

## Exercice 1 : Etude d'un réseau de Trolleybus à Limoges



### 1. Mise en situation

En France, le transport représente environ un tiers de la consommation totale d'énergie. Il est basé à 98% sur la combustion de carburants fossiles, majoritairement dérivés du pétrole. Cette consommation génère différentes nuisances :

- Épuisement des ressources fossiles,
- Augmentation de l'effet de serre,
- Émission de divers polluants nocifs pour l'environnement et pour l'homme,
- Nuisances sonores.

La plupart des grandes villes mettent alors en place un réseau de transports en commun pour réduire le trafic automobile et pour garantir la mobilité des personnes n'ayant pas accès aux moyens de transport individuels.

Ces réseaux sont le plus souvent basés sur l'utilisation d'autobus à moteur diesel qui génèrent également des nuisances environnementales.

Certaines villes ont fait le choix de véhicules de transport en commun alimentés par l'énergie électrique, le plus courant étant le tramway.

L'agglomération de Limoges, quant à elle, est équipée depuis de nombreuses années de trolleybus. Il s'agit de véhicules équipés de pneumatiques, roulant sur les mêmes chaussées que les autobus, mais alimentés électriquement par des lignes aériennes.

Le coût d'investissement de ce moyen de transport est bien moindre que celui d'un réseau de tramway, pour des bénéfices environnementaux similaires.

Le trolleybus est, de plus, particulièrement adapté au relief important de la ville.



## 2. Comparer les impacts environnementaux de plusieurs modes de transport

Dans cette partie, nous allons comparer les impacts environnementaux liés à l'utilisation du trolleybus, de l'autobus et de la voiture particulière.

Les trolleybus et autobus exploités par la STCL sont développés par la société IRISBUS et ont comme noms commerciaux respectivement CRISTALIS et CITELIS. Le véhicule particulier utilisé pour l'étude comparative sera une voiture RENAULT CLIO 1.5dCi.

Le tableau suivant permet de comparer les émissions de gaz à effet de serre produits par l'utilisation des différents véhicules. Les résultats proviennent de la méthode Bilan Carbone® développée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

			
Type véhicule	Trolleybus	Autobus	Voiture particulière
Nom commercial	CRISTALIS	CITELIS	CLIO
Energie d'alimentation	Electricité	Gazole	Gazole
Consommation moyenne	2,7 kWh pour 1 km = 9,72 MJ.km <sup>-1</sup>	42 L pour 100 km	4 L pour 100 km
Emission de gaz à effet de serre	92 g Eq CO <sub>2</sub> /km	1409 g Eq CO <sub>2</sub> /km	127 g Eq CO <sub>2</sub> /km
	g Eq CO <sub>2</sub> = gramme équivalent CO <sub>2</sub>		
Nombre de personnes transportées	96 maxi	105 maxi	5 maxi

Tableau 1. Caractéristiques des véhicules

**Q.1.** Déterminer l'émission de gaz à effet de serre par passager pour chacun des véhicules lorsqu'il est à son remplissage maximal. Classer alors les véhicules en fonction de leurs performances en termes d'émission de gaz à effet de serre.

Le remplissage moyen constaté pour les trajets en véhicule particulier est de 1,3 passagers par véhicule.

**Q.2.** Comparativement au remplissage moyen d'un véhicule automobile, déterminer à partir de combien de passagers les autres modes de transport sont plus performants concernant l'émission de gaz à effet de serre.

Nous allons maintenant évaluer les quantités d'énergies primaires nécessaires à l'utilisation du trolleybus. Il faut intégrer pour cela les rendements de l'acheminement et de la distribution d'électricité visibles sur le document réponse DR1. La largeur des flèches sur le diagramme de flux est proportionnelle à la quantité d'énergie qui transite.

**Q.3.** A partir des rendements de l'alimentation et du transport d'électricité, déterminer et inscrire près des flèches de flux du document réponse DR1, l'énergie électrique nécessaire (en  $\text{MJ.km}^{-1}$ ) en sortie et en entrée du réseau de transport d'électricité (acheminement et distribution).

Nous aurons ensuite besoin de la répartition des sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité en France, représentée sur le graphique suivant.

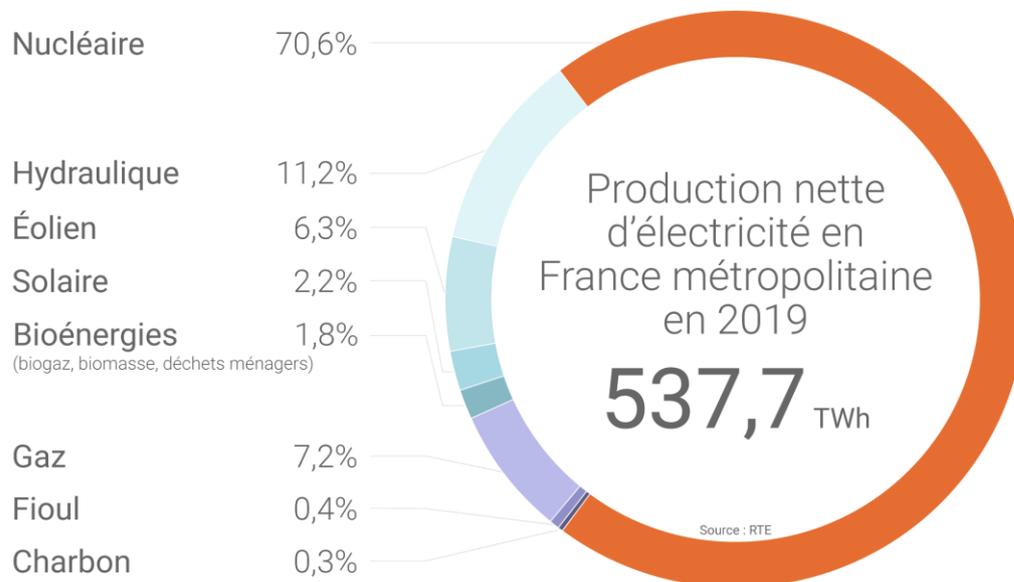


Figure 1. Bouquet énergétique français de la production d'électricité en 2019 (source RTE)

**Q.4.** Classer les différents modes de production d'électricité de la Figure 1 en trois groupes : énergies renouvelables, énergies fossiles ou énergie fissile (fission nucléaire). Répondre sur la copie. Déterminer la part d'électricité (en %) de chacun des trois groupes d'énergies (renouvelable, fossile et fissile) et en déduire l'énergie consommée correspondante (en  $\text{MJ.km}^{-1}$ ). Reporter ces valeurs sur le diagramme de flux énergétique du document réponse DR1.

**Q.5.** A partir des rendements énergétiques de chacun des modes de production d'électricité, en déduire les quantités d'énergie primaire nécessaire au fonctionnement du trolleybus (en  $\text{MJ.km}^{-1}$ ). Reporter ces valeurs près de chaque flèche du diagramme de flux sur le document réponse DR1.

Nous nous intéressons à présent à l'utilisation de l'autobus à moteur diesel, nécessitant du gazole comme carburant nécessaire à son fonctionnement.

Le diagramme de flux du document DR1 permet de remonter à l'énergie primaire nécessaire.

On donne le pouvoir calorifique du gazole :  $C = 38\,080 \text{ kJ.L}^{-1}$ .

**Q.6.** A partir du pouvoir calorifique du gazole, convertir la consommation de l'autobus en  $\text{MJ.km}^{-1}$  et la reporter sur le diagramme de flux. A l'aide du rendement du processus de raffinage, en déduire la quantité d'énergie primaire nécessaire et la reporter sur le diagramme.

**Q.7.** Au regard de plusieurs critères environnementaux (production de gaz à effet de serre, consommation de ressources non renouvelables, etc.) conclure sur la pertinence du trolleybus par rapport au bus à moteur diesel.

### 3. Etude de la chaîne de puissance d'un trolleybus

Dans cette partie, nous allons vérifier si la motorisation des trolleybus est adaptée à leur usage urbain.

En l'absence de pente, pour avancer à vitesse constante, un véhicule doit lutter principalement contre les efforts suivants :

- La résistance au roulement due à la déformation des pneumatiques,
- La traînée aérodynamique due aux frottements de l'air autour de la carrosserie.

Le graphique suivant montre l'évolution théorique de la puissance nécessaire pour déplacer le véhicule en fonction de sa vitesse (sur le plat et à vitesse constante) :

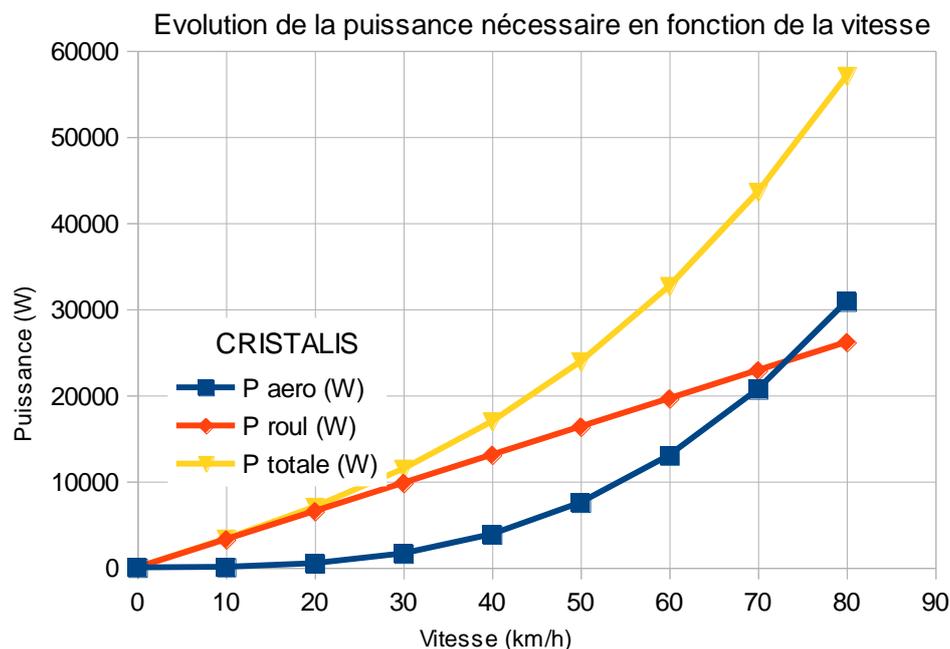


Figure 2. Puissance utile sur le plat à vitesse constante

**Q.8.** A partir du graphique précédent, déterminer à partir de quelle vitesse les effets aérodynamiques deviennent supérieurs à la résistance au roulement. En déduire contre quel type d'effort doit lutter principalement le trolleybus dans les conditions normales d'utilisation (circulation en ville).

Les organes de la chaîne de puissance du trolleybus et leurs caractéristiques sont donnés dans le Tableau 2, page suivante.

En fonctionnement normal, le trolleybus est alimenté électriquement par 2 lignes aériennes conductrices (LAC) via deux perches.

En l'absence de réseau électrique, le trolleybus peut fonctionner de façon autonome (mode secours) grâce à un moteur thermique et une génératrice produisant de l'énergie électrique (voir document technique).

Désignation	Illustration	Paramètres énergétiques	Paramètres cinématiques
Moteur thermique diesel		Puissance mécanique maximale : $P_{dies-m} = 92 \text{ kW}$ (125 ch) Rendement : $\eta_{dies} = 0,30$	Fréquence de rotation maximale : $N_{dies-m} = 4500 \text{ tr. min}^{-1}$
Génératrice		Rendement : $\eta_{gen} = 0,90$	
Coffre d'alimentation électrique		Rendement : $\eta_{alim} = 0,95$	
Moteur asynchrone triphasé		Puissance mécanique maximale : $P_{mot-m} = 60 \text{ kW}$ Rendement : $\eta_{mot} = 0,90$	Fréquence de rotation maximale : $N_{mot-m} = 8817 \text{ tr. min}^{-1}$
Réducteur à engrenages (trains épicycloïdaux)		Rendement : $\eta_{red} = 0,95$	Rapport de transmission : $k = 0,05055$
Roue			Diamètre des pneumatiques : $D = 0,981 \text{ m}$

Tableau 2. Caractéristiques cinématiques et énergétiques des organes de la chaîne d'énergie

**Q.9.** Sur le diagramme de blocs internes SysML du document réponse DR2, indiquer la nature des énergies (mécanique de rotation, mécanique de translation, électrique ou thermique) sur chaque connexion de flux.

D'après les courbes de la Figure 2, la puissance utile nécessaire au déplacement sur le plat à une vitesse constante de  $50 \text{ km.h}^{-1}$  est  $P_{ut-50} = 24 \text{ kW}$ .

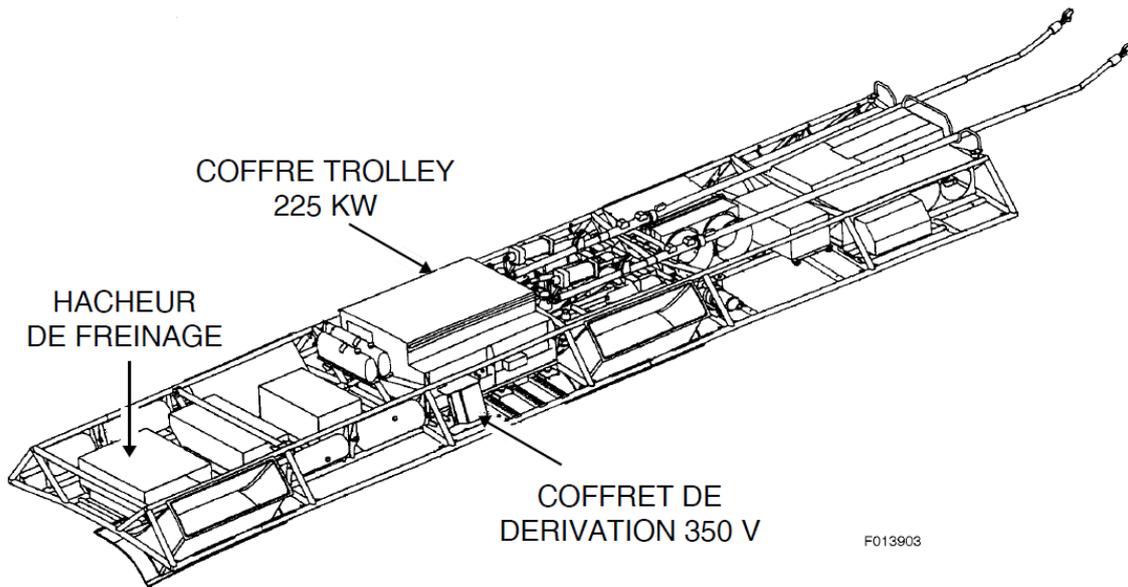
**Q.10.** A partir des données énergétiques du Tableau 2, calculer la puissance mécanique minimale  $P_{dies-50}$  du moteur thermique pour rouler dans ces conditions, en l'absence de réseau électrique. Conclure sur la pertinence du choix de la puissance du moteur thermique effectivement utilisé.

Quel que soit le mode de fonctionnement (normal ou secours) c'est le moteur électrique qui transmet la puissance aux roues via le réducteur.

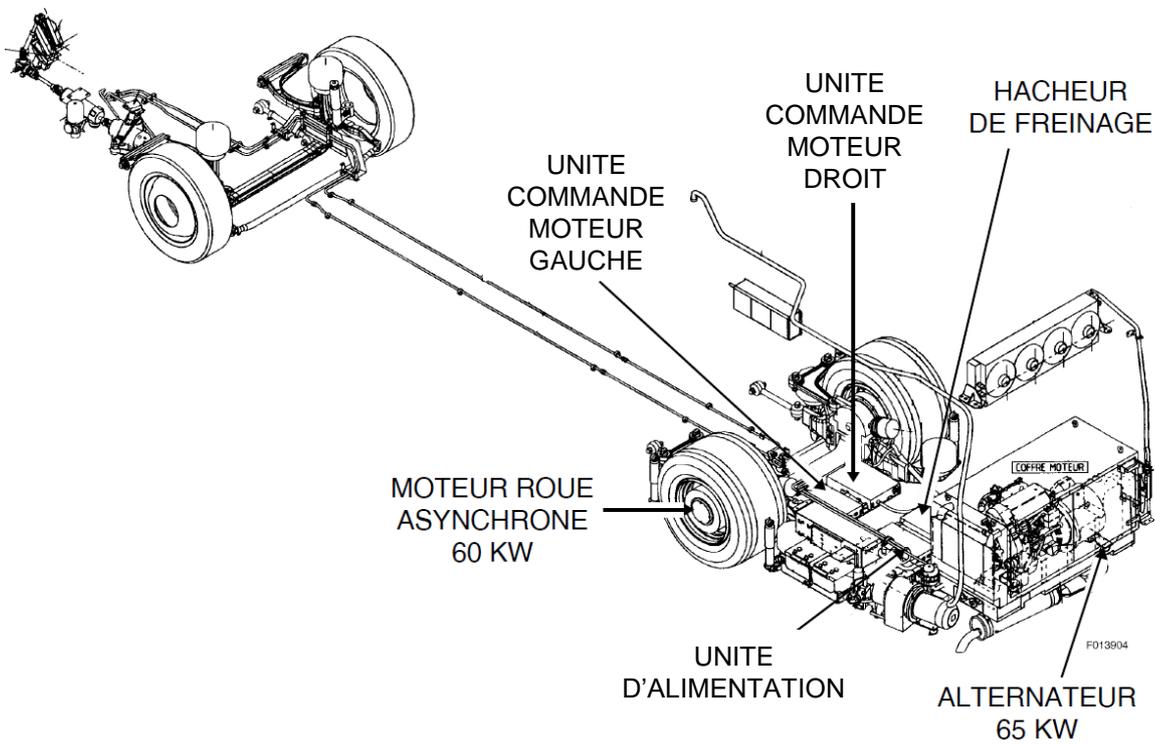
**Q.11.** A partir des données cinématiques du Tableau 2, connaissant la fréquence de rotation maximale du moteur électrique, **calculer** la vitesse d'avance maximale du trolleybus  $V_{maxi}$  en  $\text{km.h}^{-1}$ . **Conclure** sur la pertinence de cette vitesse pour une utilisation urbaine du véhicule.

## Document technique : implantation des composants sur les trolleybus CRISTALIS

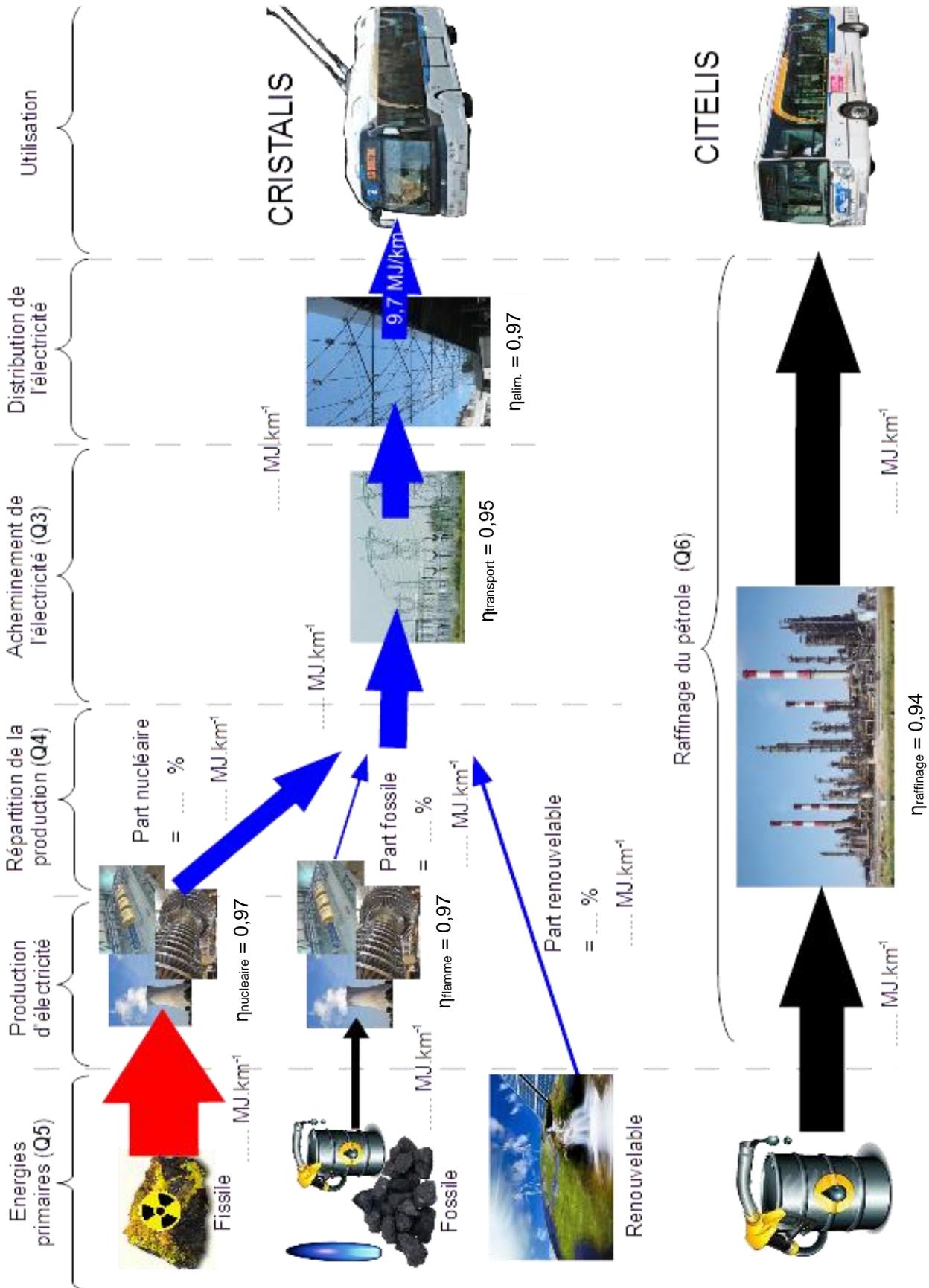
### Chaîne d'alimentation électrique en toiture :



### Chaîne de traction en soubassement :

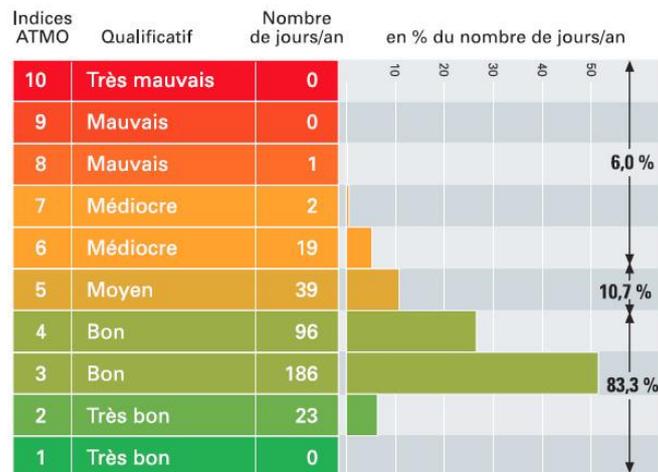


Document Réponse DR1





## Exercice 2 : Surveillance de la qualité de l'air extérieur



### 4. Mise en situation

La Loi cadre sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) reconnaît à chacun le droit de respirer un air qui ne nuise pas à la santé. Il s'agit d'un enjeu de santé publique.

Traduite dans le code de l'environnement, cette loi rend obligatoire, pour l'État, la surveillance de la qualité de l'air, la définition d'objectifs de qualité et l'information du public.

Depuis le 1er janvier 2000, cette surveillance porte sur l'ensemble du territoire national. L'État délègue cette mission à 27 associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) regroupées au sein de la fédération ATMO.

Les AASQA exercent une surveillance permanente de l'air de leur région.

Elles s'appuient pour cela sur :

- des dispositifs de mesures en continu de polluants réglementés présents dans l'air ;
- des outils informatiques d'analyse et de simulation, pour cartographier la pollution dans l'atmosphère.

Les AASQA surveillent de nombreux polluants qui dépendent de spécificités locales.

L'indice ATMO est cependant établi à partir de la surveillance de 4 polluants :

- PM<sub>10</sub> : particules en suspension de diamètre inférieur à dix micromètres
- O<sub>3</sub> : ozone
- SO<sub>2</sub> : dioxyde de soufre
- NO<sub>2</sub> : dioxyde d'azote

Les AASQA mettent à disposition des différents acteurs les résultats de ces mesures et de simulations. Elles disposent de stations d'analyse mobiles et de stations fixes

C'est une de ces stations fixes qui fait l'objet de notre étude. (Voir Figure 3 ci-dessous).



Figure 3. Mise en situation de la station fixe étudiée

## 5. Etude de l'exigence globale de protection de la santé publique

La mission globale des AASQA répond à un enjeu de santé publique, car elle contribue à protéger la population.

**Q.12.** À l'aide du document technique DT1, citer deux exemples d'impacts de la pollution de l'air pour chacune des catégories décrites dans le tableau du document réponses DR1. Expliquer sur le document réponses DR1 en quoi le contrôle de ces polluants constitue un enjeu de développement durable.

**Q.13.** Relever les exigences fonctionnelles qui s'imposent aux AASQA dans leur mission de protéger la santé publique.

Une agglomération de 79 849 habitants réalise le relevé de trois polluants :

$$\text{NO}_2 = 3,5 \mu\text{g.m}^{-3} ; \text{O}_3 = 121,3 \mu\text{g.m}^{-3} ; \text{PM}_{10} = 20 \mu\text{g.m}^{-3}$$

**Q.14.** À l'aide du document technique DT3, déterminer pour chaque polluant l'indice correspondant. Justifier le choix de publier l'indice IQa plutôt que l'indice ATMO. Déterminer l'indice IQa publié ce jour-là.

On s'intéresse aux relevés de mesures du polluant  $\text{NO}_2$  durant les journées du 3 au 5 avril 2017, donnés sur le document DR2. Le diagramme d'état du document technique DT4 permet de comprendre quand et comment informer la population.

**Q.15.** À partir des relevés journaliers de la concentration de  $\text{NO}_2$ , indiquer les messages publiés ainsi que les heures correspondantes en complétant le document réponse DR2.

**Q.16.** Indiquer quelles exigences devraient encore être étudiées pour affirmer que la mission « protéger la santé publique » est totalement assurée par les AASQA.

## 6. Etude de solution constructive afin de protéger les intervenants sur les toits des stations fixes

Les opérateurs doivent monter et circuler sur les toits des stations fixes pour effectuer des opérations de maintenance sur les têtes de prélèvement. La réglementation impose que des garde-corps soient installés pour éviter les chutes.

Cette étude est limitée au garde-corps arrière de longueur  $L = 3$  m (voir DT6 et figure ci-dessous à gauche).

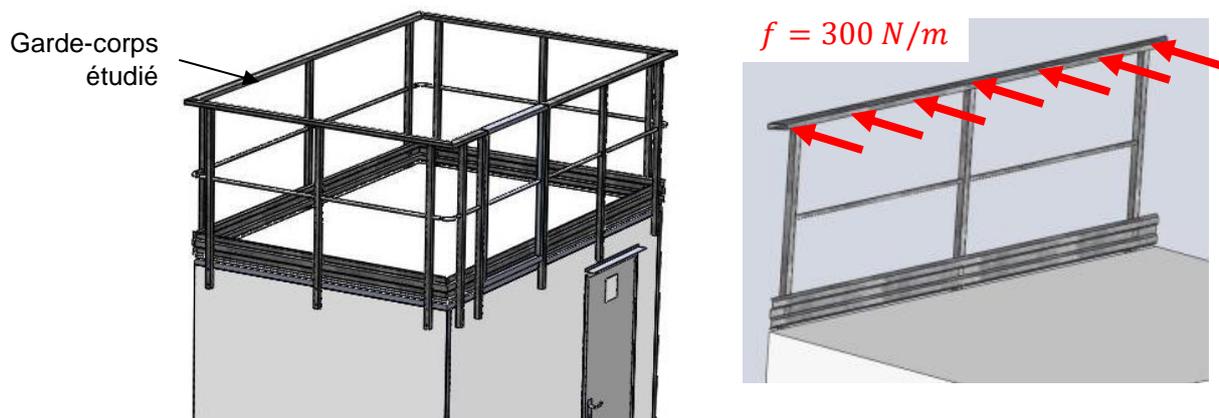


Figure 4. Implantation du garde-corps étudié (à gauche) ; mode de chargement appliqué (à droite)

Extrait du cahier des charges d'une station fixe :

- Exigences de dimensionnement du garde-corps arrière :
  - Résister à une charge linéique horizontale  $f$  de  $300 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  répartie sur la lisse supérieure (main courante);
  - Masse  $< 20$  kg;
  - Coefficient de sécurité  $s = 2$ .
- Exigence environnementale : impact environnemental minimal

**La contrainte** détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. (Pour une traction simple, on peut l'assimiler à la force qui agit sur une unité de surface du matériau). La contrainte est définie comme l'intensité de force à un point donnée du matériau sur une surface infinitésimale Elle est homogène à une pression ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).

Trois matériaux ont été retenus pour réaliser le choix final de la solution de garde-corps : acier, alliage d'aluminium et composite.

Afin de réaliser les simulations mécaniques qui permettront de valider la résistance du garde-corps, les actions mécaniques extérieures ont été définies et positionnées selon le mode de chargement donnée sur la Figure 4.

Les montants verticaux du garde-corps sont vissés sur la station au niveau de leur partie inférieure. La liaison mécanique ainsi réalisée est une liaison encastrement.

**Q.17.** Indiquer le type de sollicitation mécanique (traction, compression ou flexion simple) auquel sont soumis les montants verticaux du garde-corps.

Une étude préliminaire a permis de valider la résistance des garde-corps en acier et en composite (voir DR3). On souhaite maintenant étudier la résistance mécanique du garde-corps en alliage d'aluminium. Les résultats de la simulation sont indiqués sur le document technique DT5.

**Q.18.** À partir du document technique DT5, indiquer sur votre copie les valeurs de la limite élastique  $R_e$  et de la contrainte maximale  $\sigma_{maxi}$ . Vérifier si la condition de résistance est satisfaite. Sur le document réponses DR3, entourer la réponse correcte dans la ligne condition de résistance mécanique.

Les caractéristiques techniques et environnementales des trois solutions constructives de garde-corps sont résumées dans le document réponses DR3.

**Q.19.** Déterminer la masse, la consommation d'énergie primaire et l'empreinte CO<sub>2</sub> du garde-corps en alliage d'aluminium (sur DR3). Sur feuille de copie, comparer les impacts environnementaux des trois solutions.

**Q.20.** Choisir la solution constructive permettant de protéger les intervenants sur le toit de la station tout en respectant les exigences du cahier des charges. Justifier la réponse.

## Document technique DT1 : Les impacts de la pollution de l'air extérieur

### Les quatre polluants constituant l'indice ATMO :



Les particules de taille inférieure à 10 micromètres pénètrent dans l'appareil respiratoire : altération de la fonction respiratoire, effets cardio-vasculaires, propriétés mutagènes et cancérigènes. Salissures des bâtiments et des monuments.



Gaz oxydant qui exerce une action irritante locale sur les muqueuses oculaires et respiratoires. Les effets sont amplifiés par l'exercice physique. Effet néfaste sur la végétation et sur certains matériaux (caoutchouc) ; contribue à l'effet de serre et aux pluies acides.



Gaz irritant qui peut entraîner une altération de la fonction respiratoire, une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant. Les oxydes d'azote participent aux phénomènes des pluies acides, impactent la couche d'ozone et contribuent à l'effet de serre.



Gaz irritant qui agit avec les particules en suspension, et provoque des irritations oculaires, cutanées et respiratoires : augmentation du taux de mortalité par maladie respiratoire ou cardio-vasculaire. Participe au phénomène des pluies acides ; dégrade la pierre et les monuments.

### Extrait du journal « Le Monde » du 30/04/2015 :

Plus de 1 600 milliards de dollars (1 400 milliards d'euros) : c'est ce que coûte chaque année aux économies européennes les quelque 600 000 décès prématurés et pathologies engendrés par la pollution de l'air ...

Une surmortalité provoquée par des maladies cardiaques et respiratoires, des maladies coronariennes, des accidents vasculaires cérébraux ou encore le cancer du poumon...

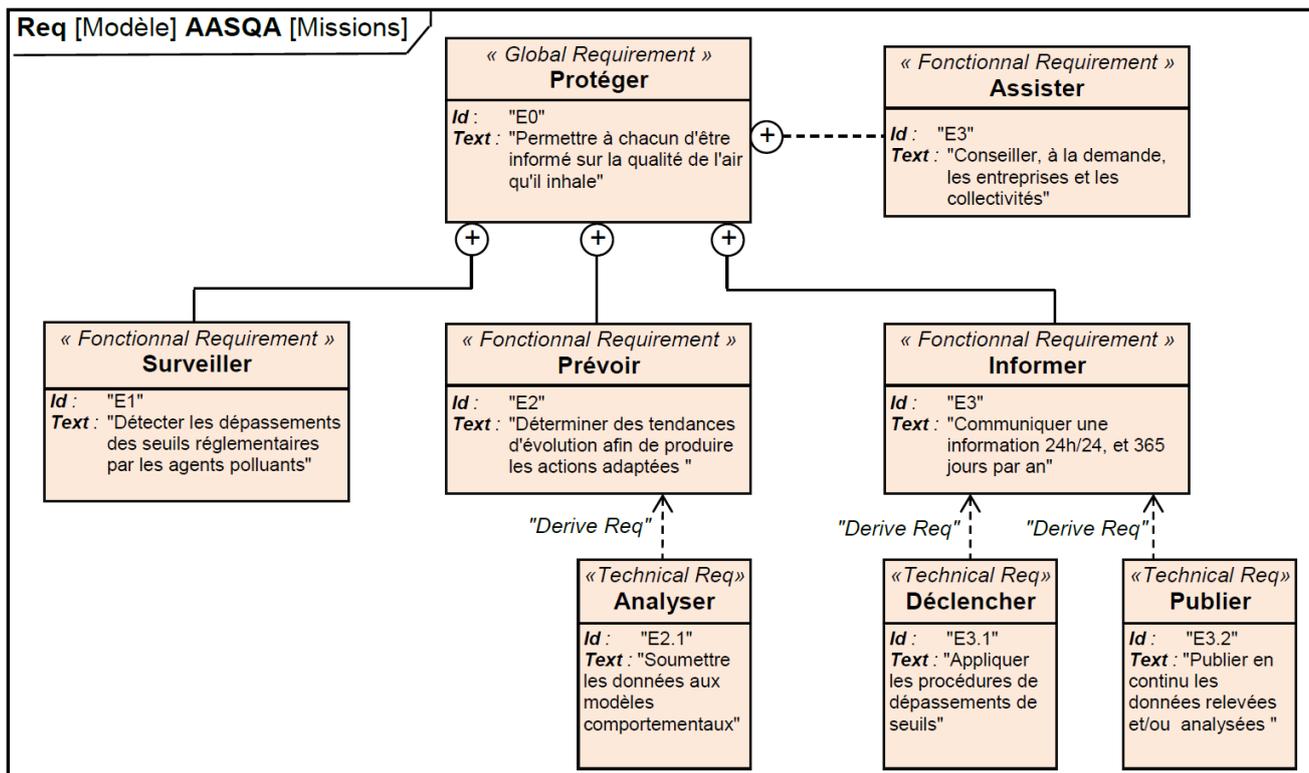
D'autant qu'à ce coût des décès prématurés s'ajoute celui du traitement des maladies provoquées par la pollution ...

En France, ce montant, évalué à 53 295 millions de dollars (48 378 millions d'euros), s'élève à 2,3 % du PIB national ; au Royaume-Uni, à 3,7 %, et en Allemagne, à 4,5 % ...

« L'impact sanitaire de la pollution pèse aussi sur les budgets des administrations publiques, des hôpitaux et des ménages », soulignent les auteurs de l'étude, tout en rappelant que les conséquences de ce fléau ne se limitent pas à la santé mais ont aussi un impact sur la productivité agricole et l'environnement ...

*LVE, journaliste au Monde.*

### Document technique DT2 : Missions des AASQA



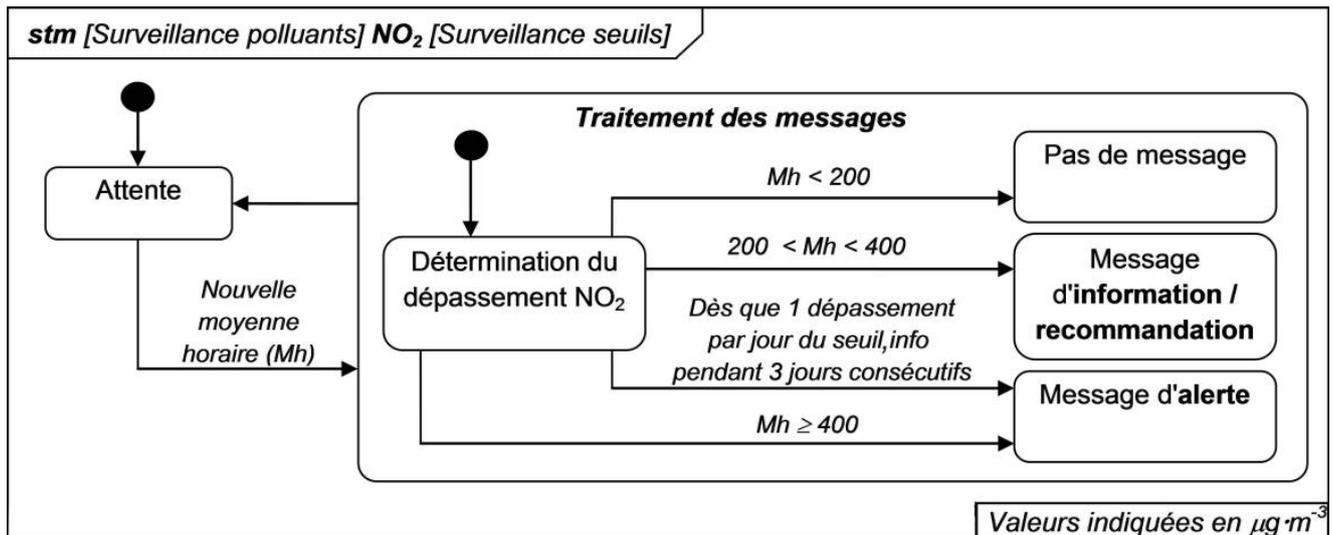
### Document technique DT3 : Directives réglementaires sur la surveillance de l'air

- Calcul indice ATMO obligatoire pour une agglomération de plus de 100 000 habitants :**  
 La surveillance est faite pour 4 polluants (O3, SO2, NO2, PM10). L'indice de chaque polluant est calculé à partir des concentrations mesurées dans l'air ambiant sur la zone géographique et pendant la journée de référence (voir tableau ci-dessous).
- Calcul indice IQa pour une agglomération de moins de 100 000 habitants :**  
 La surveillance des 4 polluants de l'indice ATMO n'est pas obligatoire. On peut ne produire qu'un indice de qualité de l'air simplifié (IQa) à partir de la surveillance de 1, 2 ou 3 des 4 polluants, en fonction des spécificités locales et des moyens disponibles.
- Publication de l'indice :**  
 L'indice publié (ATMO ou IQa) correspond au plus grand des indices des polluants mesurés.

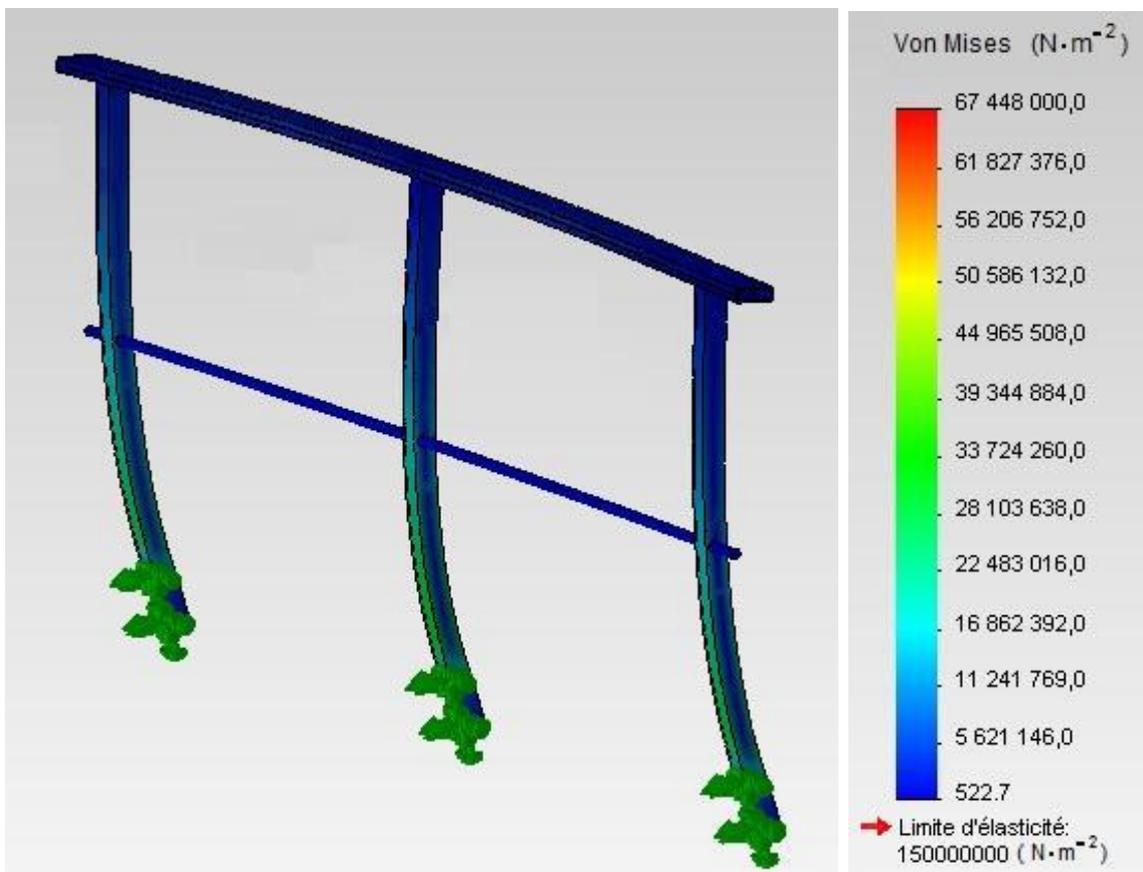
Indice	Qualitatif				
1	Très bon	0 à 29	0 à 39	0 à 29	0 à 9
2		30 à 54	40 à 79	30 à 54	10 à 19
3	Bon	55 à 79	80 à 119	55 à 84	20 à 29
4		80 à 104	120 à 159	85 à 109	30 à 39
5	Moyen	105 à 129	160 à 199	110 à 134	40 à 49
6	Médiocre	130 à 149	200 à 249	135 à 164	50 à 64
7		150 à 179	250 à 299	165 à 199	65 à 79
8		180 à 209	300 à 399	200 à 274	80 à 99
9	Mauvais	210 à 239	400 à 499	275 à 399	100 à 124
10	Très mauvais	≥ 240	≥ 500	≥ 400	≥ 125

Concentrations indiquées en µg/m<sup>3</sup>

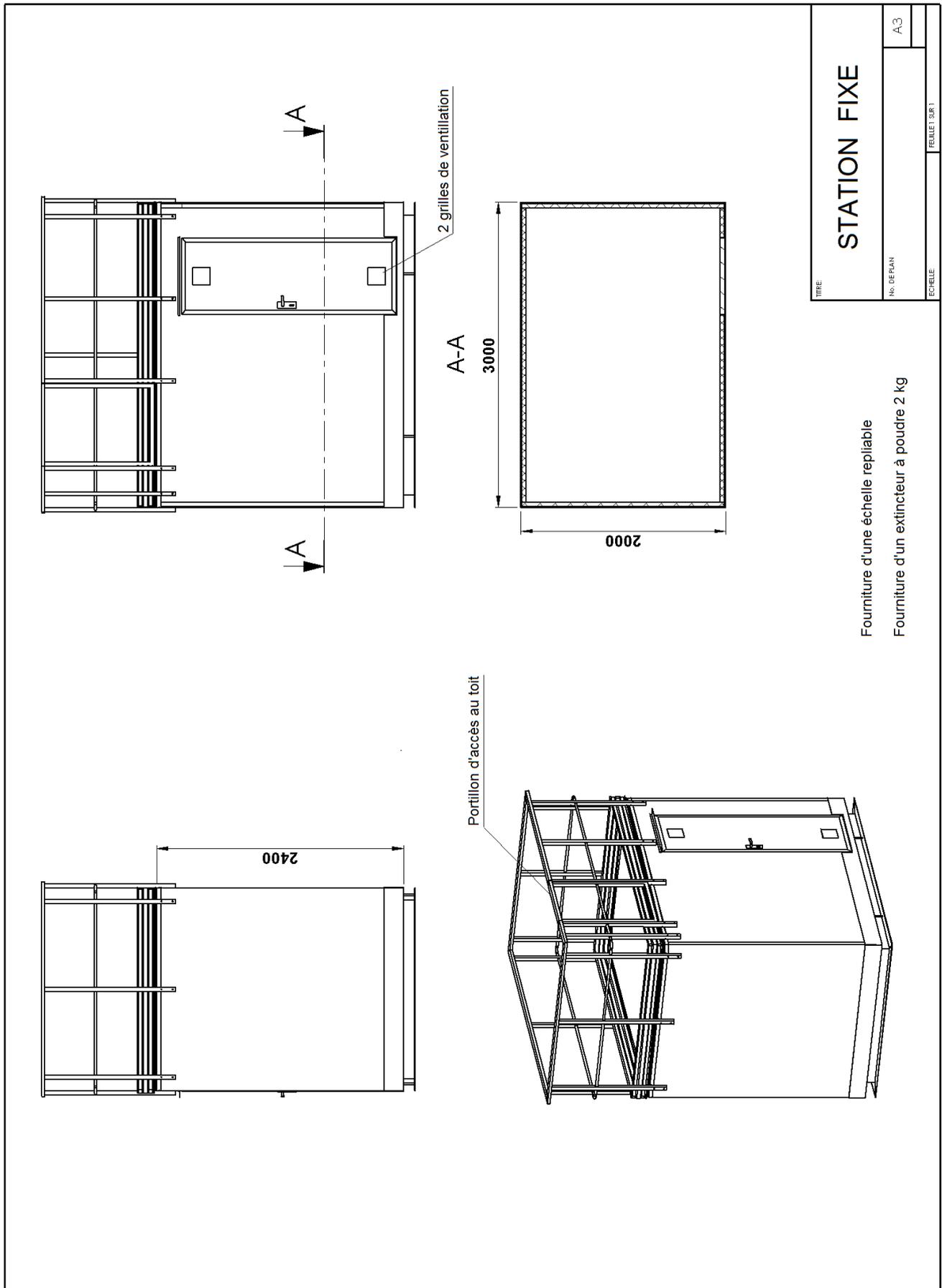
### Document technique DT4 : Diagramme d'état de la surveillance du polluant NO<sub>2</sub>



### Document technique DT5 : Répartition des contraintes $\sigma$ (en N/m<sup>2</sup>) dans la structure



## Document technique DT6 : Plan d'une station fixe



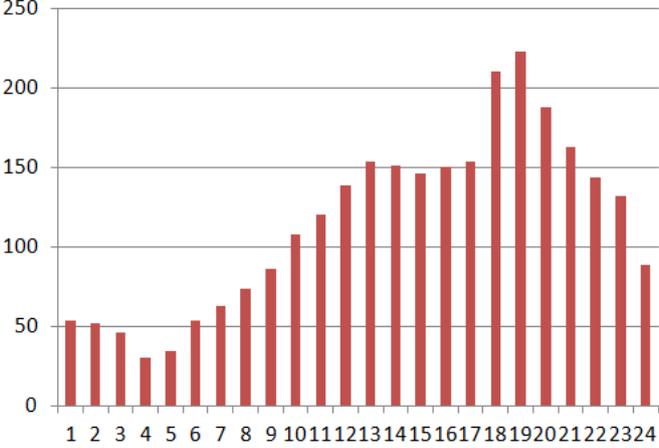
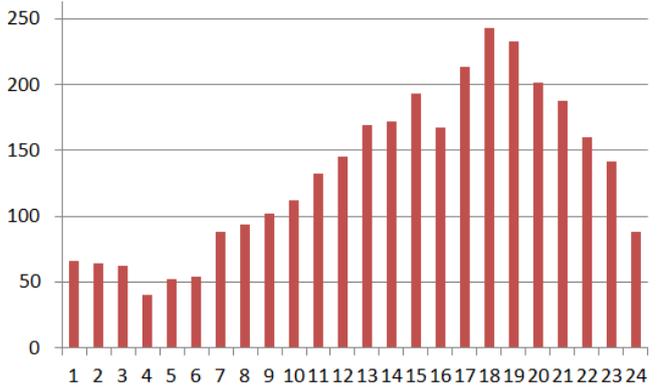
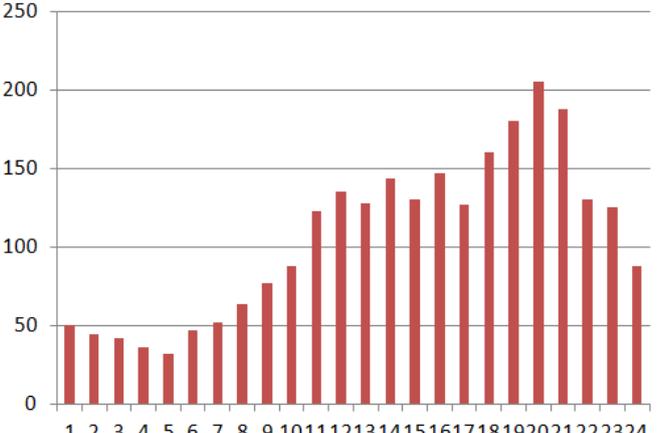
**Document Réponse DR1**

## Impacts des polluants de l'air extérieur

Impact(s) sur l'environnement (écologie)	Exemple : effets néfastes sur la végétation
Impact(s) économique(s)	
Impact(s) sur la santé (social)	

Expliquer en quoi le contrôle de ces polluants constitue un enjeu de développement durable :

**Document réponse DR2**

Concentration du polluant NO <sub>2</sub> en µg.m <sup>-3</sup> en fonction de l'heure de la journée	Message publié au cours de la journée. <b>A compléter</b>
<p>3 avril 2017</p> 	<p>Un message a-t-il été déclenché le 3 avril ?</p> <p><input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON</p> <p>Si oui, quel est le type de message déclenché ?</p> <p><input type="checkbox"/> Information/recommandation <input type="checkbox"/> Alerte</p> <p>A quelle(s) heure(s) ?</p>
<p>4 avril 2017</p> 	<p>Un message a-t-il été déclenché le 4 avril ?</p> <p><input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON</p> <p>Si oui, quel est le type de message déclenché ?</p> <p><input type="checkbox"/> Information/recommandation <input type="checkbox"/> Alerte</p> <p>A quelle(s) heure(s) ?</p>
<p>5 avril 2017</p> 	<p>Un message a-t-il été déclenché le 5 avril ?</p> <p><input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON</p> <p>Si oui, quel est le type de message déclenché ?</p> <p><input type="checkbox"/> Information/recommandation <input type="checkbox"/> Alerte</p> <p>A quelle(s) heure(s) ?</p>

**Document réponse DR3 : Caractéristiques des solutions constructives du garde-corps**

<b>Critère</b>	<b>Solution constructive</b>	<b>Acier</b>	<b>Alliage d'aluminium</b>	<b>Composite (fibre verre polyester)</b>
Condition de résistance mécanique : $\sigma_{maxi} < R_e/s$		Respectée	Respectée	Respectée
		Non respectée	Non respectée	Non respectée
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )		7800	2700	2000
Volume garde-corps (m <sup>3</sup> )		4,87.10 <sup>-3</sup>	5,69.10 <sup>-3</sup>	6,28.10 <sup>-3</sup>
Masse garde-corps (kg)		38		12,6
<b>Impact environnemental</b>				
Energie absorbée production primaire par unité de masse (MJ.kg <sup>-1</sup> )		27	200	160
Energie absorbée production primaire (MJ) du garde-corps		1026		2016
Empreinte CO2 production primaire par unité de masse		1,9	13	10
Empreinte CO2 production primaire (kg) du garde-corps		72,2		126