice de protection : il absorbe la quasi-totalité du rayonnement ultraviolet et infrarouge émis par l'arc, ainsi qu'une grande partie de l'intensité lumineuse visible.

Seule une fraction très réduite et filtrée du spectre visible est transmise, ce qui protège la rétine du soudeur (risques de brûlure rétinienne et de « coup d'arc ») tout en lui laissant une visibilité suffisante de son travail.

À retenir

- Transmission + absorption (+ réflexion) se partagent l'énergie lumineuse incidente sur un matériau.
- Un filtre de protection est choisi pour son spectre de transmission, adapté au risque (UV, IR, intensité visible) de la source à observer.

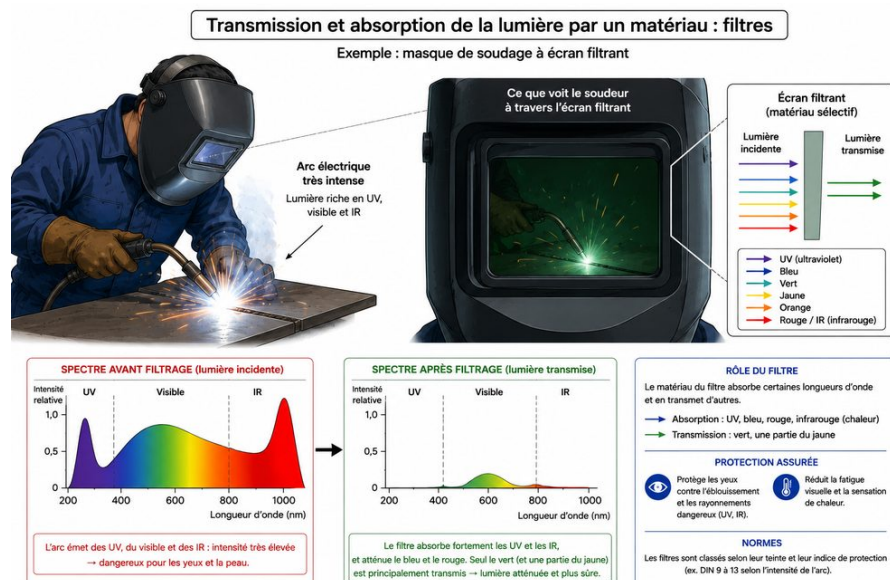


Illustration — F12 Transmission et absorption de la lumière par un matériau. Filtres

EXERCICE D'APPLICATION

Un opérateur de soudage à l'arc doit choisir un écran de protection parmi plusieurs filtres d'indices de protection croissants.

Expliquer le compromis entre protection oculaire et confort visuel du travail.

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE F

Evaluation — Vibrations et ondes

12 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. Un accéléromètre est un capteur utilisé pour mesurer...

- A. Une température
- B. Une vibration mécanique
- C. Une pression
- D. Un pH

2. Une oscillation dite « libre » se produit...

- A. À la fréquence de l'excitation extérieure
- B. À la fréquence propre f_0 du système
- C. Uniquement en régime forcé
- D. Jamais en mécanique des solides

3. La résonance mécanique survient lorsque...

- A. La fréquence d'excitation est très différente de f_0
- B. La fréquence d'excitation f est proche de la fréquence propre f_0 du système
- C. Il n'y a aucune excitation extérieure
- D. L'amortissement est infini

4. La célérité du son...

- A. Est identique dans tous les milieux
- B. Est plus grande dans les solides denses (béton, acier) que dans l'air
- C. Est nulle dans les solides
- D. Ne dépend pas du milieu de propagation

5. La relation entre célérité c , longueur d'onde λ et fréquence f d'un son pur est...

- A. $c = \lambda / f$
- B. $c = \lambda \times f$
- C. $c = \lambda + f$
- D. $c = f / \lambda$

6. Un pic net dans le spectre d'un bruit indique généralement...

- A. Un bruit blanc parfaitement aléatoire
- B. Une cause mécanique identifiable (rotation, frottement, choc périodique)
- C. L'absence totale de source sonore
- D. Une erreur systématique de l'appareil de mesure

7. Doubler le nombre de sources sonores identiques augmente le niveau sonore d'environ...

- A. 3 dB
- B. 10 dB
- C. 50 dB
- D. 0 dB (aucun changement)

8. À l'interface d'une onde acoustique avec un matériau, l'énergie incidente se partage entre...

- A. Réflexion, transmission et absorption
- B. Uniquement réflexion
- C. Uniquement transmission
- D. Uniquement absorption

9. Le niveau en dBA (décibel pondéré A) reflète en priorité...

- A. La puissance électrique de la source sonore
- B. La sensibilité réelle de l'oreille humaine selon la fréquence
- C. La température ambiante du chantier
- D. La distance à la source uniquement

10. Une source lumineuse à raies (comme une lampe à vapeur de sodium) présente généralement...

- A. Un excellent indice de rendu des couleurs (IRC)
- B. Un mauvais IRC malgré un bon rendement énergétique
- C. Une couleur totalement imperceptible
- D. Un IRC systématiquement égal à 100

11. L'éclairement E produit par une source ponctuelle à distance d suit une loi...

- A. Proportionnelle à la distance d
- B. En $1/d^2$ (carré inverse de la distance)
- C. Linéaire avec le temps
- D. Indépendante de la distance

12. Face à un matériau, l'énergie lumineuse incidente se partage entre transmission, absorption et...

- A. Réflexion
- B. Dilatation
- C. Ionisation
- D. Fusion

DOMAINE G Électricité

Pourquoi ce chapitre ?

Groupes électrogènes, tableaux de chantier, engins électroportatifs, proximité de lignes électriques aériennes ou enterrées : le risque électrique est l'un des risques majeurs sur un chantier de travaux publics. Ce chapitre, dernier du programme, donne les bases pour caractériser une installation électrique (tensions, puissances) et surtout pour comprendre et justifier les dispositifs qui protègent le matériel et les personnes — un prérequis direct à toute habilitation électrique.

G1 Intensité, tension

1. Contexte

Un chantier combine des installations en régime continu (batteries d'engins : 12 V, 24 V, 48 V) et en régime alternatif (réseau de chantier 230 V / 400 V) : il faut savoir distinguer ces régimes et connaître les domaines de tension réglementaires pour mesurer et intervenir en sécurité.

2. Définitions et méthode

- Grandeur continue : valeur constante au cours du temps (exemple : tension d'une batterie d'engin).
- Grandeur alternative (sinusoïdale) : varie périodiquement autour de zéro au cours du temps (exemple : tension du réseau de chantier).

Pour un signal sinusoïdal, on distingue la valeur crête (amplitude maximale instantanée) et la valeur efficace (celle qui correspond à un effet équivalent en continu, et qui est affichée par les appareils de mesure usuels) :

$$U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2}$$

Domaines de tension réglementaires (à connaître) :

- TBT (Très Basse Tension) : ≤ 50 V en alternatif, ≤ 120 V en continu
- BT (Basse Tension) : de 50 V à 1000 V en alternatif, de 120 V à 1500 V en continu — c'est le domaine du réseau de chantier 230/400 V
- HTA : de 1 kV à 50 kV — HTB : au-delà de 50 kV (lignes de transport, postes source)

Méthode : mettre en œuvre un système d'acquisition de données pour obtenir une représentation temporelle de grandeurs électriques ; proposer un protocole expérimental pour mesurer, en sécurité, une tension ou une intensité en régime continu ou alternatif.

3. Exemple d'application

Exemple d'application — valeur crête du réseau de chantier 230 V

Le réseau de chantier délivre une tension alternative sinusoïdale de valeur efficace $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ (valeur affichée par tout voltmètre usuel).

Valeur crête réelle atteinte à chaque alternance : $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2} = 230 \times 1,414 \approx 325 \text{ V}$

Ce résultat rappelle que même une tension « affichée à 230 V » atteint en réalité, de façon répétée, des valeurs instantanées proches de 325 V — un point important pour comprendre le dimensionnement des isolants et la dangerosité réelle du réseau.

Classification : 230 V (alternatif) appartient au domaine BT (basse tension).

À retenir

- Toujours préciser si une grandeur électrique est continue ou alternative, et si une valeur donnée est efficace ou crête.
- 230/400 V appartient au domaine BT : cela conditionne le niveau d'habilitation électrique requis pour intervenir.

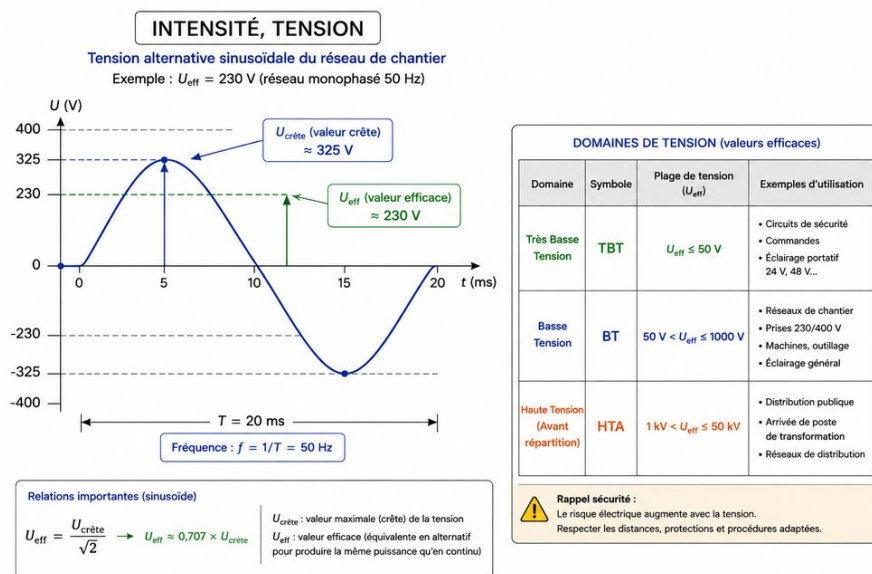


Illustration — G1 Intensité, tension

EXERCICE D'APPLICATION

Un groupe électrogène de chantier délivre une tension alternative sinusoïdale de valeur efficace $U_{\text{eff}} = 400 \text{ V}$ (réseau triphasé).

Calculer la valeur crête de cette tension et indiquer à quel domaine de tension (TBT, BT, HTA) appartient ce réseau.

Votre résolution (au crayon)

G2 Puissance électrique en régime continu et en régime sinusoïdal

1. Contexte

Dimensionner un groupe électrogène de chantier ou un tableau électrique impose de savoir calculer la puissance réellement consommée par les récepteurs, ainsi que la puissance qu'il faut être capable de fournir.

2. Définitions et méthode

- Effet Joule : dissipation de chaleur dans un conducteur parcouru par un courant électrique, due à sa résistance.

Puissance électrique en régime continu :

$$P = U \times I$$

En régime sinusoïdal, on distingue trois puissances :

- Puissance instantanée $p(t) = u(t) \times i(t)$: varie constamment au cours du temps.
- Puissance active P (en watts, W) : puissance moyenne réellement transformée (chaleur, travail mécanique) : $P = U \times I \times \cos(\varphi)$, où φ est le déphasage entre tension et courant, U et I les valeurs efficaces.
- Puissance apparente S (en volt-ampères, VA) : $S = U \times I$ (produit des valeurs efficaces, sans tenir compte du déphasage) — c'est elle qui dimensionne les câbles, les protections et les générateurs (groupe électrogène, transformateur).

Méthode : calculer une puissance électrique reçue par un récepteur ; mesurer une puissance électrique (wattmètre, expérimental) ; établir un bilan de puissance pour un circuit à une seule maille ; mettre en œuvre un protocole permettant de discuter un bilan de puissance (expérimental).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — dimensionnement du groupe électrogène pour une pompe de chantier

Une pompe électrique de chantier, alimentée en 230 V (valeur efficace), consomme un courant efficace $I = 8,5$ A, avec un facteur de puissance $\cos(\varphi) = 0,85$.

Puissance apparente : $S = U \times I = 230 \times 8,5 = 1955 \text{ VA} \approx 1,96 \text{ kVA}$

Puissance active : $P = U \times I \times \cos(\varphi) = 230 \times 8,5 \times 0,85 \approx 1662 \text{ W} \approx 1,66 \text{ kW}$

Point clé pour le chantier : le groupe électrogène doit être choisi sur la puissance apparente S ($\approx 2 \text{ kVA}$), et non sur la seule puissance active P , sous peine de sous-dimensionnement.

À retenir

- $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ (puissance active, réellement consommée) ; $S = U \cdot I$ (puissance apparente, qui dimensionne le matériel).
- En régime continu, $P = U \times I$ tout simplement (pas de déphasage à considérer).

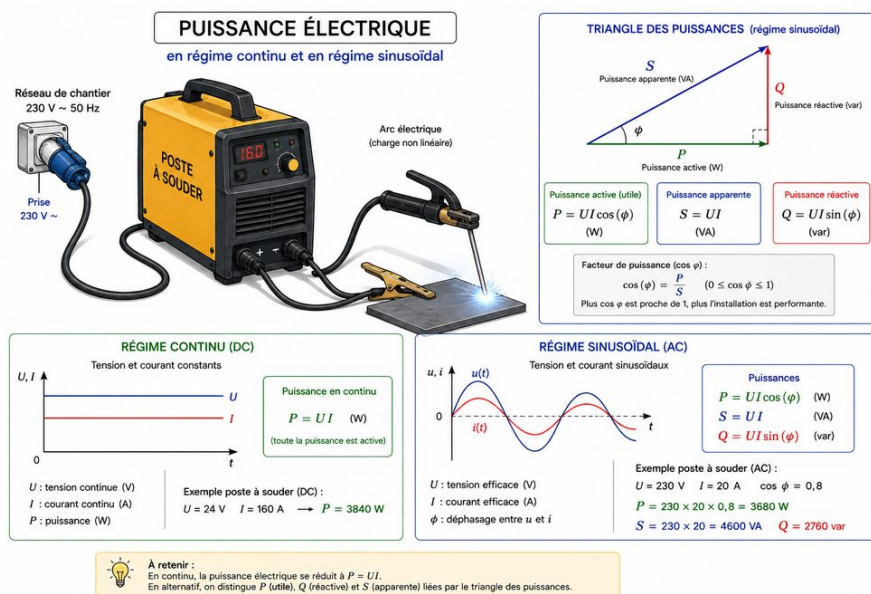


Illustration — G2 Puissance électrique en régime continu et en régime sinusoïdal

EXERCICE D'APPLICATION

Un poste à souder de chantier, alimenté en 230 V (efficace), consomme un courant efficace $I = 15$ A avec un facteur de puissance $\cos(\varphi) = 0,75$.

Calculer la puissance apparente S et la puissance active P consommées.

Votre résolution (au crayon)

G3 Sécurité électrique, risques et protection du matériel et des personnes

1. Contexte

Le risque électrique est l'un des risques majeurs de chantier : proximité de réseaux enterrés ou aériens, matériel électroportatif utilisé en milieu humide, engins à proximité de lignes. Comprendre les mécanismes du risque et savoir justifier les dispositifs de protection est indispensable, en particulier en vue d'une habilitation électrique.

2. Définitions et méthode

Les effets physiologiques du courant électrique sur le corps humain dépendent de l'intensité qui le traverse, de la durée de passage, du trajet emprunté et de la nature du courant (continu ou alternatif) : simple perception pour de très faibles intensités, tétanisation musculaire (empêchant de lâcher prise) pour quelques milliampères à quelques dizaines de milliampères, risque de fibrillation cardiaque au-delà, selon la durée d'exposition.

Principales causes de risque électrique et leurs conséquences :

- Contact direct : contact avec une partie active normalement sous tension (fil dénudé, borne accessible).
- Contact indirect : contact avec une masse métallique accidentellement mise sous tension par un défaut d'isolement (carcasse d'un appareil défectueux).
- Arc électrique : amorçage d'un arc lors d'un court-circuit ou d'une intervention à proximité de pièces sous tension, avec projection de matière en fusion et rayonnement thermique et lumineux intense.
- Court-circuit : mise en contact directe de deux conducteurs de potentiels différents, provoquant un courant très élevé.
- Conséquences possibles : électrisation (passage de courant dans le corps), électrocution (électrisation mortelle), incendie, explosion (notamment en atmosphère explosible).

Dispositifs de protection du matériel et des personnes à savoir justifier :

- Coupe-circuit / fusible : protège contre les surintensités en interrompant le circuit par fusion d'un élément calibré (protection du matériel).
- Disjoncteur : protège contre les surintensités (surcharge, court-circuit) ; réarmable, contrairement au fusible.
- Disjoncteur différentiel : détecte un courant de fuite vers la terre (différence entre courant entrant et courant sortant du circuit) et coupe l'alimentation en quelques dizaines de millisecondes ; protège les personnes contre les contacts indirects (et, à haute sensibilité, contre certains contacts directs).
- Mise à la terre des masses métalliques : permet l'écoulement d'un courant de défaut et le déclenchement effectif de la protection différentielle associée.

Méthode : identifier les situations de risque électrique ; justifier la présence et les caractéristiques des dispositifs de protection ; mettre en œuvre un protocole permettant de montrer l'intérêt d'un dispositif de protection électrique (expérimental, sur maquette pédagogique sécurisée).

3. Exemple d'application

Exemple d'application — rôle du disjoncteur différentiel 30 mA sur une pompe de chantier

Une pompe immergée de chantier est alimentée via une prise protégée par un disjoncteur différentiel haute sensibilité (30 mA).

Un défaut d'isolement survient (infiltration d'eau dans le moteur) : un courant de fuite apparaît entre une phase et la terre, à travers la carcasse métallique de la pompe.

Dès que ce courant de fuite dépasse le seuil de 30 mA, le disjoncteur différentiel coupe automatiquement l'alimentation en quelques dizaines de millisecondes — bien avant qu'une personne touchant accidentellement la carcasse ne soit exposée à un courant traversant son corps pendant une durée dangereuse.

C'est pourquoi la réglementation impose un disjoncteur différentiel haute sensibilité (30 mA) sur l'ensemble des installations électriques de chantier.

À retenir

- Distinguer contact direct (partie active accessible) et contact indirect (masse accidentellement sous tension).
- Fusible/disjoncteur protègent le matériel contre les surintensités ; le disjoncteur différentiel + la mise à la terre protègent les personnes contre les contacts indirects.
- Le 30 mA haute sensibilité est la valeur clé à retenir pour la protection des personnes sur un chantier.

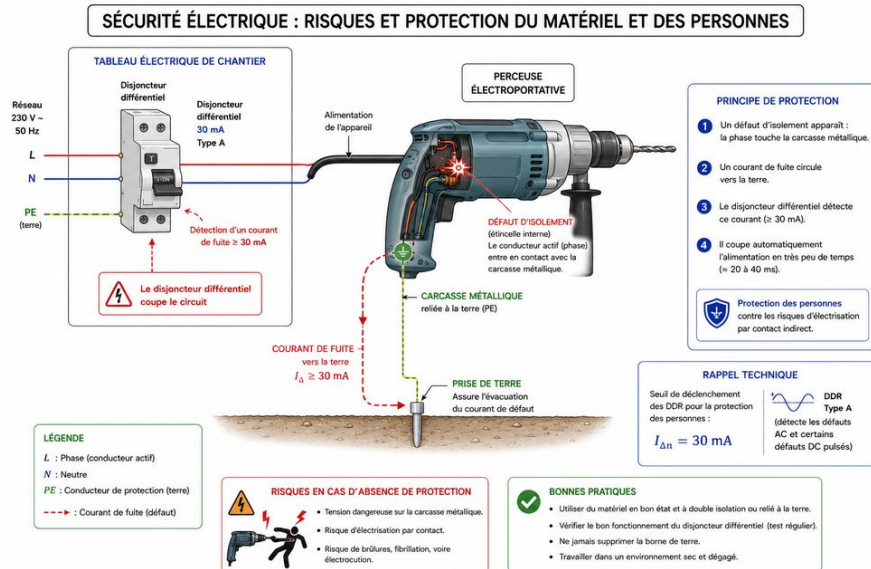


Illustration — G3 Sécurité électrique, risques et protection du matériel et des personnes

EXERCICE D'APPLICATION

Une perceuse électroportative présente un défaut d'isolement qui met sa carcasse métallique sous tension. Un ouvrier touche cette carcasse.

- 1) De quel type de contact s'agit-il (direct ou indirect) ?
- 2) Quel dispositif doit couper automatiquement l'alimentation avant que le courant traversant l'ouvrier ne devienne dangereux ? Préciser le seuil réglementaire usuel.

Votre résolution (au crayon)

DOMAINE G**Evaluation — Électricité**

3 questions à choix multiple. Cochez la bonne réponse ; le corrigé se trouve en annexe, en fin d'ouvrage.

1. La relation entre tension crête $U_{\text{crête}}$ et tension efficace U_{eff} , en régime sinusoïdal, est...

- A. $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} / \sqrt{2}$
- B. $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2}$
- C. $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times 2$
- D. $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}}$

2. En régime sinusoïdal, la puissance active (réellement consommée) s'exprime par...

- A. $P = U \times I$
- B. $P = U \times I \times \cos(\varphi)$
- C. $P = U / I$
- D. $P = U^2 \times I$

3. Quel dispositif protège spécifiquement les personnes contre les contacts indirects, avec un seuil usuel de haute sensibilité de 30 mA ?

- A. Le fusible
- B. Le disjoncteur différentiel
- C. Le sectionneur
- D. Le transformateur d'isolement seul

Annexe — Corrigés

Corrigés des exercices d'application et des évaluations, domaine par domaine.

DOMAINE A

Corrigés — Mesures et incertitudes

A1 — Variabilité de la mesure d'une grandeur physique

- 1) Histogramme resserré autour de la valeur moyenne, sans valeur aberrante isolée (dispersion modérée typique d'un essai de terrain maîtrisé).
- 2) Somme = 18567 ; $n = 10 \rightarrow \bar{x} = 18567/10 = 1856,7 \text{ kg/m}^3$.
Écart-type : $s = \sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)]} = \sqrt{(560,10/9)} = \sqrt{62,23} \approx 7,89 \text{ kg/m}^3$.
- 3) Causes possibles : hétérogénéité locale du remblai (nature du sol variable), variation du contact/appui de la sonde, dérive d'étalonnage, opérateur.

A2 — Incertitude-type

- 1) $u_A(\bar{x}) = s/\sqrt{n} = 7,89/\sqrt{10} = 7,89/3,162 \approx 2,49 \text{ kg/m}^3$.
- 2) $u_B = \delta/(2\sqrt{3}) = 1/(2 \times 1,732) = 1/3,464 \approx 0,29 \text{ kg/m}^3$.
- 3) u_A (2,49) domine très largement u_B (0,29) : la dispersion liée à l'hétérogénéité du matériau et au protocole est bien plus pénalisante que la résolution de l'appareil.

A3 — Incertitudes-types composées

$$D_c = (1856,7/1920) \times 100 = 96,7 \%$$

Composition des incertitudes relatives (quotient) : $[u(D_c)/D_c]^2 = [u(p_{mes})/p_{mes}]^2 + [u(p_{OPM})/p_{OPM}]^2$

$$= (2,5/1856,7)^2 + (10/1920)^2 = (1,347 \times 10^{-3})^2 + (5,208 \times 10^{-3})^2 \approx 2,89 \times 10^{-5}$$

$$u(D_c)/D_c \approx 5,38 \times 10^{-3} \rightarrow u(D_c) \approx 96,7 \times 5,38 \times 10^{-3} \approx 0,52 \%$$

A4 — Écriture du résultat d'une mesure

$u(D_c)$ arrondi à 1 chiffre significatif, par excès : $u(D_c) = 0,6 \%$.

Valeur arrondie au même rang (le dixième) : $D_c = 96,7 \%$.

Résultat : $D_c = (96,7 \pm 0,6) \%$.

Conformité : même en tenant compte de l'incertitude (borne basse $96,7 - 0,6 = 96,1 \%$), le résultat reste supérieur à l'exigence de 95 % $\rightarrow$ remblai conforme.

A5 — Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé

$$E_n = |D_{c1} - D_{c2}| / \sqrt{(u_1)^2 + (u_2)^2} = |96,7 - 94,8| / \sqrt{(0,6)^2 + (0,7)^2} = 1,9 / \sqrt{0,85} = 1,9/0,922 \approx 2,06$$

$E_n \approx 2,06$, légèrement supérieur à 2 : les deux résultats sont à la limite de la compatibilité. L'écart n'est pas clairement expliqué par les seules incertitudes de mesure : il convient de vérifier les protocoles et étalonnages des deux appareils avant de conclure sur la conformité du remblai.

Évaluation — Domaine A : réponses

1. A1 — Réponse : B. La moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type expérimental s

La dispersion d'une série se caractérise par la moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type expérimental s ; l'écart-type n'est qu'une étape de calcul intermédiaire, distincte de l'incertitude-type.

2. A2 — Réponse : A. $u_A = s / \sqrt{n}$

L'évaluation de type A, utilisée quand on dispose d'une série de mesures répétées, donne $u_A(x) = s/\sqrt{n}$.

3. A3 — Réponse : B. On les compose en quadrature : $u(G) = \sqrt{(u(x)^2 + u(y)^2)}$

Les incertitudes-types ne s'additionnent jamais simplement : elles se composent en quadrature (racine de la somme des carrés).

4. A4 — Réponse : B. 1 (rarement 2) chiffre(s), arrondi par excès

L'incertitude-type se donne avec 1 (rarement 2) chiffre(s) significatif(s), arrondie par excès ; la valeur mesurée s'arrondit ensuite au même rang décimal.

5. A5 — Réponse : B. $E_n = 2$

Le seuil de référence usuel est $E_n = 2$: au-delà, les deux valeurs sont jugées incompatibles compte tenu de leurs incertitudes.

DOMAINE B**Corrigés — Matériaux, transformation de la matière, valorisation****B1 — Les dérivés du pétrole**

- 1) Le bitume provient du résidu atmosphérique (fraction la plus lourde, obtenue en fond de colonne, $T > 350\text{ °C}$).
- 2) Sous pression atmosphérique, il faudrait chauffer cette fraction à une température si élevée qu'elle se décomposerait (craquage thermique) avant d'atteindre son ébullition théorique. Abaisser la pression (vide) abaisse la température d'ébullition nécessaire, ce qui permet d'extraire le bitume sans le dégrader.

B2 — Bitumes : extraction, distillation fractionnée

- 1) A = essence (T ébullition basse) ; B = gazole (T intermédiaire) ; C = bitume (résidu, T la plus élevée).
- 2) Les fractions les plus volatiles sortent en haut de colonne, les plus lourdes en fond : ordre de haut en bas = A (essence), B (gazole), C (bitume).

B3 — Différentes représentations des molécules organiques

- 1) $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$ (chaîne de 5 carbones, fonction alcool en position 1).
- 2) Formule brute : $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$.

B4 — Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles

Groupe alcène (double liaison $\text{C}=\text{C}$) → famille des alcènes.

Groupe acide carboxylique ($-\text{COOH}$) → famille des acides carboxyliques.

La molécule porte une double fonctionnalité, comme l'acrylate de méthyle vu en cours.

B5 — Polymères : généralités et classification

- 1) X = thermoplastique ; Y = thermodurcissable ; Z = élastomère.
- 2) X : tube PEHD ou gaine PVC ; Y : résine époxy de scellement ; Z : joint d'étanchéité EPDM.

B6 — Polymères : monomère, motif, groupes caractéristiques, réactions de polymérisation

- 1) Le styrène possède une double liaison $\text{C}=\text{C}$ et un seul type de groupe réactif : c'est une polyaddition (addition successive sans perte de matière).
- 2) $n (\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH=CH}_2) \rightarrow \text{--[CH}_2\text{-CH(C}_6\text{H}_5\text{)]}_n\text{--}$

B7 — Vieillessement d'un matériau polymère

- 1) Rayonnement UV (photo-oxydation), à l'origine de la rupture de liaisons chimiques en surface.
- 2) Stocker le géotextile à l'abri de la lumière et limiter le délai entre livraison et mise en œuvre (enfouissement).

B8 — Entités chimiques : molécules, atomes, ions

Na^+ : cation. SO_4^{2-} : anion. Ca : atome. H_2O : molécule. Cl^- : anion.

B9 — Masse, quantité de matière, concentration en masse et en quantité de matière

$$n = m/M = 2,00/320 = 6,25 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

$$C = n/V = 6,25 \times 10^{-3}/1,00 = 6,25 \times 10^{-3} \text{ mol/L.}$$

B10 — Transformation chimique, réaction, équation de réaction. Bilan de matière : réactif limitant, stœchiométrie, avancement

Pour consommer tout le CaCO_3 , il faudrait $n(\text{H}^+) = 2 \times 5,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$. On ne dispose que de $8,0 \times 10^{-3} \text{ mol} < 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

Réactif limitant : H^+ . Avancement maximal : $x_{\text{max}} = n_0(\text{H}^+)/2 = 8,0 \times 10^{-3}/2 = 4,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

B11 — Transformation complète et incomplète

a) Complète : HCl est un acide fort, il réagit totalement avec l'eau/le calcaire.

b) Limitée : l'acide carbonique est un acide faible, sa réaction avec l'eau est partielle (équilibre, $x_f < x_{\text{max}}$).

B12 — Théorie de Brønsted : acide fort, base forte, acide faible, base faible

Acides (cèdent un proton H^+) : HCl , CH_3COOH .

Bases (captent un proton H^+) : HO^- , NH_3 .

B13 — pH d'une solution aqueuse

$$\text{pH} = -\log(5,0 \times 10^{-13}) \approx 12,3.$$

Valeur proche de 13, caractéristique d'un béton sain : milieu très basique, favorable à la passivation (protection) des armatures.

B14 — Notion d'équilibre acido-basique. Couple acide-base. Constante d'acidité K_a . Diagramme de prédominance

$\text{pH} (8,5) > \text{p}K_a (6,3)$: l'espèce basique HCO_3^- est prédominante.

Résultat cohérent avec un béton en cours de carbonatation : le pH a déjà nettement baissé par rapport au béton sain ($\text{pH} \approx 13$) sans être redevenu acide.

B15 — Oxydant, réducteur. Couple oxydant/réducteur. Réaction d'oxydoréduction

$E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) < E^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})$: le zinc est un réducteur plus fort que le fer $\rightarrow$ réaction spontanée : Zn réduit Fe^{2+} .

$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ (oxydation) ; $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ (réduction).

Équation bilan : $\text{Zn(s)} + \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + \text{Fe(s)}$. (Principe à la base de l'anode sacrificielle en zinc, voir B17.)

B16 — Influence du pH : diagrammes potentiel-pH

À potentiel constant, le point représentatif se déplace horizontalement du domaine de passivation vers le domaine de corrosion (frontière généralement autour de pH 9-10 pour le fer).

Une fois ce domaine atteint, le film passif protecteur n'est plus stable : l'armature devient vulnérable à la corrosion.

B17 — Corrosion des métaux et protection (anode sacrificielle, courant imposé)

1) On impose à la structure un potentiel suffisamment bas pour la maintenir dans le domaine d'immunité, en la faisant jouer le rôle de cathode.

2) Anode sacrificielle : avantage — simple, pas d'alimentation électrique ; inconvénient — s'use et doit être remplacée, rejet progressif de sels métalliques.

Courant imposé : avantage — pas de consommation de matière, réglable, pas de rejet de sels ; inconvénient — nécessite une alimentation électrique et un suivi.

B18 — Valorisation des matériaux (économie circulaire des travaux publics)

1) Réduction des granulats/bitume neufs nécessaires ; réduction du volume de déchets envoyés en décharge.

2) Il s'agit de recyclage (réintégration de la matière dans un nouveau cycle), niveau situé après la réduction à la source et avant la valorisation énergétique ou l'élimination.

Évaluation — Domaine B : réponses

1. B1 — Réponse : C. Le résidu, fraction la plus lourde en fond de colonne

Le bitume provient du résidu atmosphérique, la fraction la plus lourde obtenue en fond de colonne de distillation.

2. B2 — Réponse : B. Pour éviter sa décomposition thermique (craquage) à haute température

Sous vide, la température d'ébullition nécessaire est abaissée, ce qui permet d'extraire le bitume sans le dégrader par craquage thermique.

3. B3 — Réponse : B. La formule développée

La formule développée montre tous les atomes et toutes les liaisons ; la semi-développée omet les liaisons C-H, et la brute ne donne qu'un bilan atomique.

4. B4 — Réponse : B. Acides carboxyliques

Le groupe -COOH (acide carboxylique) caractérise la famille des acides carboxyliques.

5. B5 — Réponse : C. Le thermoplastique

Le thermoplastique se ramollit de façon réversible sous l'effet de la chaleur, contrairement au thermodurcissable (irréversible) et à l'élastomère (grande élasticité).

6. B6 — Réponse : B. Les monomères insaturés s'additionnent, sans perte de matière

La polyaddition met en jeu des monomères insaturés qui s'additionnent sans élimination de matière, contrairement à la polycondensation.

7. B7 — Réponse : C. Une pression atmosphérique normale et constante

Les cinq grands facteurs de vieillissement sont les UV, la température, l'oxygène, l'humidité et la fatigue mécanique — pas la pression atmosphérique normale.

8. B8 — Réponse : B. Un anion

Un anion est un ion chargé négativement ; un cation est chargé positivement.

9. B9 — Réponse : B. $n = m / M$

$n = m/M$ est la relation fondamentale entre masse et quantité de matière.

10. B10 — Réponse : B. En comparant les quantités de matière disponibles aux coefficients stœchiométriques

Le réactif limitant s'identifie en comparant les quantités de matière disponibles aux coefficients stœchiométriques de l'équation, à l'aide d'un tableau d'avancement.

11. B11 — Réponse : A. $x_f = x_{\max}$ (l'avancement final atteint l'avancement maximal)

Une transformation totale atteint l'avancement maximal ($x_f = x_{\max}$) ; une transformation limitée s'arrête avant ($x_f < x_{\max}$), à l'équilibre.

12. B12 — Réponse : B. Céder un proton H^+

Un acide de Brønsted cède un proton H^+ ; une base de Brønsted en capte un.

13. B13 — Réponse : B. $pH = -\log[H_3O^+]$

$pH = -\log[H_3O^+]$, sur une échelle de 0 à 14 en solution aqueuse diluée à 25 °C.

14. B14 — Réponse : B. La forme (acide ou basique) majoritaire d'une espèce selon le pH

Le diagramme de prédominance permet de prévoir quelle forme du couple acide-base est majoritaire en fonction du pH du milieu, de part et d'autre du pK_a .

15. B15 — Réponse : B. Cède des électrons

Le réducteur cède des électrons (il est oxydé) ; l'oxydant en capte (il est réduit).

16. B16 — Réponse : B. La formation d'une couche protectrice stable à la surface du métal

La passivation correspond à la formation d'une couche d'oxyde protectrice stable, qui ralentit fortement la corrosion — c'est ce qui protège naturellement les armatures dans un béton sain.

17. B17 — Réponse : B. Relier la structure à un métal plus réducteur, qui se corrode à sa place

L'anode sacrificielle est un métal plus réducteur (potentiel standard E° plus bas) que la structure à protéger : il se corrode préférentiellement, à la place de celle-ci.

18. B18 — Réponse : B. Réduire, réemployer et recycler les matériaux (les « 3R »)

La démarche d'économie circulaire des travaux publics repose sur les 3R : Réduire, Réemployer, Recycler, afin de limiter la mise en décharge et la consommation de ressources neuves.

DOMAINE C**Corrigés — Mécanique du solide****C1 — Référentiel. Caractère relatif du mouvement**

Dans le référentiel lié à la cabine (qui tourne avec la pelle), le godet a un mouvement limité, essentiellement dû aux articulations du bras.

Dans le référentiel terrestre, le godet décrit une trajectoire circulaire (ou plus complexe) du fait de la rotation de la pelle.

Pas de contradiction : le mouvement est relatif, chaque description est correcte dans son propre référentiel.

C2 — Description du mouvement d'un solide : translation, rotation autour d'un axe fixe

$$N = 15/60 = 0,25 \text{ tr/s. } \omega = 2\pi N = 2\pi \times 0,25 \approx 1,571 \text{ rad/s.}$$

$$v = \omega \times R = 1,571 \times 0,9 \approx 1,41 \text{ m/s.}$$

C3 — Actions mécaniques sur un système. Force résultante et moment. Couple

$$M = F \times d = 800 \times 1,8 = 1440 \text{ N}\cdot\text{m} = 1,44 \text{ kN}\cdot\text{m.}$$

C4 — Référentiel galiléen. Principe de l'inertie

- a) Oui, avec une très bonne approximation (échelle de temps courte, phénomène classique).
- b) Le référentiel terrestre reste galiléen ; c'est le référentiel lié au malaxeur lui-même (en rotation) qui n'est pas galiléen.

C5 — Principe fondamental de la dynamique

La benne décélère en descendant : son accélération est dirigée vers le haut ($a = +0,3 \text{ m/s}^2$).

$$\text{PFD : } T - mg = ma \rightarrow T = m(g + a) = 650 \times (9,81 + 0,3) = 650 \times 10,11 \approx 6572 \text{ N} \approx 6,57 \text{ kN.}$$

C6 — Conditions d'équilibre d'un solide

$$F_{\text{étai}} \times \cos(60^\circ) = F \rightarrow F_{\text{étai}} = F / \cos(60^\circ) = 4500 / 0,5 = 9000 \text{ N} = 9,0 \text{ kN.}$$

C7 — Effet centrifuge

$$F_{\text{ie}} = m \times v^2 / R = 18\,000 \times 8,33^2 / 25 = 18\,000 \times 69,4 / 25 \approx 49\,960 \text{ N} \approx 50,0 \text{ kN.}$$

Cette force doit être reprise par l'arrimage du chargement et par l'adhérence des pneus.

Évaluation — Domaine C : réponses

1. C1 — Réponse : B. Par rapport à un référentiel explicitement précisé

Un mouvement n'a de sens que relativement à un référentiel : il faut toujours le préciser avant de décrire un mouvement (caractère relatif du mouvement).

2. C2 — Réponse : B. La vitesse angulaire ω

En rotation autour d'un axe fixe, tous les points ont la même vitesse angulaire ω , mais une vitesse linéaire $v = \omega \times r$ qui dépend de leur distance à l'axe.

3. C3 — Réponse : B. $M = F \times d$

Le moment d'une force est le produit de la force par son bras de levier : $M = F \times d$.

4. C4 — Réponse : A. Le principe de l'inertie est vérifié

Un référentiel galiléen est celui dans lequel le principe de l'inertie (un système isolé reste au repos ou en mouvement rectiligne uniforme) est vérifié.

5. C5 — Réponse : B. $\Sigma F = m \times a$

En translation, le PFD s'écrit $\Sigma F_{\text{ext}} = m \times a$, dans un référentiel supposé galiléen.

6. C6 — Réponse : B. La résultante soit nulle ET les droites d'action soient concourantes (ou parallèles)

L'équilibre sous trois forces exige une résultante vectorielle nulle ET des droites d'action concourantes en un même point (ou parallèles) — condition vérifiable via le triangle des forces.

7. C7 — Réponse : B. Une force d'inertie fictive, ressentie uniquement dans le référentiel tournant

L'effet centrifuge est une force d'inertie fictive, qui n'existe que dans le référentiel non galiléen en rotation ; dans le référentiel terrestre, c'est une force centripète réelle (adhérence + dévers) qui impose la trajectoire circulaire.

DOMAINE D**Corrigés — Mécanique des fluides****D1 — Pression dans un fluide, force pressante**

$$S = 1,2 \times 2,0 = 2,4 \text{ m}^2. F = p \times S = 18\,000 \times 2,4 = 43\,200 \text{ N} = 43,2 \text{ kN}.$$

D2 — Relation fondamentale de l'hydrostatique

$$p = \rho \times g \times h = 1000 \times 9,81 \times 2,5 = 24\,525 \text{ Pa} \approx 24,5 \text{ kPa}.$$

D3 — Théorème de Pascal

$$p = F_2/S_2 = F_1/S_1 \rightarrow F_1 = F_2 \times S_1/S_2 = 6000 \times 8/120 = 400 \text{ N}.$$

D4 — Poussée d'Archimède

$$F_A = \rho \times V \times g = 1000 \times 12 \times 9,81 = 117\,720 \text{ N} \approx 117,7 \text{ kN}.$$

$$\text{À l'équilibre flottant, } F_A = \text{Poids} = m \times g \rightarrow m = F_A/g = 117\,720/9,81 = 12\,000 \text{ kg} = 12 \text{ t}.$$

D5 — Tension superficielle et capillarité

L'échantillon A (remontée plus faible) a la porosité capillaire la plus faible.

Il sera a priori plus durable : moins sensible aux remontées d'humidité, au gel-dégel et à la corrosion des armatures qu'il pourrait contenir.

D6 — Débit massique et débit volumique

$$V = 3,6 \text{ m}^3 ; t = 360 \text{ s}. Q_v = 3,6/360 = 0,010 \text{ m}^3/\text{s} = 10 \text{ L/s}.$$

$$Q_m = \rho \times Q_v = 1000 \times 0,010 = 10 \text{ kg/s}.$$

D7 — Conservation du débit

$$S_1 = \pi \times 0,16^2/4 \approx 0,02011 \text{ m}^2 ; S_2 = \pi \times 0,10^2/4 \approx 0,007854 \text{ m}^2.$$

$$Q_v = S_1 \times v_1 \approx 0,02011 \text{ m}^3/\text{s}. v_2 = Q_v/S_2 \approx 0,02011/0,007854 \approx 2,56 \text{ m/s}.$$

D8 — Conservation de l'énergie, relation de Bernoulli

$$v = \sqrt{2 \times g \times h} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 15} = \sqrt{294,3} \approx 17,2 \text{ m/s}.$$

D9 — Viscosité

La viscosité traduit les frottements internes du fluide : plus elle est élevée, plus la perte de charge (et donc la pression nécessaire) est importante pour un débit et un circuit donnés (voir formule de Poiseuille, D11).

Méthode : viscosimètre à chute de bille (temps de chute d'une bille calibrée, loi de Stokes) ou viscosimètre rotatif.

D10 — Nombre de Reynolds. Régimes laminaire et turbulent

$$Re = \rho \times v \times D/\eta = 1000 \times 0,5 \times 0,1/0,001 = 50\,000. Re \gg 4000 \rightarrow \text{régime turbulent}.$$

D11 — Perte de charge en régime laminaire

$$D^4 = 0,025^4 \approx 3,906 \times 10^{-7} \text{ m}^4.$$

$$\Delta p = (128 \times 0,08 \times 15 \times 8 \times 10^{-5}) / (\pi \times 3,906 \times 10^{-7}) \approx 0,01229 / 1,227 \times 10^{-6} \approx 10\,013 \text{ Pa} \approx 10,0 \text{ kPa}.$$

Évaluation — Domaine D : réponses

1. D1 — Réponse : B. $p = F / S$

La pression est définie par $p = F/S$; une pression modeste peut engendrer une force considérable sur une grande surface.

2. D2 — Réponse : B. De la hauteur de fluide au-dessus du point considéré ($p = \rho gh$)

La relation fondamentale de l'hydrostatique $p = \rho \times g \times h$ montre que la pression augmente linéairement avec la hauteur de fluide, indépendamment de la forme du récipient.

3. D3 — Réponse : B. D'un vérin hydraulique

Dans un fluide incompressible au repos, la pression se transmet intégralement en tout point : un vérin hydraulique démultiplie ainsi une force par le rapport des surfaces des pistons.

4. D4 — Réponse : B. Réellement immergé de l'objet

Seul compte le volume réellement immergé dans le fluide, pas le volume total de l'objet.

5. D5 — Réponse : B. La tension superficielle et le phénomène de mouillage

La capillarité résulte de la tension superficielle et du mouillage : plus un matériau est poreux capillairement, plus il est vulnérable à l'humidité, au gel et à la corrosion des armatures.

6. D6 — Réponse : B. $Q_m = \rho \times Q_v$

$Q_m = \rho \times Q_v$ relie directement les deux types de débit pour un fluide de masse volumique ρ donnée.

7. D7 — Réponse : A. Le produit $S \times v$ est constant le long de la conduite

$Q_v = S \times v = \text{constante}$: une réduction de section entraîne mécaniquement une augmentation de la vitesse d'écoulement.

8. D8 — Réponse : B. De l'énergie totale (pression, cinétique, potentielle de pesanteur)

$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gz = \text{constante}$: la relation de Bernoulli traduit un échange entre pression, énergie cinétique et énergie potentielle, à énergie totale constante.

9. D9 — Réponse : B. Les frottements internes lors de l'écoulement

La viscosité traduit les frottements internes d'un fluide en écoulement : elle augmente les pertes de charge et conditionne le choix des paramètres de mise en œuvre (coulis, bitume, béton).

10. D10 — Réponse : B. Supérieur à 4000

$Re < 2000$ correspond à un régime laminaire, $Re > 4000$ à un régime turbulent — la majorité des écoulements d'eau dans les réseaux de travaux publics sont turbulents.

11. D11 — Réponse : B. L'inverse du diamètre à la puissance 4 ($\Delta p \propto 1/D^4$)

$\Delta p = 128 \times \eta \times L \times Q_v / (\pi \times D^4)$: en $1/D^4$, un tuyau plus étroit augmente très fortement la perte de charge à débit constant.

DOMAINE E

Corrigés — Thermique

E1 — Propriétés thermoélastiques des matériaux

$$\Delta T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}. \Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 45 \times 30 = 0,0162 \text{ m} = 16,2 \text{ mm}.$$

E2 — Modes de transfert thermique

Convection dans l'eau en mouvement (transfert entre l'eau et la paroi interne) ; conduction à travers la paroi de la canalisation, l'isolant éventuel, puis le sol environnant, de proche en proche.

Rayonnement négligeable ici (pas de surface exposée à l'air libre avec un fort écart de température).

E3 — Flux thermique transféré par conduction en régime permanent. Résistance thermique

$$R_{th} = e/(\lambda \times S) = 0,080/(0,04 \times 12) = 0,080/0,48 \approx 0,1667 \text{ K/W}.$$

$$\varphi = (T_1 - T_2)/R_{th} = (19 - (-3))/0,1667 = 22/0,1667 \approx 132 \text{ W}.$$

Évaluation — Domaine E : réponses

1. E1 — Réponse : B. $\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T$

$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T$ est la relation clé de la dilatation linéique ; les coefficients approchés 2α et 3α s'appliquent respectivement à la dilatation surfacique et volumique.

2. E2 — Réponse : C. Le rayonnement

Le rayonnement thermique se propage par ondes électromagnétiques, sans nécessiter de support matériel, contrairement à la conduction (à travers la matière) et à la convection (par déplacement de matière dans un fluide).

3. E3 — Réponse : B. $R_{th} = e / (\lambda \times S)$

$R_{th} = e/(\lambda \times S)$: plus la résistance thermique est grande, plus le flux de déperdition $\varphi = \Delta T/R_{th}$ est faible — augmenter e ou choisir un λ plus faible réduit les pertes.

DOMAINE F**Corrigés — Vibrations et ondes****F1 — Réponse d'un oscillateur mécanique à une excitation**

Exemples : compacteur à plaque vibrante ($\approx 60\text{-}100\text{ Hz}$) ; passage d'engins lourds sur sol inégal (quelques Hz) ; brise-roche hydraulique (quelques dizaines de Hz). (Réponses indicatives, à adapter selon le matériel étudié en classe.)

F2 — Oscillations libres ou forcées, amortissement

- 1) Régime libre (pas d'excitation entretenue, le système évolue seul après relâchement).
- 2) Régime pseudopériodique : le système oscille plusieurs fois tout en s'amortissant, contrairement à un régime apériodique qui reviendrait au repos sans osciller.

F3 — Résonance mécanique

La fréquence d'excitation ($2,0\text{ Hz}$) est très proche de f_0 ($2,1\text{ Hz}$) : risque significatif de résonance, pouvant amplifier fortement les oscillations.

Prévention : limiter le nombre de piétons simultanés, installer des amortisseurs accordés, ou décaler la fréquence propre de l'ouvrage hors de la gamme usuelle des cadences de marche ($1,5\text{-}2,5\text{ Hz}$).

F4 — Onde acoustique. Pression acoustique. Célérité

$$c = L/t = 14/(3,5 \times 10^{-3}) = 4000\text{ m/s.}$$

Cette valeur correspond à celle d'un béton sain et compact : pas de défaut majeur détecté sur ce trajet de mesure.

F5 — Son pur. Fréquence, période, amplitude. Longueur d'onde

$$\lambda = c/f = 5900/50\,000 = 0,118\text{ m} = 118\text{ mm.}$$

F6 — Son complexe, bruit

Le pic à 25 Hz correspond probablement à la fréquence de rotation d'un élément mécanique (moteur, malaxeur), les pics à 50 et 75 Hz étant ses harmoniques.

Action : capotage ou isolation acoustique de l'élément tournant identifié, plutôt qu'une action générale sur toute l'installation.

F7 — Intensité d'une onde acoustique et niveau sonore

$$I_1 = I_0 \times 10^{(75/10)} = 10^{-12} \times 10^{7,5} \approx 3,162 \times 10^{-5}\text{ W/m}^2. \quad I_{\text{total}} = 3 \times I_1 \approx 9,487 \times 10^{-5}\text{ W/m}^2.$$

$$L_{\text{total}} = 10 \times \log(9,487 \times 10^{-5}/10^{-12}) \approx 79,8\text{ dB.}$$

F8 — Réflexion, transmission, absorption d'une onde acoustique

La face dense (peu absorbante) côté route réfléchirait fortement le bruit vers la chaussée, pouvant amplifier le niveau perçu par les autres usagers (réflexions multiples).

Côté riverains, l'effet de transmission (limité par la masse, toujours présente dans le panneau) resterait globalement similaire, mais l'effet de réflexion vers la route serait dégradé.

F9 — Perception sonore humaine. Protection acoustique : normes et équipement de protection individuel (EPI)

88 dBA dépasse la valeur limite d'exposition (VLE = 87 dBA, niveau reçu protection comprise) : situation non conforme si mesurée protection comprise.

Mesures : port obligatoire d'une protection auditive adaptée, actions prioritaires de réduction du bruit à la source, information/formation du salarié.

F10 — Sources lumineuses

Le projecteur LED offre généralement un bien meilleur indice de rendu des couleurs (IRC) que la lampe au sodium, dont le spectre à raies restitue très mal les couleurs.

Pour distinguer des couleurs de câbles, le projecteur LED est donc préférable.

F11 — Photométrie

$$E = I/d^2 = 25\,000/10^2 = 250 \text{ lx.}$$

Valeur supérieure à l'exigence de 150 lx : le projecteur convient pour cette zone à cette distance.

F12 — Transmission et absorption de la lumière par un matériau. Filtres

Un filtre à indice élevé absorbe davantage de rayonnement (UV, IR, intensité visible) : meilleure protection rétinienne, mais moins de lumière transmise donc travail plus difficile à visualiser.

Le choix doit être adapté à l'intensité du rayonnement émis par le procédé de soudage utilisé, pour garantir une protection suffisante tout en conservant une visibilité de travail acceptable.

Évaluation — Domaine F : réponses

1. F1 — Réponse : B. Une vibration mécanique

Un accéléromètre permet d'enregistrer objectivement une vibration mécanique, première étape pour situer une source sur l'échelle des fréquences.

2. F2 — Réponse : B. À la fréquence propre f_0 du système

Une oscillation libre se fait à la fréquence propre f_0 du système, par opposition à l'oscillation forcée qui suit la fréquence f de l'excitation extérieure.

3. F3 — Réponse : B. La fréquence d'excitation f est proche de la fréquence propre f_0 du système

Quand f (excitation) se rapproche de f_0 (fréquence propre), l'amplitude des oscillations devient maximale : c'est la résonance, exploitée en compactage mais à éviter pour les ouvrages sensibles.

4. F4 — Réponse : B. Est plus grande dans les solides denses (béton, acier) que dans l'air

La célérité du son dépend fortement du milieu, et elle est très supérieure dans les solides denses par rapport à l'air — principe exploité en auscultation sonore.

5. F5 — Réponse : B. $c = \lambda \times f$

$c = \lambda \times f$ est la relation à mobiliser systématiquement pour relier fréquence, longueur d'onde et milieu de propagation.

6. F6 — Réponse : B. Une cause mécanique identifiable (rotation, frottement, choc périodique)

Le spectre révèle la « signature » d'une source de bruit : un pic net pointe généralement vers une cause mécanique identifiable et guide le diagnostic.

7. F7 — Réponse : A. 3 dB

Les intensités s'additionnent, pas directement les niveaux en dB : doubler le nombre de sources identiques n'augmente le niveau que d'environ 3 dB.

8. F8 — Réponse : A. Réflexion, transmission et absorption

Réflexion, transmission et absorption se partagent l'énergie incidente ; un écran acoustique efficace combine généralement une forte absorption et une forte masse (limitation de la transmission).

9. F9 — Réponse : B. La sensibilité réelle de l'oreille humaine selon la fréquence

Le dBA pondère le niveau sonore physique brut pour refléter la sensibilité réelle de l'oreille humaine, contrairement au dB physique non pondéré.

10. F10 — Réponse : B. Un mauvais IRC malgré un bon rendement énergétique

Une source à raies a souvent un mauvais IRC malgré un bon rendement énergétique : un compromis à connaître pour choisir un éclairage adapté à l'usage.

11. F11 — Réponse : B. En $1/d^2$ (carré inverse de la distance)

$E = I/d^2$: l'éclairement décroît très rapidement avec la distance à la source, selon la loi du carré inverse.

12. F12 — Réponse : A. Réflexion

Transmission, absorption et réflexion se partagent l'énergie lumineuse incidente sur un matériau ; un filtre de protection est choisi selon son spectre de transmission adapté au risque à observer.

DOMAINE G

Corrigés — Électricité

G1 — Intensité, tension

$$U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2} = 400 \times 1,414 \approx 566 \text{ V.}$$

Domaine BT (basse tension, entre 50 V et 1000 V en alternatif).

G2 — Puissance électrique en régime continu et en régime sinusoïdal

$$S = U \times I = 230 \times 15 = 3450 \text{ VA} = 3,45 \text{ kVA.}$$

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) = 230 \times 15 \times 0,75 \approx 2588 \text{ W} \approx 2,59 \text{ kW.}$$

G3 — Sécurité électrique, risques et protection du matériel et des personnes

1) Contact indirect (masse métallique accidentellement mise sous tension par un défaut, pas de contact avec une partie active directement).

2) Le disjoncteur différentiel (associé à la mise à la terre de la carcasse), seuil de haute sensibilité de 30 mA pour la protection des personnes.

Évaluation — Domaine G : réponses

1. G1 — Réponse : B. $U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2}$

$U_{\text{crête}} = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2}$; il faut toujours préciser si une grandeur électrique est continue ou alternative, et si une valeur donnée est efficace ou crête.

2. G2 — Réponse : B. $P = U \times I \times \cos(\varphi)$

$P = U \times I \times \cos(\varphi)$ est la puissance active en régime sinusoïdal (φ étant le déphasage) ; $S = U \times I$ est la puissance apparente qui dimensionne le matériel. En continu, $P = U \times I$ simplement.

3. G3 — Réponse : B. Le disjoncteur différentiel

Le disjoncteur différentiel à haute sensibilité (30 mA), associé à la mise à la terre des masses, protège les personnes contre les contacts indirects ; le fusible/disjoncteur classique protège le matériel contre les surintensités.