

**SESSION 2025**

---

**AGREGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR  
ET INGÉNIERIE DES CONSTRUCTIONS**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE  
ORGANISATION**

**Durée : 4 heures**

---

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout autre ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.**

**Tournez la page S.V.P.**

**A**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1416A	102	7048

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1416A	102	7048





## UNITÉ DE MAINTENANCE D'AÉRONEFS

L'étude porte sur la création d'une unité de maintenance d'aéronefs sur Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) se décomposant en :

- une passerelle permettant le passage entre la chaussée et le bâtiment annexe
- un hall de maintenance des aéronefs
- un bâtiment annexe indépendant structurellement

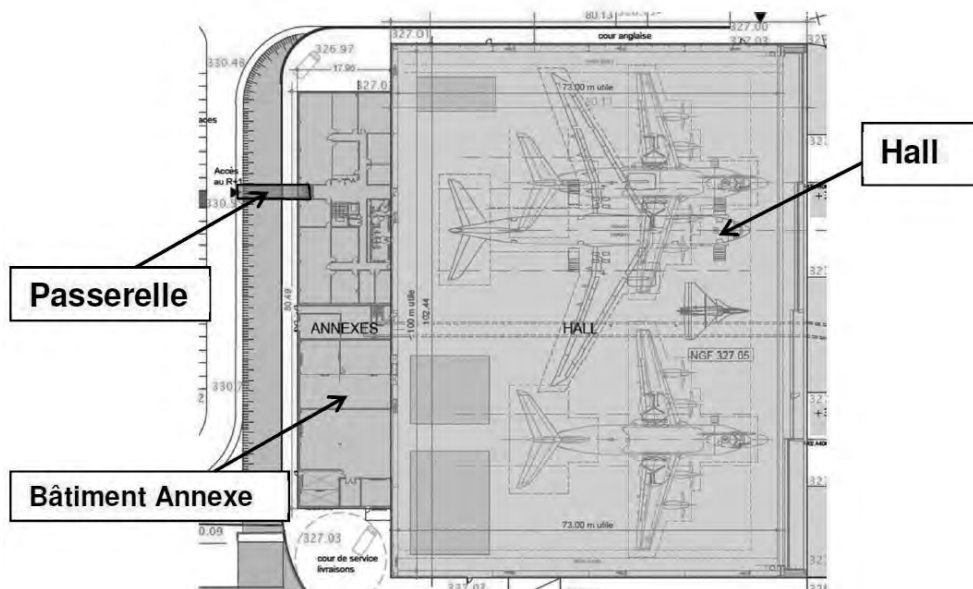


Figure 1 : présentation générale du projet

### La passerelle

La passerelle d'accès permettant d'entrer dans le bâtiment annexe est constituée de deux poutres en HEA400 de longueur 11 m raidie transversalement par 6 IPE220 de 2,12 m de longueur et espacés de 2,20 m et d'un système de contreventement constitués de longerons axiaux (IPE/UPN 160) et de cornières assemblées par boulonnage.

La totalité de la structure hors cornières est prévue en acier de nuance S275 (classe 1).

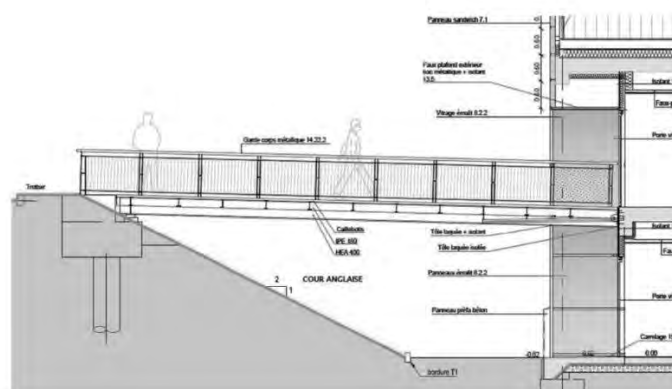


Figure 2 : vue du projet de la passerelle

### **Le hall de maintenance**

La principale contrainte technique de ce hall est de pouvoir effectuer la maintenance d'avions sans aucune entrave au sol. Sa particularité est qu'il n'y a aucun poteau à l'intérieur du bâtiment dont les dimensions au sol sont d'environ 80 m sur 100 m pour une hauteur totale d'environ 35 m. Deux ponts roulants sont prévus permettant une hauteur de travail sous crochet de 22 m.



Figure 3 : vue en perspective du hall de maintenance

Le bâtiment en ossature métallique repose sur un réseau de pieux forés en béton (diamètres 600 et 800) ancrés à 10 m de profondeur. La structure métallique est constituée de poteaux en PRS (Profilés Reconstitués Soudés) de 33 m de hauteur et de poutres treillis de 1,80 m de hauteur et de 100 m de portée environ.

Un système de contreventement horizontal et vertical assure la stabilité au vent. Une grande porte coulissante à plusieurs vantaux permet de faire entrer les aéronefs. Les files des poutres treillis sont référencées de A à F (voir document technique DT2). La figure 4 illustre le plan de la toiture constitué d'un réseau de pannes IPE2 espacées de 2,83 m et d'un réseau de tubes servant de poutre au vent et de contreventement.

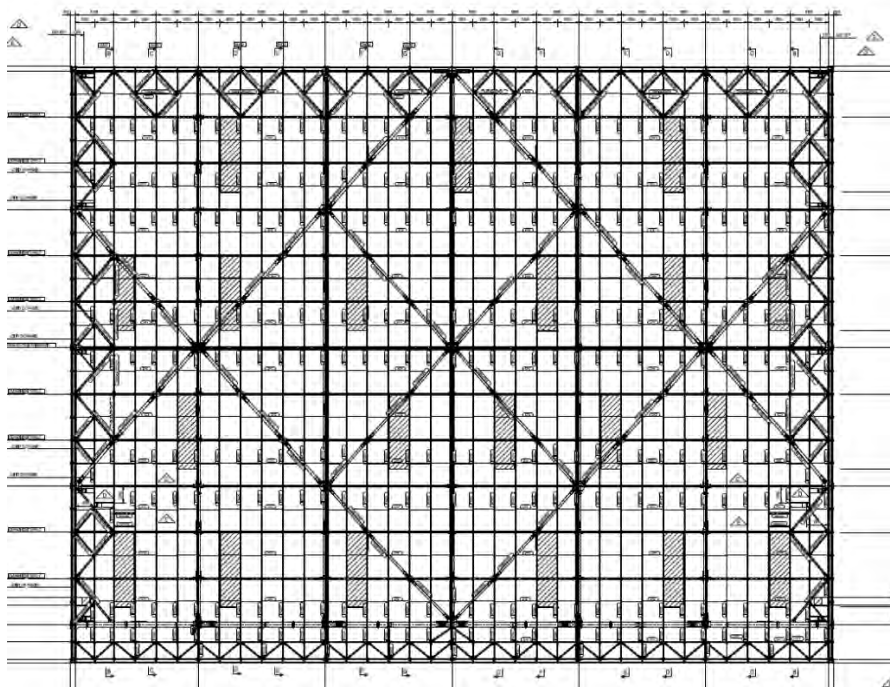


Figure 4 : vue en plan de la toiture

## ÉTUDE DE CONFORT DE LA PASSERELLE

Les passerelles sont soumises aux problèmes vibratoires liés à des fréquences de résonance de l'ouvrage préjudiciable pour le confort d'utilisation. Le SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements) a mis en place une méthodologie d'accompagnement pour cette étude (voir document 1 du document technique DT5). L'objectif de l'étude est de vérifier la fréquence de résonance de la passerelle du projet et de conclure quant aux études complémentaires à mener.

Le maître d'œuvre doit choisir d'une part la classe de la passerelle liée au trafic de passage (peu utilisée à forte concentration piétonnière) et d'autre part un niveau de confort attendu. Selon les valeurs des fréquences obtenues (non chargée et en charge), des études complémentaires dynamiques doivent être menées (rigidification ou système d'amortissement). Le document 2 du document technique DT5 donne les plages de fréquences à risques des structures.

Deux cas doivent être étudiés pour l'étude modale :

- cas 1, situation à vide c'est-à-dire ne prenant en compte que les charges permanentes de la structure ;
- cas 2 , situation en charge correspondant au cas 1 auquel on ajoute le chargement des piétons.

Les charges permanentes de la passerelle sont :

- contreventement : 50 daN·m<sup>-2</sup> ;
- garde-corps : 100 daN·m<sup>-1</sup> ;
- poids propre des profilés : voir document technique DT6.

Les charges d'exploitation de la passerelle annexe sont :

- charge verticale pour les piétons : 70 daN·m<sup>-2</sup>.

**Q1** – À l'aide du document technique DT1, **déterminer** la charge totale du poids propre de la passerelle.

**Q2** – **Déterminer** la charge supplémentaire liée au passage des piétons.

La fréquence de résonance de la passerelle est déterminée par la formule suivante :

avec :

$$f_n(\text{Hz}) = \frac{n^2 \cdot \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot S}}$$

- $f_n$  est la fréquence pour les  $n$  modes propres
- $L$  est la longueur de la passerelle
- $E$  est le module d'élasticité du matériau constitutif ( $E=210$  GPa)
- $I$  est le moment quadratique de la poutre considérée
- $\rho \cdot S$  est la masse linéique

Dans un objectif de simplification, l'étude est menée en considérant uniquement la prise en compte d'une poutre principale HEA400 avec les éléments de chargement suivants :

- cas 1 (à vide) :  $\rho \cdot S = 295 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
- cas 2 (en charge) :  $\rho \cdot S = 355 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
- classe de la passerelle selon trafic : classe 3
- niveau de confort attendu : plage 2 (ici confort moyen)

**Q3 – Calculer** la fréquence de résonance pour le mode  $n = 1$ , notée  $f_1$ , pour les deux cas cités.

**Q4 – Au vu** des résultats précédents et à l'aide du document technique DT5, **indiquer** et **justifier** quelles études complémentaires seraient à mener.

## **ÉTUDE STRUCTURELLE DU HANGAR DE MAINTENANCE**

L'objectif de cette étude est d'analyser et de justifier des éléments structuraux du. L'étude se décompose selon les étapes suivantes :

- étude 2.1 : analyse structurelle du bâtiment
- étude 2.2 : calcul des charge élémentaires
- étude 2.3 : validation du dimensionnement ELS de la structure
- étude 2.4 : dimensionnement à l'ELU du poteau de la file E.

### **Étude 2.1 - Analyse structurelle du bâtiment**

Le hangar en construction métallique est constitué d'une ossature métallique (poteaux, poutres, pannes, etc.), de bardages verticaux, d'une couverture. Il est soumis aux charges permanentes, aux charges d'exploitation, aux charges climatiques.

Au milieu des files A, 1 et 7, un dispositif particulier a été mis en place représenté sur l'élévation (figure 5) et visualisé sur la photo (figure 6). Ce dispositif est constitué de tubes placés en diagonale.

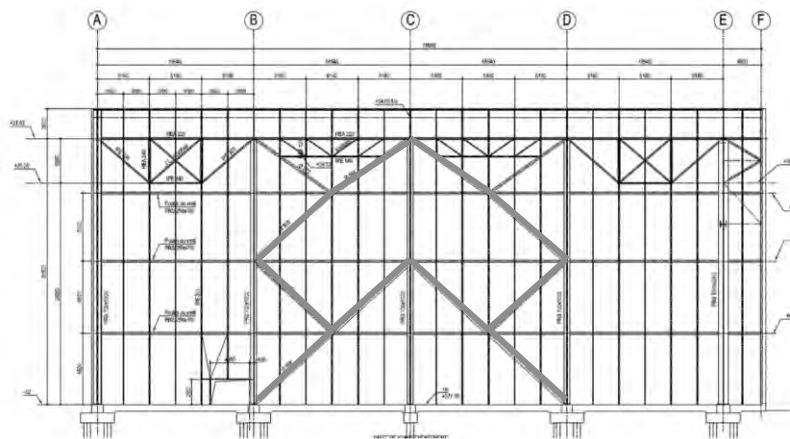


Figure 5 : élévation de la file 1



Figure 6 : photo du dispositif en file 1

**Q5 – Nommer** le dispositif illustré figure 5. **Préciser** son utilité. **Nommer** la sollicitation reprise par les tubes bi-articulés.



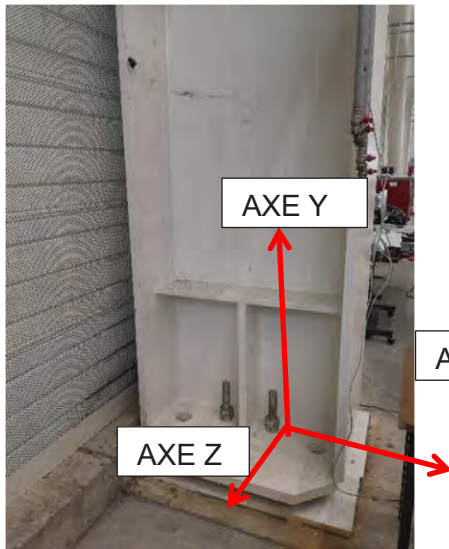


Figure 7 : photo de la liaison pied de poteau file E

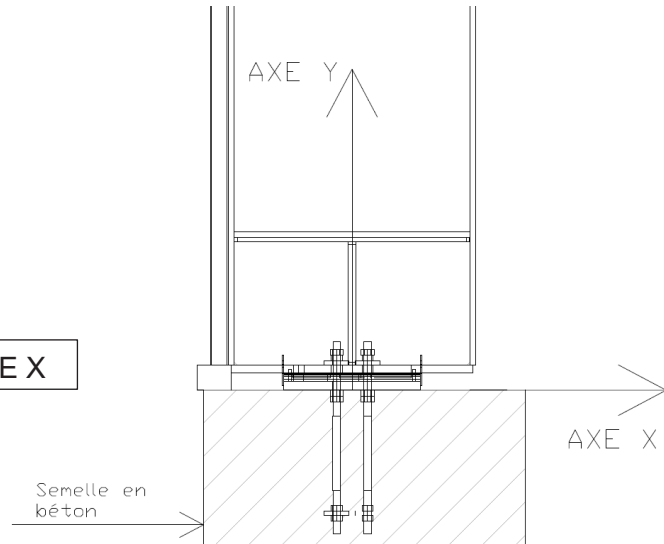


Figure 8 : détail de la liaison pied de poteau file E

Les photos présentées en figure 7 et 8 illustrent la liaison des pieds de poteau de la file E. Le repère (O, X, Y, Z) correspond au repère global du portique file E étudié.

**Q6 - Justifier** le type de liaison mécanique en pied de poteau à adopter lors de la modélisation.

Le détail de la liaison de la poutre treillis sur le poteau PRS2000 est illustré sur les figures 9 et 10.

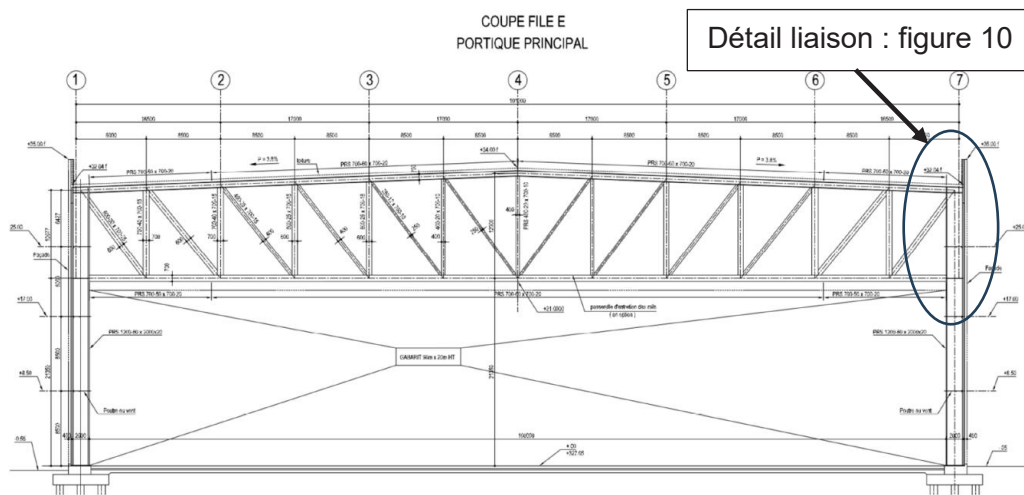


Figure 9 : Vue globale de la file E

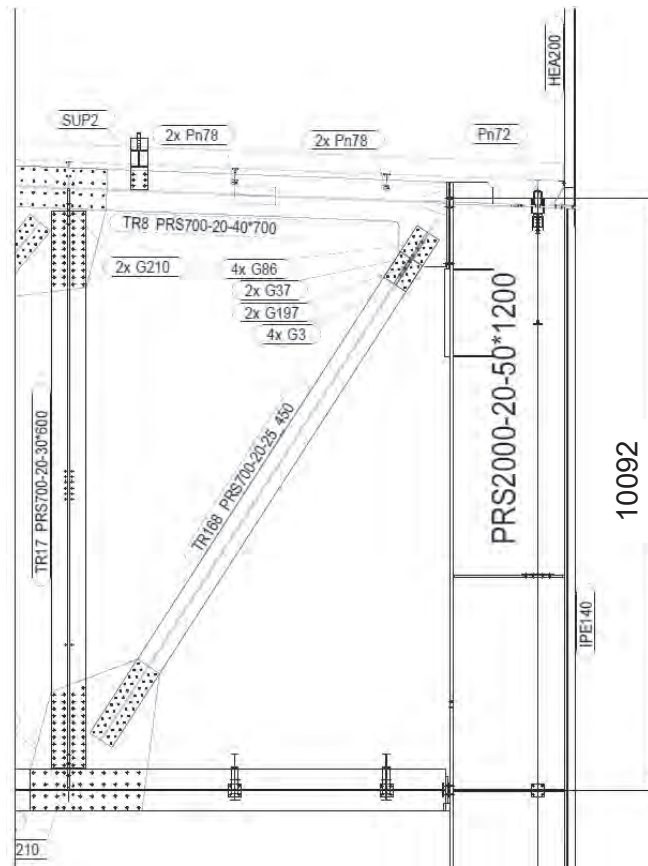


Figure 10 : détail liaison poutre treillis sur poteau PRS2000 (cotes en mm)

**Q7 - Justifier** le type de liaison mécanique qu'il est possible d'adopter lors de la modélisation en tête de poteau.

## Étude 2.2 - Calculs des charges élémentaires

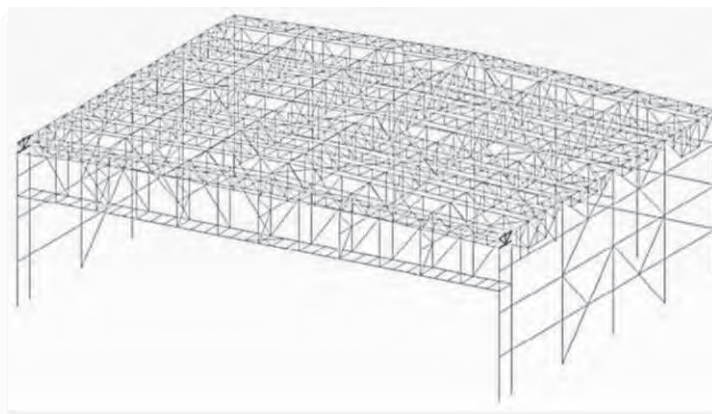


Figure 11 : Vue 3D du hangar de maintenance (logiciel Robot)

La figure 11 illustre une modélisation 3D de la structure avec en premier plan la file F et juste derrière la file E avec la poutre treillis.

Pour mettre en place le dimensionnement, les charges élémentaires permanentes et d'accompagnement doivent être déterminées. L'étude est menée en se limitant à la charge permanente et à la charge climatique de neige.

Les hypothèses de chargement prises par le bureau d'études structures sont :

- Charges permanentes :
  - le poids propre de la poutre treillis est estimé à  $1\ 600\ \text{daN}\cdot\text{m}^{-1}$  ;
  - la charge liée à la toiture (couverture + isolation + étanchéité) est de  $25\ \text{daN}\cdot\text{m}^{-2}$  ;
  - la charge liée à l'équipement de chauffage en toiture est de  $8\ \text{daN}\cdot\text{m}^{-2}$  ;
  - la charge liée à l'éclairage en toiture est de  $5\ \text{daN}\cdot\text{m}^{-2}$ .
  
- Charges climatiques : neige

Le hall de maintenance se trouve à Clermont Ferrand qui est situé en zone A2 (région A) à une altitude de 360 m. La figure 12 illustre le détail de l'acrotère. Dans une logique de simplification, la sismicité n'est pas prise en compte.

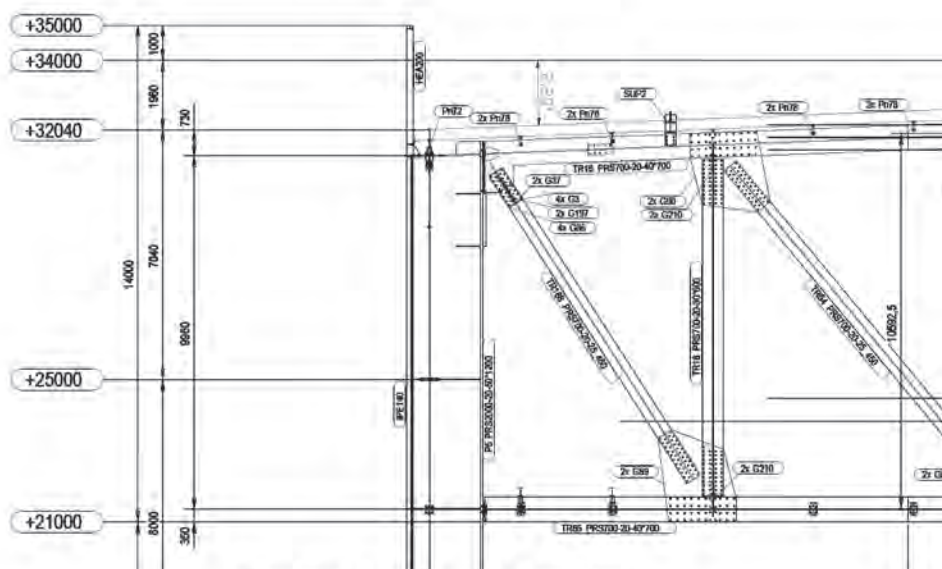


Figure 12 : détail de l'acrotère

**Q8** – À l'aide des données du document technique DT7 et de la figure 12, **déterminer** la charge surfacique de neige à prendre en compte sur la toiture du hangar du hall.

Pour la suite on considère que le réseau de pannes (IPE200) induit une charge surfacique (et non ponctuelle) sur les poutres des files A à F.

**Q9** – **Déterminer** la charge linéique liée aux charges permanentes sur la poutre treillis de la file E en utilisant le document technique DT2.

### Étude 2.3 - Étude mécanique à l'ELS

Le maître d'ouvrage impose la mise en œuvre d'une contreflèche de construction pour la poutre principale file E de manière à assurer, sous charges permanentes nominales (CP), le bon fonctionnement des portes et ponts roulants.

Le logiciel Robot donne les résultats de déformations verticales pour les différents cas de charges pour le nœud 174 :

N°	Nom des cas de charge	Déformations verticales descendantes issues du logiciel Robot (cm)
1	CP poids propre ossature Structurelle	8,33
2	CP totalité sauf charges de façades Structurelle	4,85
3	CP charge de façades Structurelle	1,22
14	Pont Roulant Catégorie exploitation	1,23
17	Charges d'exploitation Catégorie exploitation	0,08
18	Neige normale + accumulation Neige H<1 000 m	3,74
21	Charges températures	0,61
24	Vent 3 OE	2,48

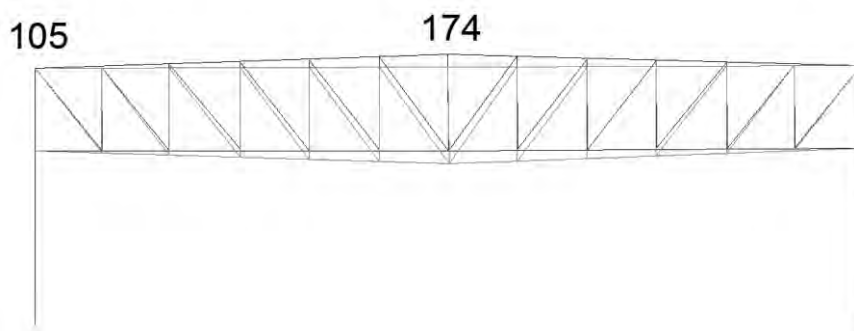


Figure 14 : localisation des nœuds 105 et 174 et illustration des déplacements verticaux du portique file E (logiciel Robot)

**Q10 – Calculer** la contreflèche verticale liée aux charges permanentes imposée par la suite à la structure.

Les critères de déformations doivent respecter ceux définis dans la NF EN 1993-1-1. Cette dernière impose, pour les fermes principales treillis (portique et semi portique) une déformation verticale maximale, sous l'action de toutes les charges, à 1/600 de la portée.

**Q11 - Calculer** la flèche verticale liée aux autres cas de chargement. **Vérifier** si le dimensionnement ELS lié aux déformations verticales de la structure est validé. **Conclure**.

Après extraction des résultats obtenus avec le logiciel Robot, on trouve deux déplacements horizontaux maximums pour le nœud 105 :

- combinaison d'actions 1 : déplacement horizontal  $u_x = + 10,42 \text{ cm}$
- combinaison d'actions 2 : déplacement horizontal  $u_x = - 7,90 \text{ cm}$

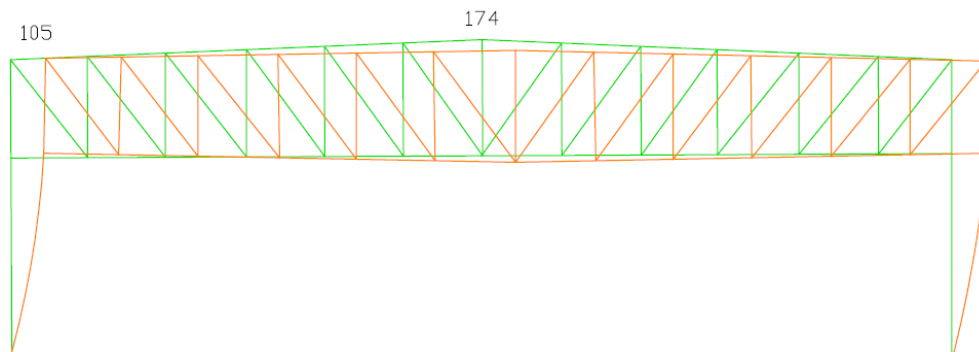


Figure 15 : illustration des déplacements horizontaux du portique file E (logiciel Robot)

Les critères de déformations doivent respecter ceux définis dans la NF EN 1993-1-1. Cette dernière impose, pour les poteaux principaux et les palées de stabilité une déformation horizontale maximale, en tenant compte du vent, à  $1/200$  de la hauteur.

**Q12 - Vérifier** si le dimensionnement ELS lié aux déformations horizontales de la structure est validé. **Conclure.**

### Étude 2.4 - Étude mécanique à l'ELU

L'objectif est, après une étude statique et une étude de résistance des matériaux, de vérifier certains aspects du dimensionnement ELU du poteau de la file E selon les règles de l'Eurocode 3.

Une modélisation simplifiée est donnée figure 16 pour le portique de la file E. Le portique est articulé en pieds (A et E) et possède une articulation en C. Le chargement donné est le chargement ELU selon les différentes combinaisons d'action (charges permanentes, d'exploitation, de vent et de neige, etc.). On se limite à une étude mécanique dans le plan global de la structure (O, X, Y).

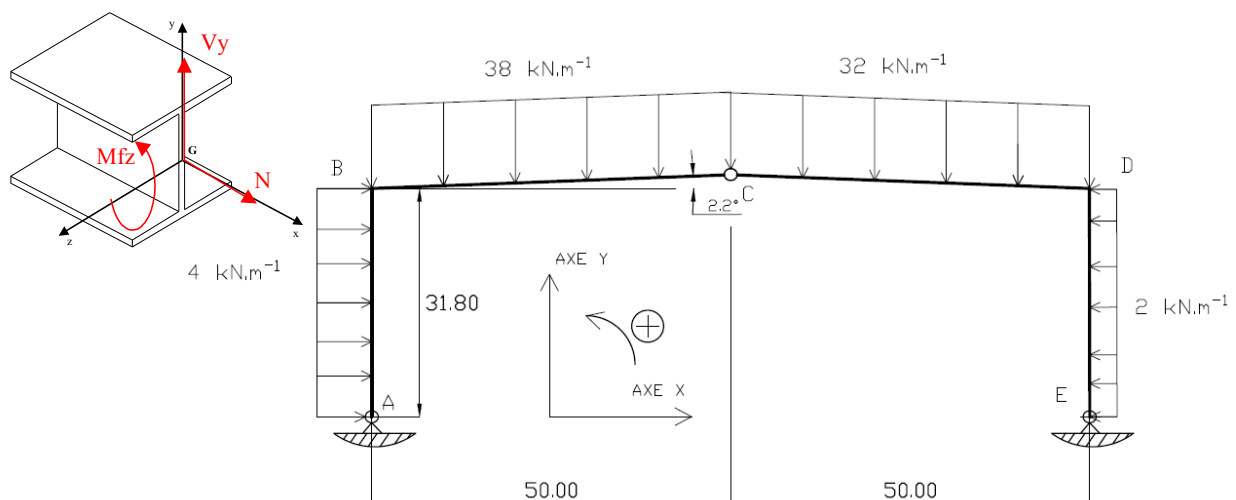


Figure 16 : schéma mécanique simplifié de la file E pour l'étude ELU (cotations en m).



**Q13 – Vérifier** que la modélisation proposée est isostatique.

**Q14 – À l'aide** du principe fondamental de la statique, **déterminer** les actions de liaison en pied de poteaux.

On note  $N(x)$  l'effort normal à l'abscisse  $x$  d'un poteau ou d'une poutre. L'effort tranchant est noté  $V(x)$  et le moment fléchissant  $M_f(x)$ . On rappelle que  $x$  est l'abscisse dans le repère local associé à l'objet étudié.

**Q15 – Établir** les équations  $N(x) / V(x) / M_f(x)$  le long de deux éléments du portique : le poteau AB et la poutre BC.

On désigne par  $X_A$  (respectivement  $X_E$ ) l'effort selon l'axe  $X$  de la liaison au point A (respectivement au point E). On désigne par  $Y_A$  (respectivement  $Y_E$ ) l'effort selon l'axe  $Y$  de la liaison au point A (respectivement au point E). Dans la suite de l'étude on prend les valeurs suivantes :

- au Nœud A :  $X_A = 1\,215$  kN et  $Y_A = 1\,815$  kN
- au Nœud E :  $X_E = -1\,692$  kN et  $Y_E = 1\,685$  kN

**Q16 – Tracer**, sur le document réponse DR1, les diagrammes  $N(x) / V(x) / M_f(x)$  le long du poteau AB et de la poutre BC. **Indiquer** les valeurs maximales des sollicitations internes.

La suite de l'étude porte sur le poteau AB. Ce poteau de la file E est un assemblage de plusieurs PRS 2000-20-50\*1200 rigidifié sur sa hauteur et liaisonné. Celui-ci doit être vérifié selon le code de calcul Eurocode 3. Il est soumis à des phénomènes de flambement et de déversement.

**Q17 – Expliquer** ce que sont les phénomènes de flambement et de déversement. **Argumenter** la réponse à l'aide de schémas.

La suite de l'étude porte sur le risque de flambement sur le poteau AB constitué d'un Profilé reconstitué soudé (PRS). La figure 17 définit les dimensions du PRS-2000-20-50\*1200 de ce poteau.

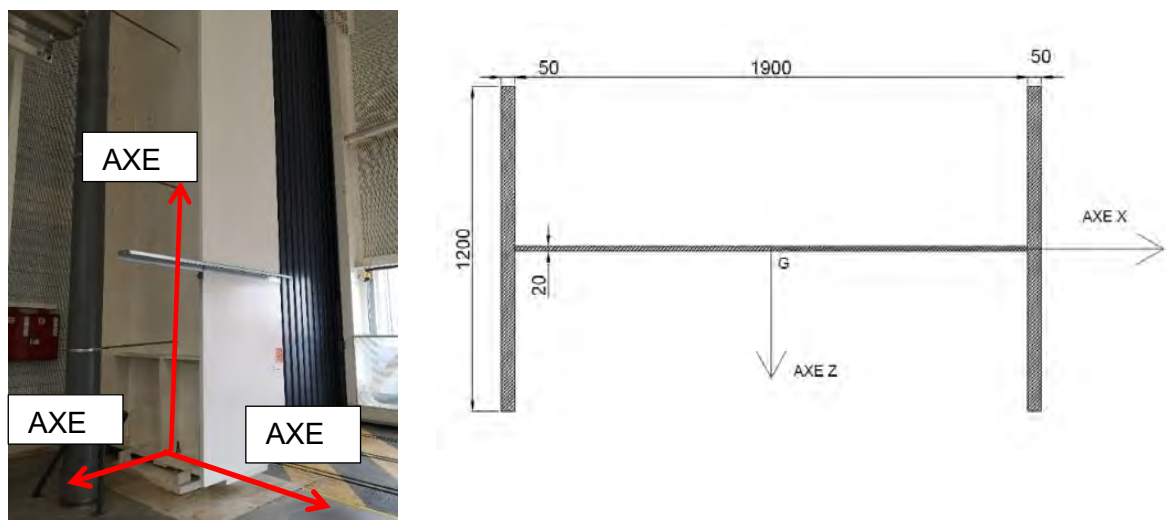


Figure 17 : poteau PRS 2000-20-50\*1200 (photo et dessin de définition)

**Q18 – Indiquer** selon quel axe le flambement risque de se produire de manière préférentielle. **Calculer** le moment quadratique  $I_{GX}$  de ce profilé PRS 2000-20-50\*1200 ainsi que sa surface  $S$  ( $G$  étant le centre de gravité de la section).

Le poteau est soumis à des sollicitations d'effort normal, d'effort tranchant et de moment fléchissant selon des résultats donnés par un logiciel :

$$N_{eLu} = 1\,820 \text{ kN} ; V_{eLu} = 1\,350 \text{ kN} ; M_{eLu} = 40\,700 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

La section est considérée de classe 3 (sections transversales pouvant atteindre leur résistance élastique en fibre extrême mais non leur résistance plastique). Les hypothèses de calculs pour poursuivre le dimensionnement sont :

- la limite d'élasticité de l'acier :  $f_y = 335 \text{ MPa}$  ;
- le module d'élasticité longitudinale de l'acier :  $E = 210\,000 \text{ MPa}$  ;
- les coefficients de sécurité :  $\gamma_{M0} = 1,00$  et  $\gamma_{M1} = 1,10$  ;
- le module de résistance élastique :  $W_{el} = 125\,531 \text{ cm}^3$  ;
- l'aire totale :  $A = 1\,580 \text{ cm}^2$  ;
- l'aire de cisaillement :  $A_v = 400 \text{ cm}^2$  ;
- l'aire de l'âme :  $A_w = 380 \text{ cm}^2$ .

On note  $N_R$  l'effort axial de compression résistant,  $V_R$  le moment fléchissant résistant et  $V_R$  l'effort tranchant résistant. On a :

- $N_R = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$  ;
- $M_R = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$  ;
- $V_R = 0,58 \cdot A_v \cdot f_y / \gamma_{M0}$ .

Lorsque l'effort tranchant sollicitant  $V_{eLu}$  ne dépasse pas la moitié de l'effort tranchant résistant  $V_R$  on peut faire l'hypothèse d'un calcul en flexion composée selon l'organigramme présenté figure 18.

**Q19 – Déterminer** les valeurs de  $N_R$ ,  $M_R$  et  $V_R$ . **Vérifier** que  $V_{eLu} < 0,5 V_R$  et que l'on peut ainsi faire l'hypothèse d'un calcul en flexion composée.

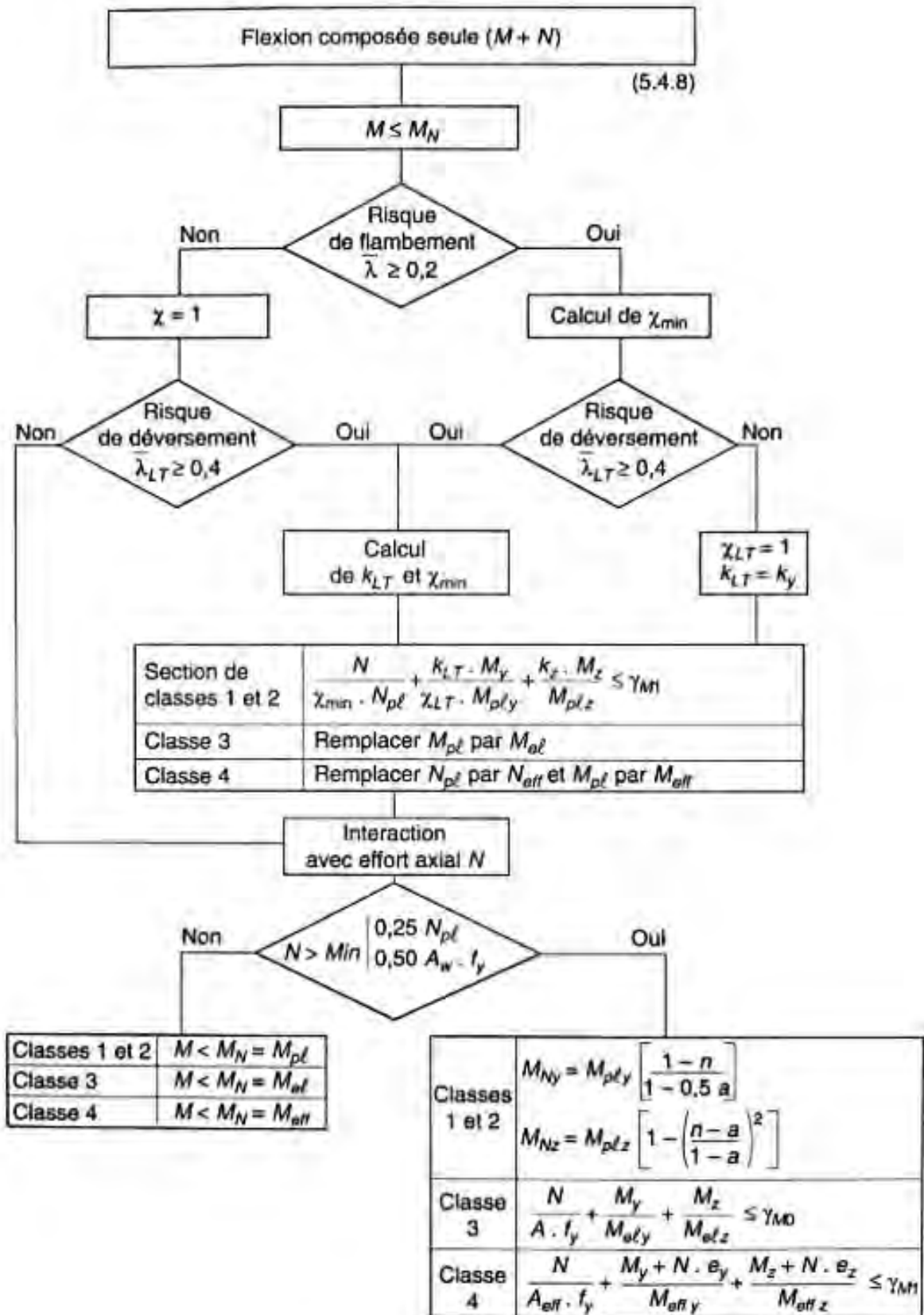


Figure 18 : organigramme de dimensionnement du poteau (simplifié ici  $M_y=0$ )  
(source : calcul des structures métalliques selon l'Eurocode 3 par Jean Morel)



Pour la suite de l'étude on considère négligeable l'effort tranchant sur le poteau.

**Q20 – Vérifier** que  $M_{el} < M_N$  avec :

si  $N < \min [0,25 \cdot N_R ; 0,5 \cdot A_v \cdot f_y / \gamma_{M0}]$  alors  $M_N = M_R$

si  $N > \min [0,25 \cdot N_R ; 0,5 \cdot A_v \cdot f_y / \gamma_{M0}]$  alors  $M_N = M_R \cdot (1 - N/N_R) / (1 - 0,5 \cdot a)$   
avec  $a = \min [A_w/A ; 0,5]$

Il n'y a pas de risque de flambement si on vérifie que l'élancement réduit  $\bar{\lambda}$  est supérieur ou

égal à 0,2 avec  $\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{\pi} \sqrt{\frac{A}{I} \frac{f_y}{E}}$  où :

- $L_{cr}$  est la longueur de flambement = 31,8 m ;
- $A$  est l'aire de la section ;
- $I$  est le moment quadratique de la section ;
- $f_y$  est la limite d'élasticité de l'acier ;
- $E$  est le module d'élasticité longitudinale de l'acier.

**Q21 – Calculer** l'élancement réduit  $\bar{\lambda}$  du poteau étudié et **vérifier** qu'il n'y a pas de risque de flambement.

On donne  $\bar{\lambda}_{LT} = 0,89$  pour le profilé étudié et on rappelle que  $N_{pl} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$  et  $M_{el} = W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

**Q22 – À l'aide de la figure 18, vérifier** si le profilé choisi est bien dimensionné. **Conclure.**

La présente étude de la structure du hangar de maintenance des aéronefs a été menée avec des hypothèses mécaniques simplificatrices de modélisation du chargement. D'autres hypothèses de chargement et d'autres études spécialisées sont à mener pour aboutir à l'exécution complète du hangar.

**Q23 – Énumérer** les autres études à mener et/ou les autres hypothèses nécessaires pour aboutir à l'exécution complète du hangar.

## ÉTUDE DE LA PRODUCTION DE CHALEUR

Pour ces besoins de chaleur (chauffage par panneaux rayonnants du Hall, batterie chaude du traitement d'air et aérothermes, eau chaude sanitaire, réseau de radiateurs des bureaux) le bâtiment est raccordé à un réseau de vapeur via une sous-station.

L'objectif de l'étude est de dimensionner les échangeurs de la sous-station.

### **Questions préliminaires et prédimensionnement**

**Q24** – À l'aide du document technique DT8, **expliquer** succinctement les avantages et inconvénients de l'utilisation de la vapeur dans un réseau de chaleur.

**Q25** – À partir des données présentes sur le schéma de principe de la sous station illustrée sur le document technique DT9, **vérifier** et **justifier** la valeur de la puissance secondaire maximale (notée  $P_s$ ), le régime de température du secondaire et la valeur du débit volumique (noté  $Q_{vf}$ ) en  $m^3 \cdot h^{-1}$ .

**Q26** – **Justifier** la mise en place de deux échangeurs dans ce contexte.

Par souci de simplification, l'étude porte uniquement sur régime nominal pour un seul échangeur. Au primaire de l'échangeur il est demandé de s'assurer d'une température de retour des condensats à  $75^\circ C$ . Les pertes thermiques de l'échangeur sont négligées.

**Q27** – À l'aide des données physiques sur les fluides DT12 et en considérant que la puissance d'un échangeur est de  $1\,574\text{ kW}$ , **déterminer** le débit massique de vapeur nécessaire en  $kg \cdot s^{-1}$ .

L'échangeur à plaque diphasique est modélisé par deux sous-échangeurs en série (voir figure 19). La partie supérieure est modélisée par un échangeur latent noté A, la partie inférieure est modélisée par un échangeur sensible noté B.

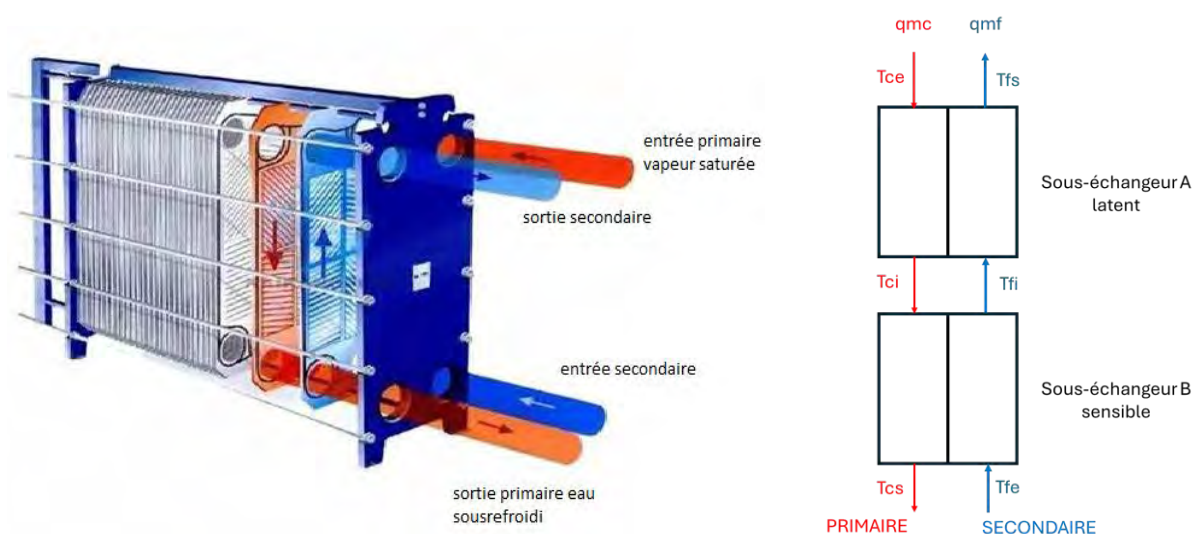


Figure 19 : modélisation de l'échangeur à plaque diphasique

Les grandeurs représentées sur la figure 19 sont :

- le débit massique du fluide chaud (noté  $q_{mc}$ ),  $q_{mc} = 0,645 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- le débit massique du fluide froid (noté  $q_{mf}$ ),  $q_{mf} = 9,35 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- la température du fluide chaud en entrée (notée  $T_{ce}$ ) ;
- la température du fluide chaud au niveau intermédiaire (notée  $T_{ci}$ ) ;
- la température du fluide chaud au niveau de la sortie (notée  $T_{cs}$ ) ;
- la température du fluide froid en entrée (notée  $T_{fe}$ ) ;
- la température du fluide froid au niveau intermédiaire (notée  $T_{fi}$ ) ;
- la température du fluide froid au niveau de la sortie (notée  $T_{fs}$ ).

**Q28 – Tracer** l'allure de l'évolution des températures des fluides primaire et secondaire le long de l'échangeur global en faisant apparaître le sous-échangeur A et le sous-échangeur B. **Déterminer** les valeurs des températures intermédiaires.

L'expression du flux de chaleur  $\phi$  à travers un échangeur de coefficient de transfert global  $U$  et de surface d'échange  $S$  est déterminé par la formule suivante :

où  $DTLM$  est la différence de température logarithmique moyenne

$$\phi = DTLM \cdot U \cdot S \quad \text{déterminée par la formule : } DTLM = \frac{(T_{cs}-T_{fe})-(T_{ce}-T_{fs})}{\ln\left(\frac{T_{cs}-T_{fe}}{T_{ce}-T_{fs}}\right)}$$

On souhaite vérifier la validité de la formule du  $DTLM$  pour le sous-échangeur A latent. Pour cela on étudie la situation illustrée par la figure 20 avec  $T_{fe}=T_{fi}$  et  $T_{cs}=T_{ci}$ .

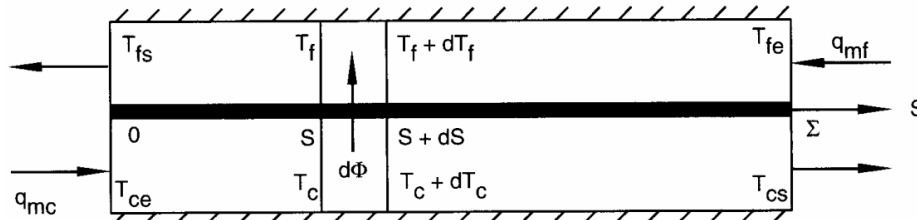


Figure 20 : situation d'étude

On note  $C_{pf}$  la capacité thermique massique isobare du fluide froid.

**Q29 –** Pour la situation d'étude illustrée figure 20, en négligeant les échanges radiatifs, **déterminer** l'expression de l'échange élémentaire  $d\phi$  à travers une surface d'échangeur  $dS$  puis celui du fluide froid entre  $S$  et  $S+dS$ . **Établir** le bilan de l'échange thermique élémentaire et le mettre sous la forme  $\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = \frac{U \cdot dS}{q_{mf} \cdot C_{pf}}$ . À l'aide d'une intégration, **démontrer** la formule du  $DTLM$  pour le sous-échangeur A (on pourra utiliser la propriété  $T_{cs} - T_{ce} = 0$ ).

Pour la suite, on admet que les conditions de l'étude permette de calculer le  $DTLM$  à l'aide la formule :  $DTLM = \frac{(T_{cs}-T_{fe})-(T_{ce}-T_{fs})}{\ln\left(\frac{T_{cs}-T_{fe}}{T_{ce}-T_{fs}}\right)}$ .

En prédimensionnement, la littérature technique des échangeurs à plaques propose un coefficient d'échange global pour un condenseur vapeur saturée/eau de  $U=2\,600\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$ .

La valeur de  $T_{fi}$  est supposée égale à  $75,6\text{°C}$ .

**Q30 – Déterminer** les valeurs de puissance au primaire pour chaque sous-échangeur. **Déterminer** la surface d'échange nécessaire pour chacun d'eux.

**Q31 – À l'aide** du document technique DT10, **déterminer** le nombre de plaques nécessaires pour l'échangeur global (A+B), ainsi que le nombre de canaux intérieur (vapeur) et extérieur (eau).

### **Étude du sous-échangeur B (eau / eau)**

L'objectif est de vérifier que les coefficients d'échanges disponibles sont compatibles avec ceux estimés. Les effets radiatifs sont négligés.

**Q32 – Proposer** un modèle thermique en régime permanent (schéma et notation) permettant de déterminer le coefficient de transmission thermique global  $U_B$  entre deux canaux à travers une plaque de l'échangeur et en **établir** l'expression.

On note  $h_c$  et  $h_f$  les coefficients de films, respectivement, au primaire et au secondaire. Les résistances d'encrassement au primaire et au secondaire sont respectivement notées  $R_c$  et  $R_f$ . On considère 33 canaux pour le primaire et 34 pour le secondaire.

**Q33 – À l'aide** des documents techniques DT10 et DT11, **calculer** le nombre de Reynolds (noté  $Re$ ) pour chaque fluide (primaire/secondaire).

**Q34 – À l'aide** des corrélations fournies dans le document technique DT11 et des données physiques des fluides fournies dans le document technique DT12, **déterminer** les coefficients de film coté primaire et secondaire.

Les valeurs de résistances d'encrassement moyennes seront :  $R_c = R_f = 4 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ .

**Q35 – Déterminer** la valeur du coefficient d'échange thermique global pour le sous-échangeur B. **Comparer** la valeur obtenue avec la valeur de prédimensionnement et **conclure**.

### **Étude du sous-échangeur A (vapeur saturée / eau)**

**Q36 – Représenter** schématiquement l'échange thermique entre deux canaux à travers une plaque de l'échangeur.

On note  $h_c$  et  $h_f$  les coefficients de films, respectivement, au primaire et au secondaire. Les résistances d'encrassement au primaire et au secondaire sont respectivement notées  $R_c$  et  $R_f$ .

Il est proposé d'établir un modèle de l'échange thermique coté condensation de la vapeur. Le modèle de condensation proposé est celui d'une paroi plane verticale de largeur  $L$  avec un

film de vapeur condensé d'épaisseur  $\delta$ . On considère que le coefficient de film coté vapeur saturée est celui de la couche de condensation.

On note :

- $q_{ml}$  le débit massique de condensat le long d'une plaque ;
- $\mu_l$  la viscosité dynamique de la couche de condensat.

**Q37 – Établir** l'expression du diamètre hydraulique  $d_h$  d'une couche de film de condensation. **En déduire** que l'expression du nombre de Reynolds  $Re_H$  du film de condensat peut se mettre sous la forme :  $Re_H = 4 \frac{q_{ml}}{L \mu_l}$ .

Pour la suite de l'étude on considère que :

- $h_f$  le coefficient de film côté secondaire vaut  $h_f = 28\,648 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$  ;
- $R_C$  la résistance d'encrassement moyenne du primaire vaut  $R_C = 4\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  ;
- $R_f$  la résistance d'encrassement moyenne du primaire vaut  $R_f = 4\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ .

On considère que, pour le fluide coté condensation de vapeur, la corrélation peut se déterminer à l'aide de la formule :

$$h = \lambda_l \left( \frac{g}{v_l^2} \right)^{1/3} \frac{Re_H}{1,08 Re_H^{1,22} - 5,2} \quad \text{où } v_l \text{ représente la viscosité cinématique de la couche liquide } (v_l = \frac{\mu}{\rho}).$$

**Q38 – Déterminer** la valeur du coefficient d'échange thermique global. **Comparer** la valeur obtenue avec la valeur estimée et **conclure**.

### **Critique et validité du modèle**

**Q39 – Déterminer** la marge de surpuissance de l'échangeur complet. **Préciser** l'intérêt d'un surdimensionnement pour ce type d'échangeur.

**Q40 – Critiquer** le modèle choisi pour le dimensionnement de l'échangeur à plaques diphasique.

## **ÉTUDE ACOUSTIQUE DU HALL DE MAINTENANCE**

L'objectif de cette partie est de dimensionner le piège à son garantissant un niveau de pression acoustique adapté pour un travailleur exerçant au sein du Hall. L'étude se base sur l'hypothèse que le niveau de pression acoustique résulte principalement du réseau de soufflage de la CTA. L'étude est menée à une position d'un auditeur considérée comme dimensionnante. La situation étudiée est décrite dans le document technique DT14.

Le débit du réseau aéraulique est de  $50\,000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , la pression en son sein de  $1\,184 \text{ Pa}$  et la vitesse de rotation du ventilateur est de  $1\,050 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Q41** – À l'aide du document technique DT13, **déterminer** le spectre d'émission du ventilateur de soufflage de la CTA.

On note  $L_w$  le niveau de puissance acoustique. Dans la suite de l'étude, on considère que  $L_w, 125\text{Hz} = 92\text{ dB}$  et que  $L_w, 1000\text{ Hz} = 85\text{ dB}$ . On considère que la longueur du conduit droit (repéré 2 sur le document technique DT13) est négligeable.

La régénération dans le réseau aérouique est négligée à l'exception de celle de la bouche de soufflage (repérée 13 sur le document technique DT14). Le niveau de puissance global de régénération de la bouche de soufflage est donné par le constructeur à 40 dB pour 1 000 Hz et pour 56 dB pour 125 Hz.

**Q42** – À l'aide des documents techniques DT14 à DT17, **déterminer** le niveau de puissance acoustique  $L_w$  après la bouche de soufflage (repérée 13 sur le document technique DT14) pour les fréquences 125 et 1 000 Hz.

On cherche à vérifier le niveau de pression acoustique pour un auditeur placé dans le hall. Les données de calculs sont fournies dans le document technique DT18.

Chacune des bouches de soufflage a une directivité  $Q = 4$ .

**Q43** – **Compléter** le document réponse DR2 en y indiquant pour la position de l'auditeurs et par bande de fréquence : la constante d'absorption  $R$  et le niveau de pression acoustique dû à la bouche 1. **Compléter** le document réponse DR2 en y indiquant le niveau de pression acoustique global dû aux 5 bouches de soufflage. **Tracer**, sur le document réponse DR3, le spectre et **déterminer** la courbe de bruit (courbe NR) cible.

Il est demandé de sélectionner un piège à son. L'atténuation sera obtenue par le passage de l'air entre des baffles cependant il y aura une régénération importante dû à l'augmentation de la vitesse de l'air entre ces baffles.

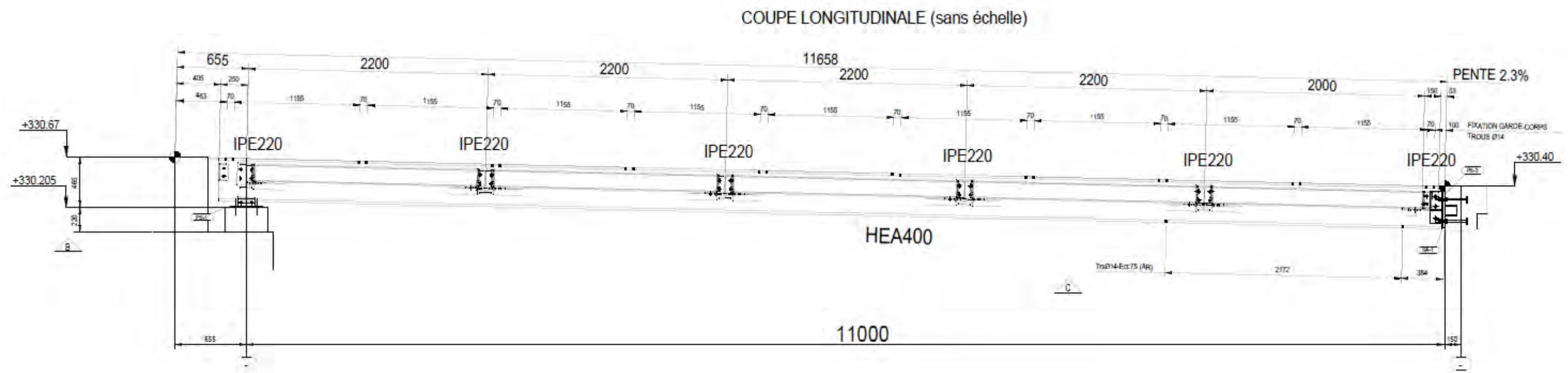
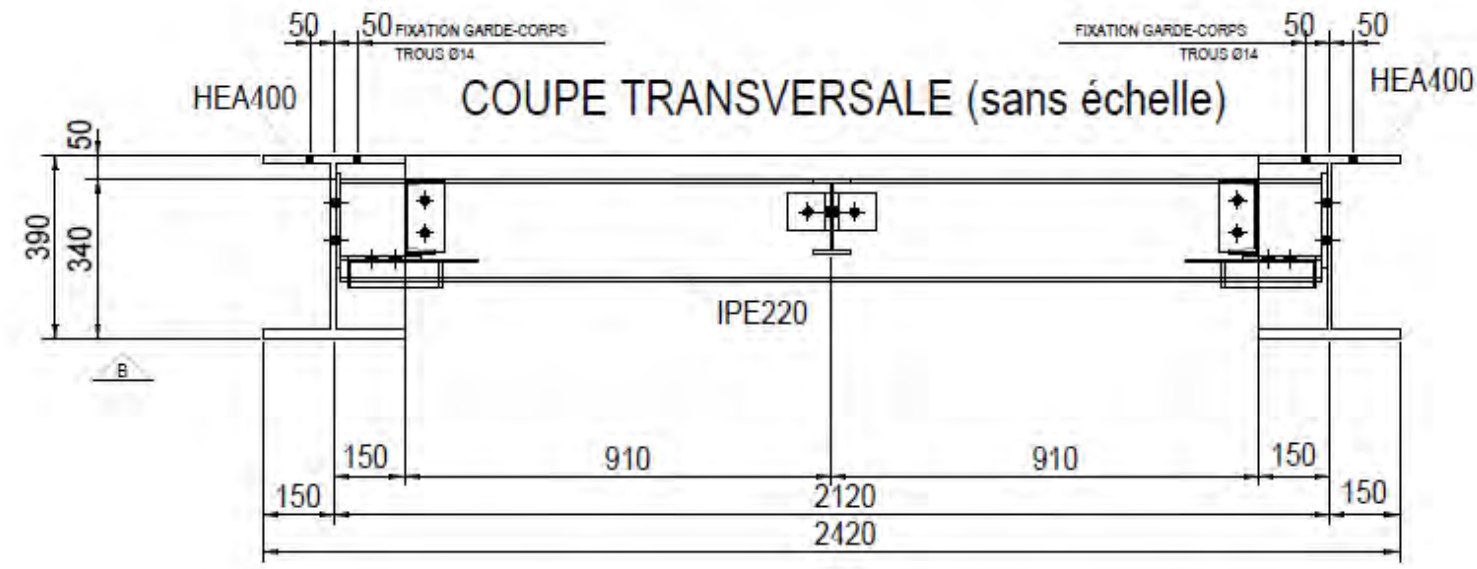
On considère que si le niveau de puissance de régénération est inférieure d'au moins 10 dB à celui de l'entrée du piège à son ; la régénération peut être négligée.

**Q44** – **Montrer** par le calcul que l'erreur due à cette simplification est inférieure à 0,5 dB.

Le piège à son est placé juste après le ventilateur dans un caisson de section 1 400/1 200 et de longueur 1 200 mm.

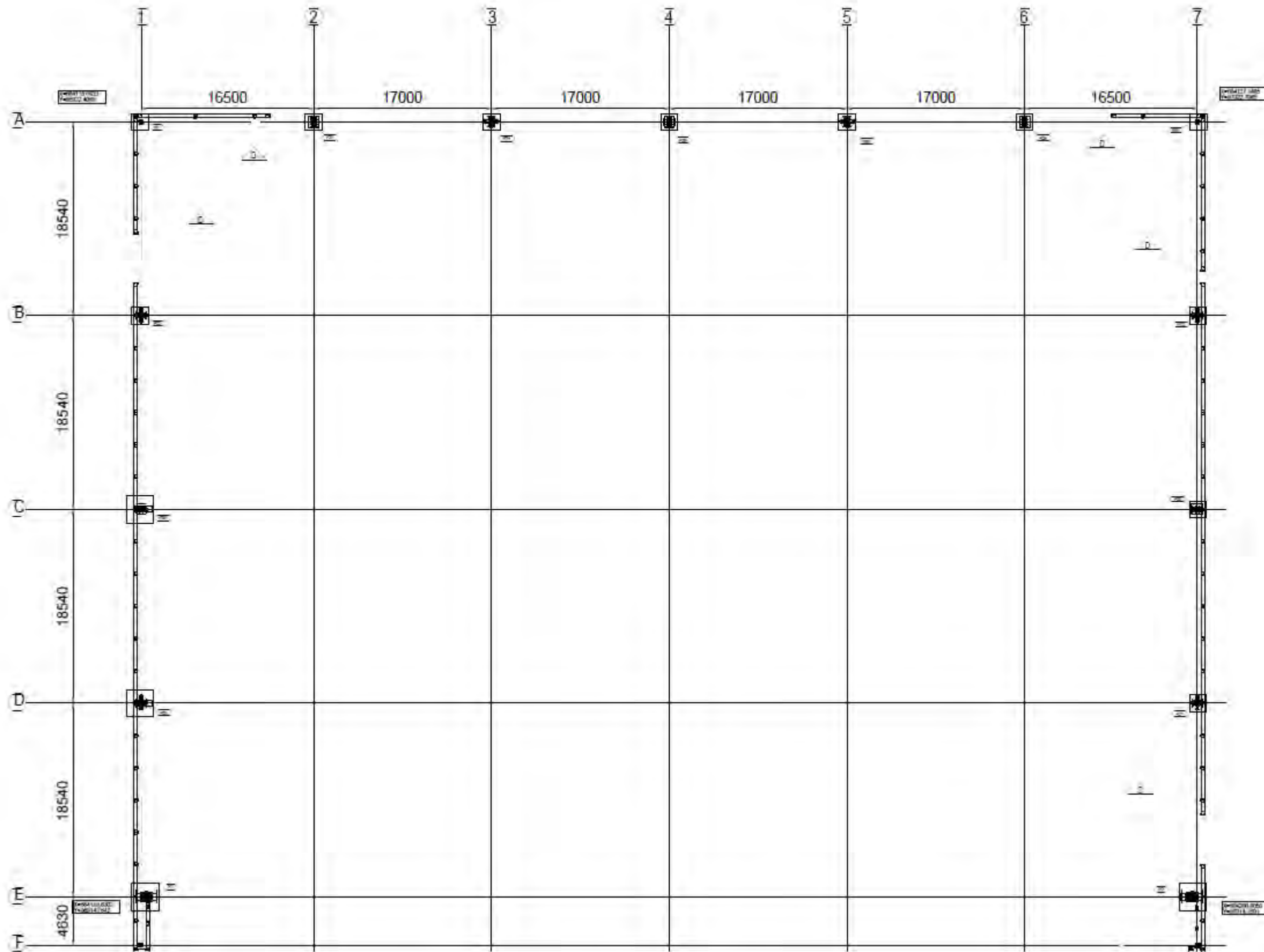
**Q45** – À l'aide du document technique DT19, **choisir**, en justifiant, le nombre de baffles et leurs dimensions pour respecter la valeur cible de NR45.

DOCUMENT TECHNIQUE DT1 : coupes longitudinale et transversale de la passerelle





DOCUMENT TECHNIQUE DT2 : vue en plan avec repère des files

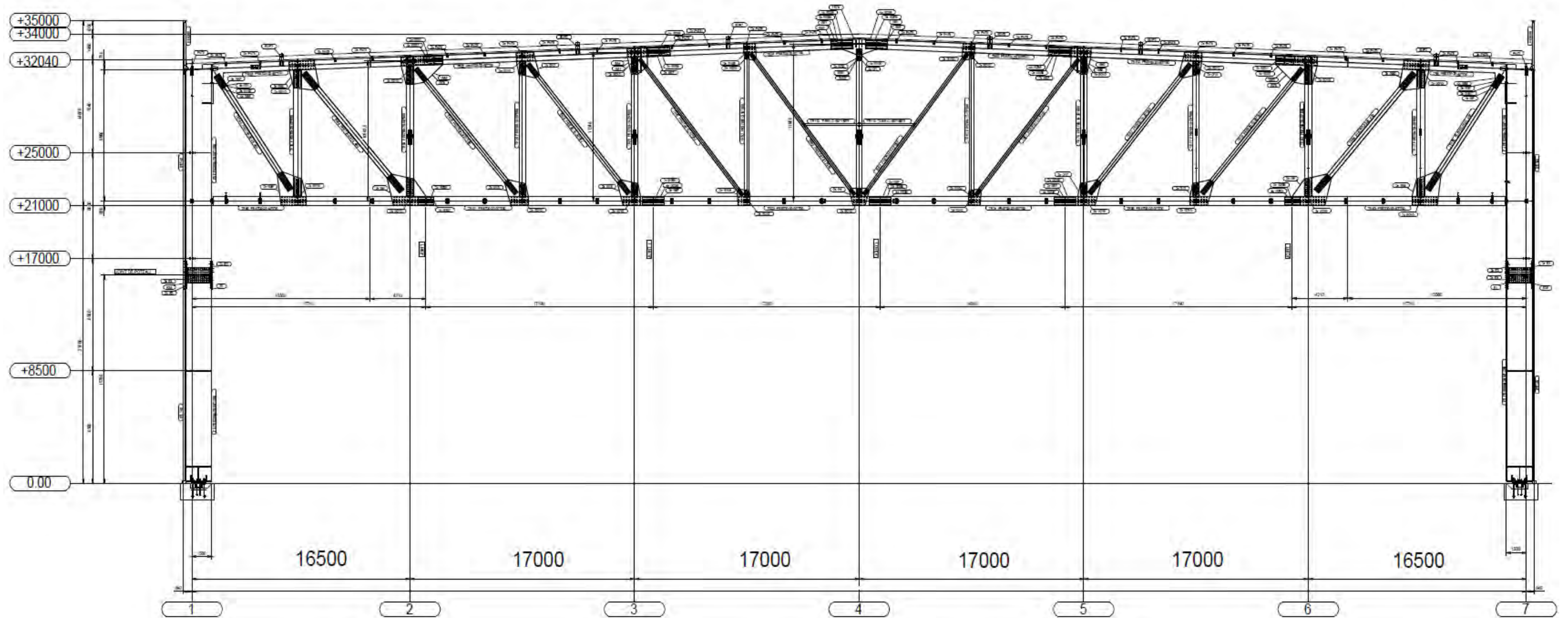


Les cotations sont  
données en mm.



Les cotations sont données en mm.

ELEVATION FILE E



**DOCUMENT TECHNIQUE DT4 : planche photographique du projet**

---

Photo 1 : photo du hangar de maintenance (porte d'entrée)



Photo 2 : photo de la liaison du pied de poteau (File E)



Photo 3 : photo de la poutre treillis au-dessus de la porte d'entrée



Photo 4 : photo du réseau de poutres-treillis (charpente métallique)

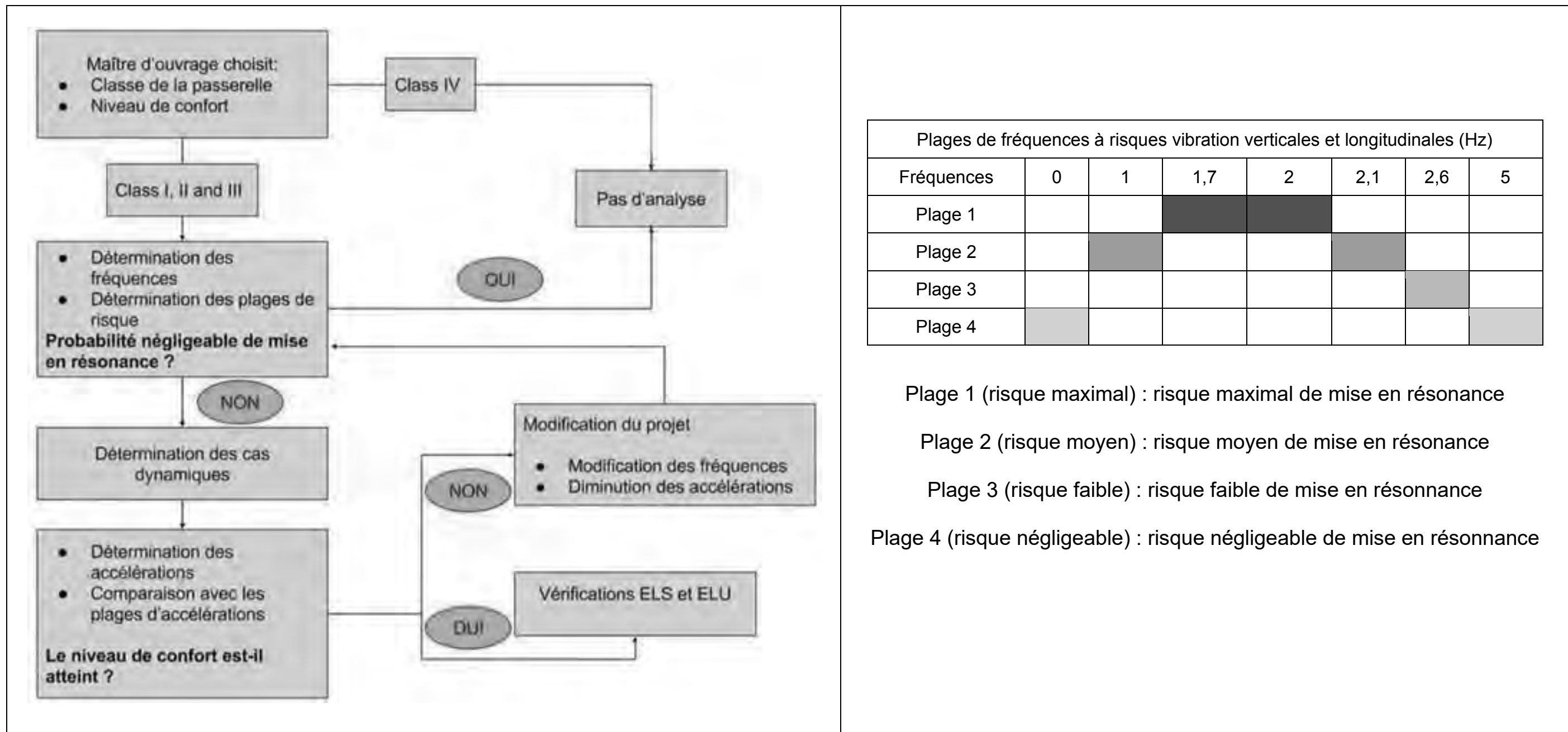


Photo 5 : photo d'un système de contreventement latéral



Photo 6 : photo de la passerelle



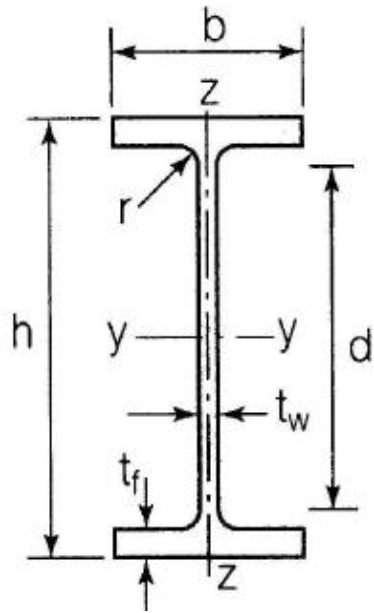


Document 1 : organigramme de dimensionnement vibratoire (SETRA).

Document 2 : plages de fréquences à risques

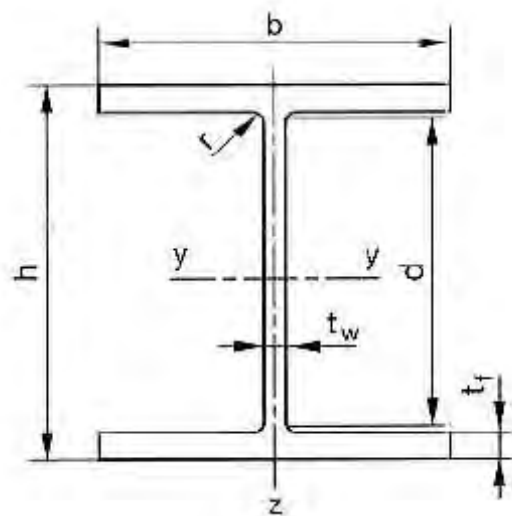


Document 1 : caractéristiques des profilés IPE



Profil	h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	Masse par mètre P	Aire de la section A	Moment quadratique I <sub>y</sub>	Module de résistance élastique à la flexion W <sub>el,y</sub>	Rayon de giration i <sub>y</sub>	2 × S <sub>y</sub>		A <sub>vz</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>el,z</sub>	i <sub>z</sub>	2 × S <sub>z</sub>	
											Module plastique W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>					A <sub>vy</sub>	
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	
80	80	46	3,8	5,2	5	6,0	7,64	80,1	20,0	3,24	23,2	3,6	8,48	3,69	1,05	5,8	5,1	
100	100	55	4,1	5,7	7	8,1	10,3	171,0	34,2	4,07	39,4	5,1	15,91	5,78	1,24	9,1	6,7	
120	120	64	4,4	6,3	7	10,4	13,2	317,8	53,0	4,90	60,7	6,3	27,65	8,64	1,45	13,6	8,6	
140	140	73	4,7	6,9	7	12,9	16,4	541,2	77,3	5,74	88,3	7,6	44,90	12,30	1,65	19,2	10,6	
160	160	82	5,0	7,4	9	15,8	20,1	869,3	108,7	6,58	123,9	9,7	68,28	16,65	1,84	26,1	12,8	
180	180	91	5,3	8,0	9	18,8	23,9	1 317,0	146,3	7,42	166,4	11,3	100,81	22,16	2,05	34,6	15,3	
200	200	100	5,6	8,5	12	22,4	28,5	1 943,2	194,3	8,26	220,6	14,0	142,31	28,46	2,24	44,6	18	
220	220	110	5,9	9,2	12	26,2	33,4	2 771,8	252,0	9,11	285,4	15,9	204,81	37,24	2,48	58,1	21,3	
240	240	120	6,2	9,8	15	30,7	39,1	3 891,6	324,3	9,97	366,6	19,1	283,58	47,26	2,69	73,9	14,8	
270	270	135	6,6	10,2	15	36,1	45,9	5 789,8	428,9	11,23	484,0	22,1	419,77	62,19	3,02	97,0	29	
300	300	150	7,1	10,7	15	42,2	53,8	8 356,1	557,1	12,46	628,4	25,7	603,62	80,48	3,35	125,2	33,7	
330	330	160	7,5	11,5	18	49,1	62,6	11 766,9	713,1	13,71	804,3	30,8	788,00	98,50	3,55	153,7	38,7	
360	360	170	8,0	12,7	18	57,1	72,7	16 265,6	903,6	14,95	1 019,1	35,1	1 043,20	122,73	3,79	191,1	45,3	
400	400	180	8,6	13,5	21	66,3	84,5	23 128,4	1 156,4	16,55	1 307,1	42,7	1 317,58	146,40	3,95	229,0	51,1	
450	450	190	9,4	14,6	21	77,6	98,8	33 742,9	1 499,7	18,48	1 701,8	50,8	1 675,35	176,35	4,12	276,4	58,3	
500	500	200	10,2	16,0	21	90,7	116	48 198,5	1 927,9	20,43	2 194,1	59,9	2 140,90	214,09	4,30	335,9	67,2	
550	550	210	11,1	17,2	24	106	134	67 116,5	2 440,6	22,35	1 390	72,3	2 666,49	253,95	4,45	400,5	76,1	
600	600	220	12,0	19,0	24	122	156	92 083,5	3 069,4	24,30	1 760	83,8	3 385,78	307,80	4,66	485,6	87,9	

Document 2 : caractéristiques des profilés HEA



	Dimensions						Masse par mètre P	Aire de la section	Surface de peinture		Caractéristiques de calcul										
	h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	d			Aire de	m <sup>2</sup> /m	m <sup>2</sup> /t	I <sub>y</sub>	W <sub>el,y</sub>	i <sub>y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	A <sub>vz</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>el,z</sub>	i <sub>z</sub>	W <sub>pl,z</sub>	A <sub>vy</sub>
												cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>
HEA 100	96	100	5,0	8,0	12	56	16,7	21,2	0,561	33,68	349,2	72,8	4,06	83,0	7,6	133,8	26,8	2,51	41,1	16,9	
HEA 120	114	120	5,0	8,0	12	74	19,9	25,3	0,677	34,06	606,2	106,3	4,89	119,5	8,5	230,9	38,5	3,02	58,9	20,1	
HEA 140	133	140	5,5	8,5	12	92	24,7	31,4	0,794	32,21	1033,1	155,4	5,73	173,5	10,1	389,3	55,6	3,52	84,8	24,8	
HEA 160	152	160	6,0	9,0	15	104	33,4	38,8	0,906	29,78	1673,0	220,1	6,57	245,1	13,2	615,5	76,9	3,98	117,6	30,1	
HEA 180	171	180	6,0	9,5	15	122	35,5	45,3	1,024	28,83	2510,3	293,6	7,45	324,9	14,5	924,6	102,7	4,52	156,5	35,5	
HEA 200	190	200	6,5	10,0	18	134	42,3	53,8	1,136	26,89	3692,2	388,6	8,28	429,5	18,1	1335,6	133,6	4,98	203,8	41,6	
HEA 220	210	220	7,0	11,0	18	152	50,5	64,5	1,255	24,85	5409,7	515,2	9,17	568,5	20,7	1954,5	177,7	5,51	270,6	50,2	
HEA 240	230	240	7,5	12,0	21	164	60,3	76,8	1,369	22,70	7763,2	675,1	10,05	744,6	25,2	2768,9	230,7	6,00	351,7	59,7	
HEA 260	250	260	7,5	12,5	24	177	68,2	86,8	1,484	21,77	10455	836,4	10,97	919,8	28,8	3668,2	282,6	6,50	430,2	67,4	
HEA 280	270	280	8,0	13,0	24	196	76,4	97,3	1,603	20,99	13673	1012,8	11,86	1112,2	31,7	4763,0	340,2	7,00	518,1	75,4	
HEA 300	290	300	8,5	14,0	27	208	88,3	112,5	1,717	19,43	18263	1259,6	12,74	1383,3	37,3	6310,5	420,7	7,49	641,2	87,0	
HEA 320	310	300	9,0	15,5	27	225	96,6	124,4	1,756	17,98	22928	1479,3	13,58	1628,1	41,1	6985,8	465,7	7,49	709,7	96,2	
HEA 340	330	300	9,5	16,5	27	243	104,8	133,5	1,795	17,13	27693	1678,4	14,40	1850,5	45,0	7436,3	495,8	7,46	755,9	102,5	
HEA 360	350	300	10,0	17,5	27	261	112,1	142,8	1,834	16,36	33090	1890,8	15,22	2088,5	49,0	7886,8	525,8	7,43	802,3	108,7	
HEA 400	390	300	11,0	19,0	27	298	124,8	159,0	1,912	15,32	45069	2311,3	16,84	2561,8	57,3	8563,1	570,9	7,34	872,9	118,2	
HEA 450	440	300	11,5	21,0	27	344	139,8	178,0	2,011	14,39	63722	2896,4	18,92	3215,9	65,8	9464,2	630,9	7,29	965,1	130,4	
HEA 500	490	300	12,0	23,0	27	390	155,1	197,5	2,110	13,60	86975	3550,0	20,98	3948,9	74,7	10365,6	91,0	7,24	1058,5	142,7	
HEA 550	540	300	12,5	24,0	27	438	166,2	211,8	2,209	13,29	111932	4145,6	22,99	4321,8	83,7	10817,2	721,1	7,15	1106,9	148,6	
HEA 600	590	300	13,0	25,0	27	486	177,8	226,5	2,308	12,98	141208	4786,7	24,97	5350,4	93,2	11269,1	751,3	7,05	1155,7	155,2	

### 1 - Charges de neige au sol suivant l'altitude

Les lois de variation de la valeur caractéristique  $s_k$  en fonction de l'altitude  $A$  (en m) dépend de la Région (tableaux 3 et 4), alors :

$$s_k = s_{k,0} + \Delta s_i$$

le coefficient  $s_{k,0}$  est à déterminer avec le tableau 3 ci-contre  
le coefficient  $\Delta s_i$  est à déterminer avec le tableau 4 ci-contre

Tableau 3 - Valeur caractéristique et charge exceptionnelle par région								
Régions	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeur caractéristique ( $s_{k,0}$ ) de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200 m (en $\text{kN/m}^2$ )	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40
Valeur de calcul ( $s_{k,d}$ ) de la charge exceptionnelle de neige sur le sol (en $\text{kN/m}^2$ )	-	1,00	1,00	1,35	-	1,35	1,80	-

Tableau 4 - Lois de variation de la valeur caractéristique $s_k$ en fonction de l'altitude $A$ et de la région		
Altitude $A$	Régions A, B, C, D Loi de variation : $\Delta s_1$	Région E Loi de variation : $\Delta s_2$
de 200 à 500 m	$A/1\ 000 - 0,20$	$1,5 A/1\ 000 - 0,30$
de 500 à 1 000 m	$1,5 A/1\ 000 - 0,45$	$3,5 A/1\ 000 - 1,30$
de 1 000 à 2 000 m	$3,5 A/1\ 000 - 2,45$	$7 A/1\ 000 - 4,80$

### 2 - Charges de neige sur la toiture pour les situations de projets durables et transitoires

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

avec  $C_e$  coefficient d'exposition (sans dimension) = 1,25 dans des conditions d'abri quasi-permanentes de la toiture (pas de déplacement possible de la neige par le vent), ou = 1 dans tous les autres cas,

avec  $C_t$  coefficient thermique (sans dimension) = 1 sauf dans des spécifications particulières du marché (bâtiments non isolés),

avec  $\mu_i$  coefficient de forme (sans dimension). Le coefficient  $\mu_i$  est à déterminer à l'aide des figures 3 et 5 ci-dessous.

Dans le cas où la pente nominale au fil de l'eau est faible (< 3 %), il convient de majorer la charge de neige de  $0,2 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ .

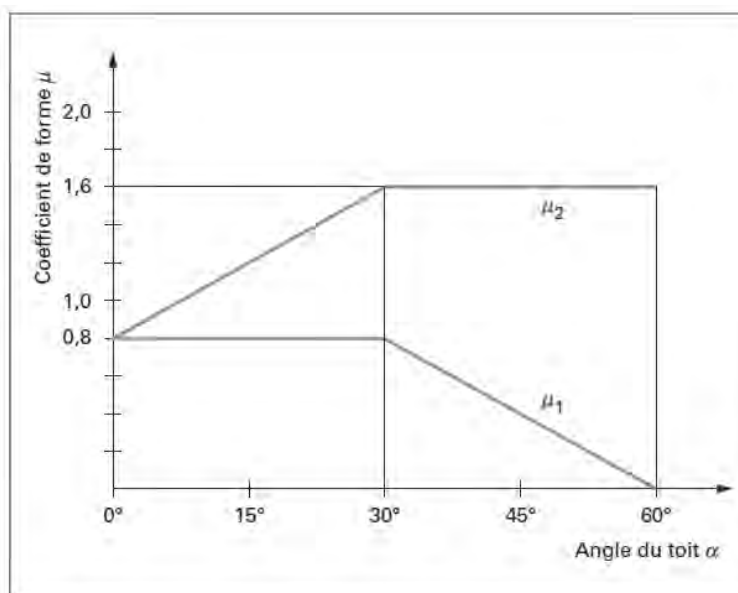


Figure 3 - Valeurs des coefficients de forme  $\mu_i$

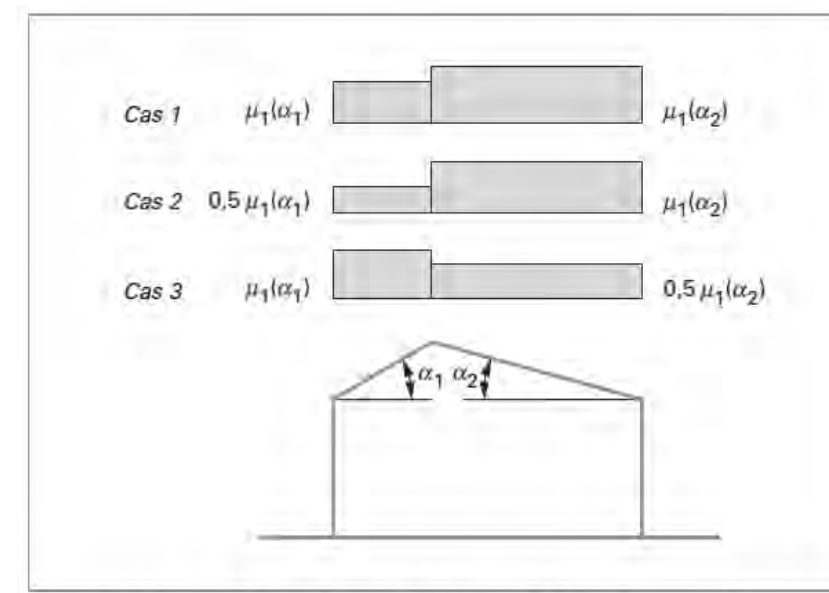
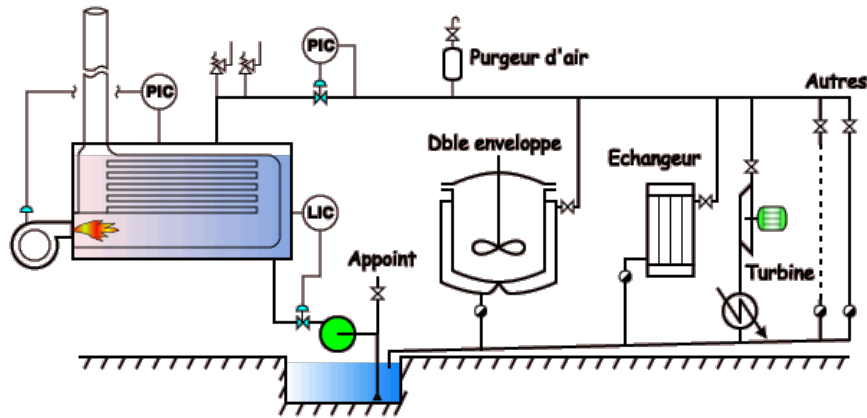


Figure 5 - Cas de charge pour les toitures à deux versants

# DOCUMENT TECHNIQUE DT8 : extraits d'articles techniques sur l'« usage de la vapeur en réseau de chaleur urbain »

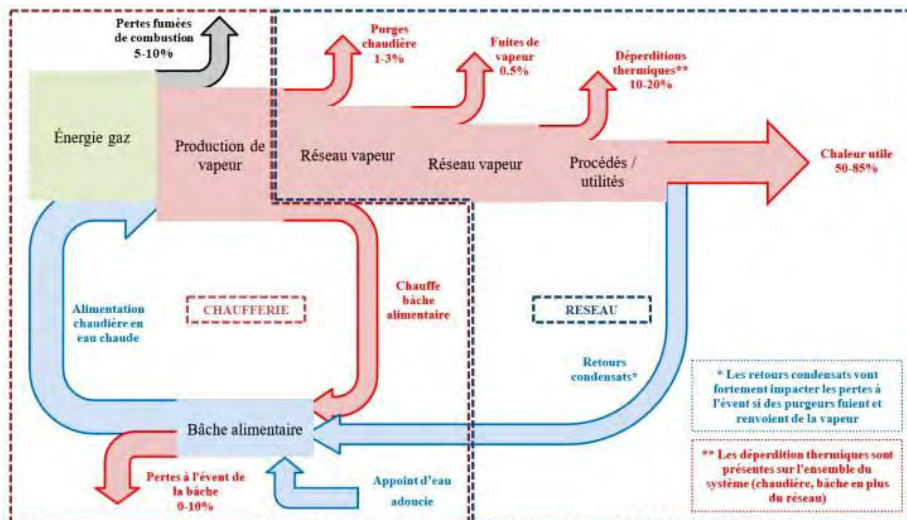
Véritable chauffage collectif à l'échelle d'une ville ou d'un quartier, le réseau de chaleur urbain alimente tous types d'immeubles : logements, bâtiments communaux ou à usage industriel.



Il est composé de quatre éléments : des unités de production de chaleur, un réseau de canalisations qui achemine de la vapeur vers des postes d'échange et un second réseau de canalisations qui reconduit l'eau refroidie vers les unités de production.

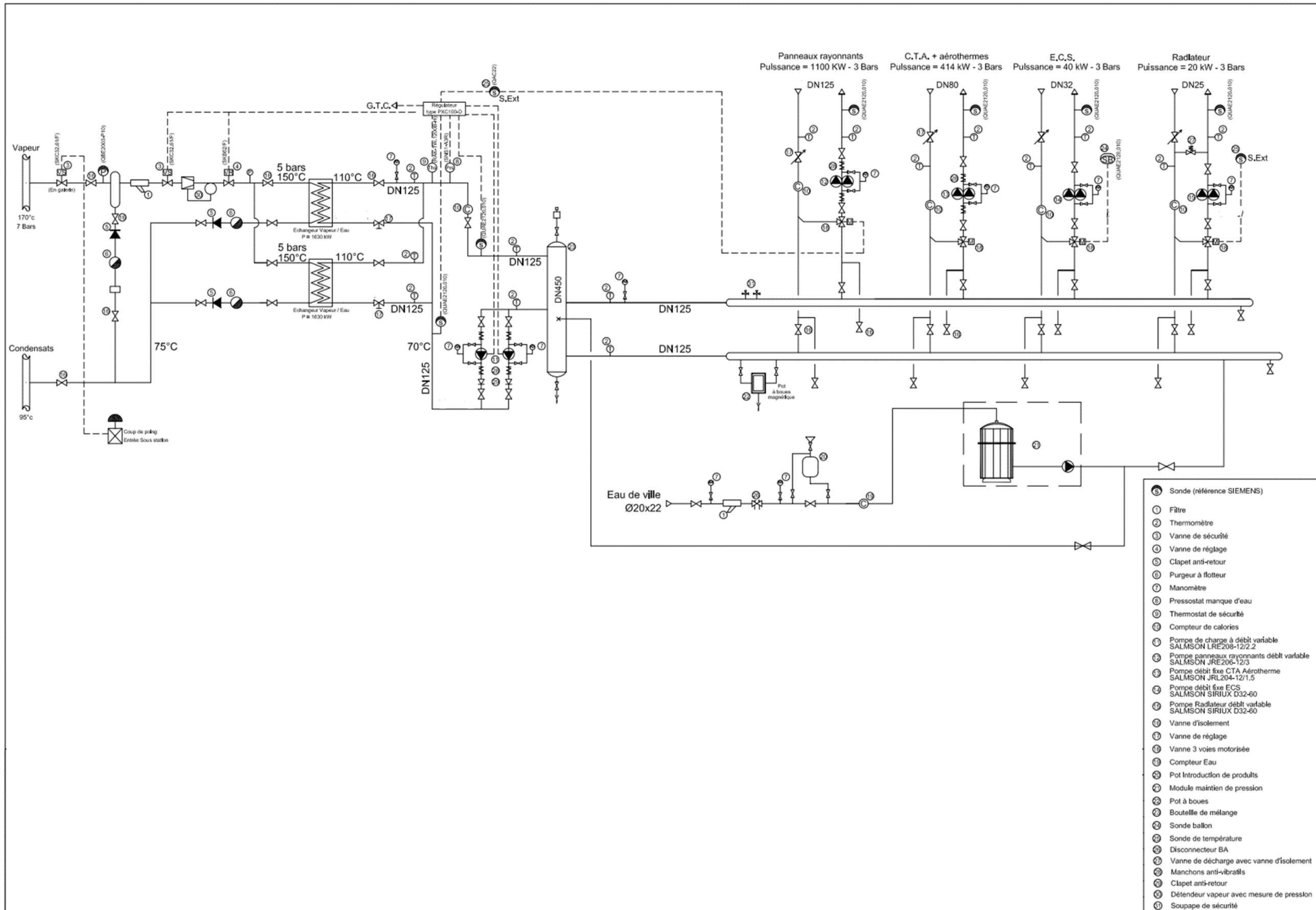
## L'exemple du réseau de chauffage urbain parisien

La Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU) produit huit millions de tonnes de vapeur par an pour alimenter en chaleur 6 000 points de livraison. 45% de la chaleur fournie par la CPCU est récupérée auprès des trois unités du SYCTOM qui valorisent les déchets ménagers d'Île-de-France, situés en proximité du réseau de chaleur. La CPCU dispose également de 8 chaufferies. Leurs chaudières produisent de la chaleur à partir de divers combustibles : gaz et biogaz, charbon et granulés de bois, biocombustibles liquides... Plus de la moitié des sources d'énergie utilisées par la CPCU pour produire sa chaleur est renouvelable ou de récupération. La production de vapeur nécessite de la chaleur et de l'eau. C'est pourquoi les chaufferies principales sont situées en bordure de Seine. L'eau de Seine est pompée puis osmosée afin de limiter les effets corrosifs.



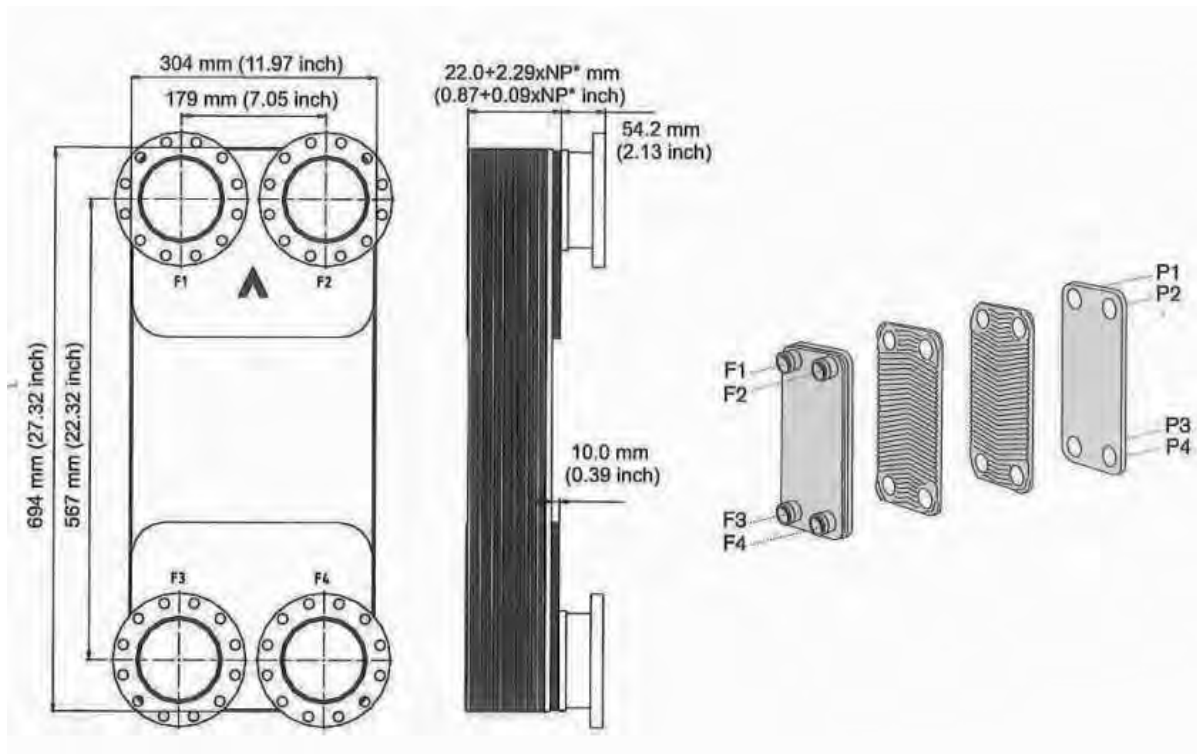
Caractéristiques	L'EAU	LA VAPEUR
Capacité thermique massique	à 108°C 450 kJ·kg <sup>-1</sup>	à 108°C(1,35 b) 2 700 kJ·kg <sup>-1</sup> dont 2 100 en latent
Coefficient de transmission thermique	930 à 1 630 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	1 600 à 2 000 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>

DOCUMENT TECHNIQUE DT9 : schéma de principe d'une sous-station de production d'eau chaude pour le chauffage





## DOCUMENT TECHNIQUE DT10 : dimensions et grandeurs physiques de l'échangeur à plaque de la sous station



### Données techniques :

- épaisseur de la plaque :  $e = 0,4$  mm
- surface d'échange utile de la plaque :  $0,190$  m<sup>2</sup>
- distance entre deux plaques  $d = 2$  mm
- coefficient de conductivité thermique de l'inox 316L  $\lambda$  inox 316L :  $15$  W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>



## DOCUMENT TECHNIQUE DT11 : formulaire « échange par convection »

---

### Expression des nombres adimensionnels

$$\text{Nusselt : } Nu = \frac{h \cdot dh}{\lambda}$$

$$\text{Reynolds : } Re = \frac{\rho V dh}{\mu}$$

$$\text{Prandtl : } Pr = \frac{\mu cp}{\lambda}$$

Où :

- $\mu$  est la viscosité dynamique ;
- $V$  est la vitesse d'écoulement ;
- $\rho$  est la masse volumique ;
- $\lambda$  est le coefficient de conductivité thermique.

On rappelle que le diamètre hydraulique  $dh$  se définit comme « quatre fois la section de passage sur le périmètre mouillé ».

### Corrélation retenue pour un fluide sans changement de phase

Pour un angle de corrugation de 60° on prend :

$$Nu = 0,287 Re^{0,705} Pr^{0,33} (\mu/\mu_p)^{0,14}$$

L'indice  $p$  indique les conditions de la paroi.

**DOCUMENT TECHNIQUE DT12 : propriétés physiques de l'eau aux différentes conditions de l'étude**

		Eau						
		Vapeur						
Température	$\theta$	$^{\circ}\text{C}$	150	150	110	90	75	70
Chaleur massique	$C_p$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2 250	4 290	4 244	4 207	4 181	4 181
Masse volumique	$\rho$	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$	2,481	943,2	943,2	965,4	988	988
Conductivité thermique	$\lambda$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,03131	0,682	0,687	0,6752	0,639	0,639
Viscosité dynamique	$\mu$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$141\cdot 10^{-7}$	$1\ 830\cdot 10^{-7}$	$2\ 301\cdot 10^{-7}$	$3\ 150\cdot 10^{-7}$	$5\ 500\cdot 10^{-7}$	$5\ 520\cdot 10^{-7}$

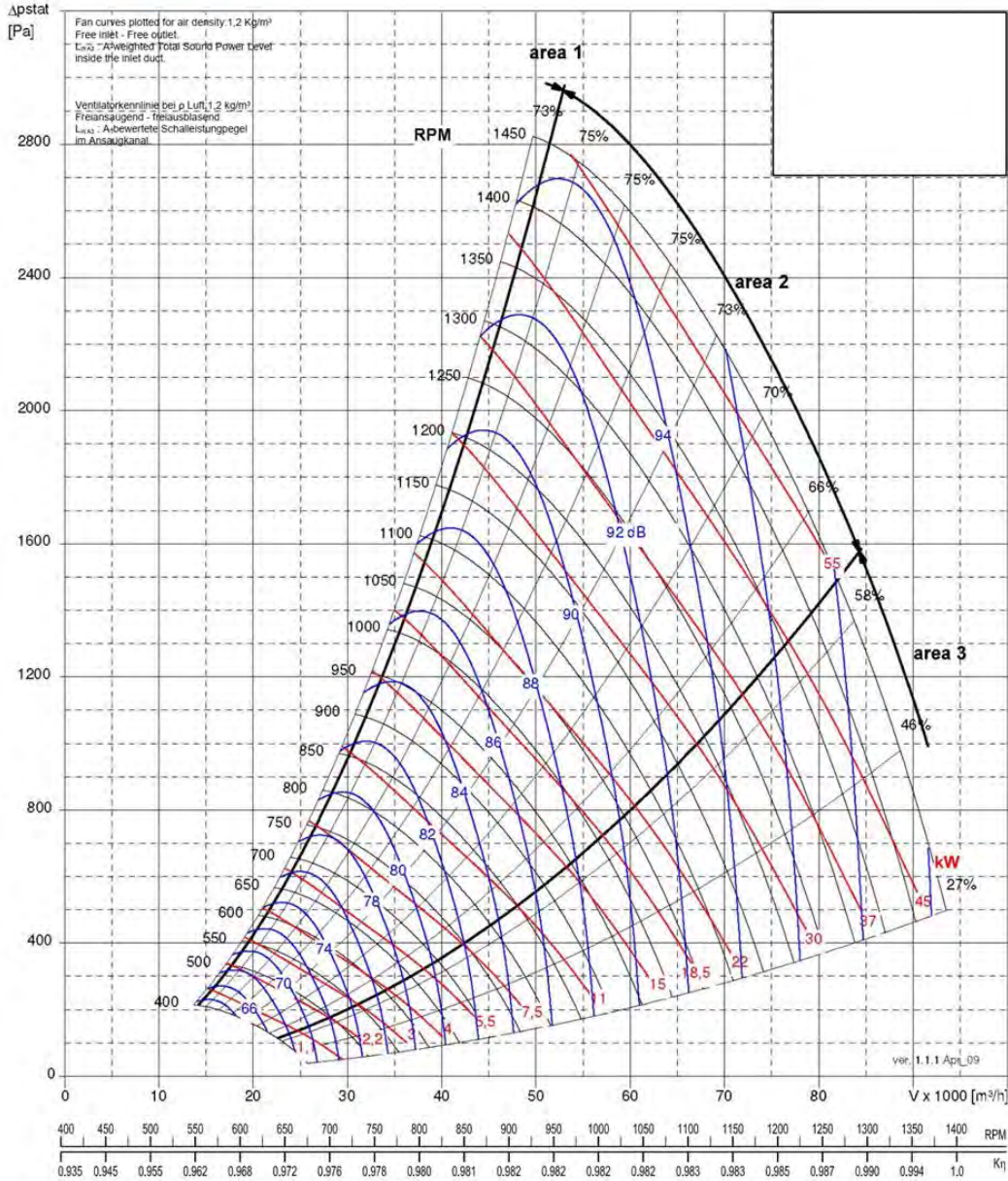
Chaleur latente de vaporisation aux conditions de calculs :  $L_v = 2\ 115\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

# DOCUMENT TECHNIQUE DT13 : courbes caractéristiques du ventilateur de soufflage de la CTA



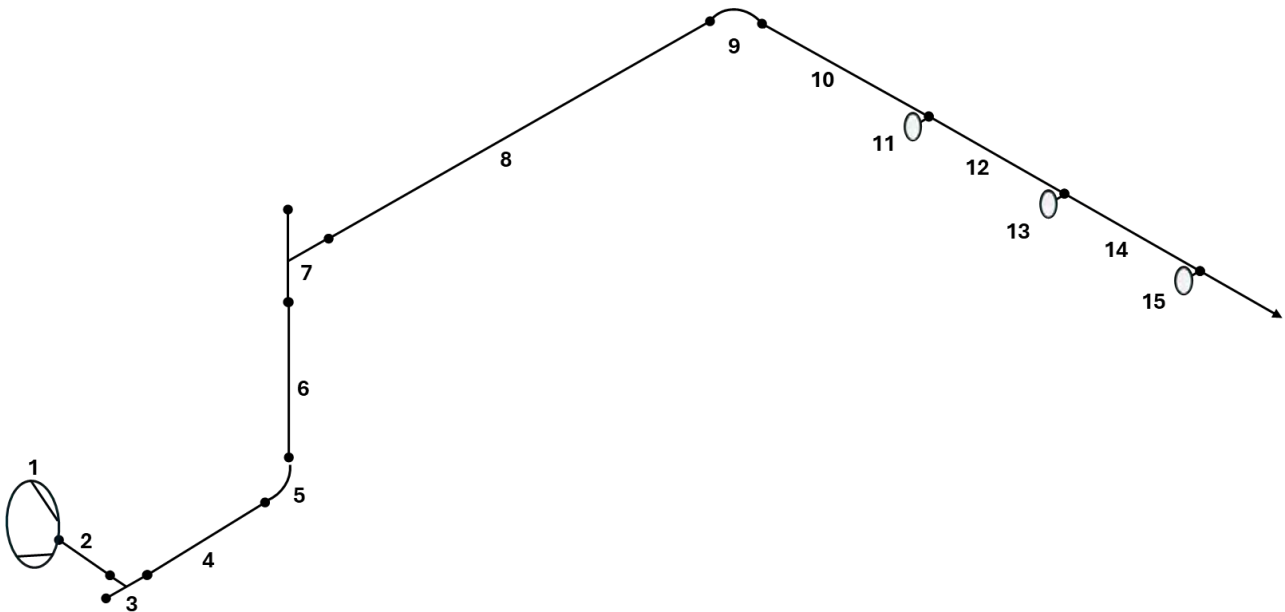
NPA 1000	
Max Wheel RPM / Max Laufradgeschwindigkeit / Vitesse de rotation maximale de la turbine / Massima velocità di rotazione della girante	[min <sup>-1</sup> ] 1400
Number of Blades / Schaufelanzahl / Nombre d'aubes / Numero di pale	z 10

C-0090 January 2014



Wheel size Laufrad-Baugröße Taille de la turbine Grandezza della girante	Volume flow range Volumenstrom Interval du débit Intervallo di portata	Speed range Drehzahl Interval de vitesse Intervallo di velocità	ΔL <sub>WA</sub>	ΔL <sub>WA</sub> oct3 63	ΔL <sub>WA</sub> oct3 125	ΔL <sub>WA</sub> oct3 250	ΔL <sub>WA</sub> oct3 500	ΔL <sub>WA</sub> oct3 1000	ΔL <sub>WA</sub> oct3 2000	ΔL <sub>WA</sub> oct3 4000	ΔL <sub>WA</sub> oct3 8000
NPA 1000	Area 1	RPM ≤ 840	12,2	10	7	-2	-2	-4	-11	-17	-23
		841 ≤ RPM ≤ 1080	11,6	9	7	-2	-4	-4	-10	-15	-22
	Area 2	RPM ≥ 1081	15,3	12	12	2	-6	-7	-10	-16	-21
		RPM ≤ 840	9,5	5	6	-2	-2	-4	-11	-16	-25
	Area 3	841 ≤ RPM ≤ 1080	8,0	3	4	-1	-4	-3	-10	-15	-22
		RPM ≥ 1081	7,3	2	2	1	-4	-5	-9	-15	-20
		RPM ≤ 840	11,6	8	8	0	-4	-4	-11	-15	-25
		841 ≤ RPM ≤ 1080	9,5	5	6	0	-5	-4	-10	-14	-21
		RPM ≥ 1081	8,4	3	4	2	-5	-5	-10	-16	-21

**DOCUMENT TECHNIQUE DT14 : représentation isométrique d'une partie du réseau de soufflage de la CTA du Hall**



N°	désignation	section en mm	Longueur en m	Débit en m <sup>3</sup> /h
1	Ventilateur NPA1000			50 000
2	Conduit droit	1200x1200		50 000
3	Embranchement Té	1200x1200		
4	Conduit droit	1200x1200	3	40 000
5	Coude arrondi	1200x1200		40 000
6	Conduit droit	1200x1200	3,4	40 000
7	Embranchement Té	1200x1200		
8	Conduit droit	1000x700	17	13 300
9	Coude arrondi	1000x700		13 300
10	Conduit droit	1000x700	5	13 300
12	Conduit droit	1000x700	3	12090
14	Conduit droit	1000x700	3	10880
11-13-15	Bouche soufflage WDA-K-SK 160	Φ 400		1210

# DOCUMENT TECHNIQUE DT15 : démarche de calcul acoustique dans les réseaux aérauliques

---

## Synoptique pour le calcul acoustique dans les réseaux aérauliques

### Pour chaque élément du réseau par bande d'octave

Détermination du niveau de puissance en entrée  
 $L_{we}$

Détermination de l'atténuation  
 $\Delta L_w$

Détermination de la régénération  
 $L_{wr}$

calcul du niveau de puissance en sortie  
 $L_{ws}$

Effectuer les calculs depuis la source jusqu'à la sortie du réseau

### Pour la détermination du niveau de pression à la position de l'auditeur

calculer la constante d'absorption R du local par bande d'octave

#### Pour chaque bouche de soufflage considérée

Déterminer la distance r de la bouche considérée à l'auditeur et son facteur de directivité Q

Calculer le niveau de pression de la bouche considérée à l'auditeur

Calculer le niveau de pression de l'ensemble du réseau aéraulique considérée à l'auditeur  
 $L_p$

Comparer le niveau de pression par bande d'octave aux courbes ISO et déterminer le niveau NR atteint

## DOCUMENT TECHNIQUE DT16 : formulaire acoustique

---

Somme de bruit : niveau de puissance ou de pression  $L_{\text{total}} = 10 \cdot \text{Log} \sum 10^{\frac{L_i}{10}}$

Passage d'un niveau de puissance a un niveau de pression de pression  $L_p = L_w + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$

Constante d'absorption acoustique:  $R = \frac{\alpha \cdot S}{1 - \alpha}$

où S est la surface des parois du local

## DOCUMENT TECHNIQUE DT17 : atténuation par bande de fréquence

Valeur de l'atténuation  $\Delta Lw$  pour 1m de conduit de section rectangulaire

plus petite dimension	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
75-200	0,66	0,66	0,5	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
205-400	0,66	0,66	0,5	0,33	0,23	0,23	0,23	0,23
405-760	0,66	0,66	0,33	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
815-1 525	0,33	0,17	0,17	0,1	0,07	0,07	0,07	0,07

Valeur de l'atténuation  $\Delta Lw$  pour un coude arrondi de section rectangulaire arrondi

largeur en mm	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
50 à 110	0	0	0	1	2	3	3	3
120 à 210	0	0	1	2	3	3	3	3
220 à 440	0	1	2	3	3	3	3	3
450 à 850	1	2	3	3	3	3	3	3
900 à 1 750	2	3	3	3	3	3	3	3
1 800 à 3 000	3	3	3	3	3	3	3	3

Valeur de l'atténuation  $\Delta Lw$  pour un embranchement en fonction des débits volumique Q  
(pour l'étude on la considèrera constante quel que soit la bande de fréquence)



$$\Delta Lw = -10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q_v \text{ réduit}}{Q_v \text{ amont}} \right)$$

## DOCUMENT TECHNIQUE DT18 : données de calcul acoustique du Hall

---

On considère que le niveau de pression acoustique au niveau de l'auditeur est dû à cinq bouches identiques.

Les distances des bouches à l'auditeur sont :

N° bouche	1	2	3	4	5
Distance a l'auditeur en m	6	9	9	21	21

La surface totale des parois prise en compte dans le Hall est  $S = 8\,500\text{ m}^2$ .

Le tableau suivant donne le coefficient de sabine moyen par bande d'octave

f en Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
$\alpha$	0,07	0,08	0,09	0,09	0,11	0,13	0,2	0,2

Le niveau de puissance acoustique de la bouche n°1 est donné par le tableau suivant :

f en Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Lw bouche 1	66,6	61,9	65,9	67,3	68,5	61,5	56,5	50,4

Le niveau de pression acoustique pour la position de l'auditeur dû aux bouches 2 à 5 est donné par le tableau suivant :

f en Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Bouche 1								
Bouche 2	49,3	44,4	48,2	49,6	50,5	43,4	38,1	32,0
Bouche 3	49,3	44,4	48,2	49,6	50,5	43,4	38,1	32,0
Bouche 4	45,9	40,7	44,4	45,7	46,3	38,8	32,7	26,6
Bouche 5	45,9	40,7	44,4	45,7	46,3	38,8	32,7	26,6



## DOCUMENT TECHNIQUE DT19 : piège à son à baffles

Format des baffles disponibles:

Hauteur: 600 ; 900 ; 1200 ; 1500 ; 1800 mm

Longueur: 600 ; 900 ; 1200 ; 1500 ; 1800 mm

Épaisseur: 100 ; 200 ; 300 mm



### Atténuation

#### Épaisseur 200 mm

Longueur baffle (mm)	Voie d'air (mm)	Fréquence (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
600	50	4	11	19	30	44	43	29	24
	100	2	5	12	21	28	27	17	12
	150	2	4	11	18	22	20	12	8
	200	1	4	9	13	17	14	7	6
1200	50	6	17	27	40	51	52	36	34
	100	4	10	29	33	49	45	26	18
	150	2	9	22	31	42	34	18	12
	200	2	7	17	25	32	24	12	8
1800	50	10	26	42	49	53	54	38	42
	100	6	14	39	46	52	50	34	22
	150	4	12	30	44	54	47	25	15
	200	4	10	24	36	45	31	16	9

### Régénération

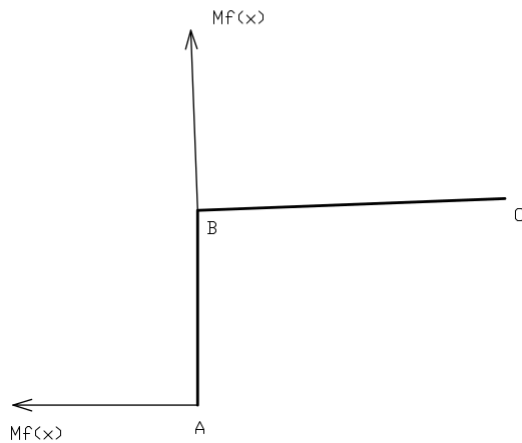
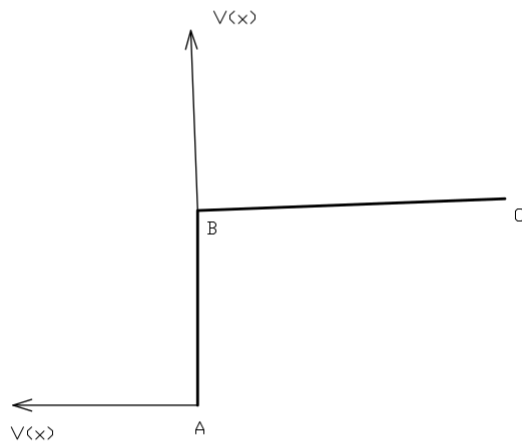
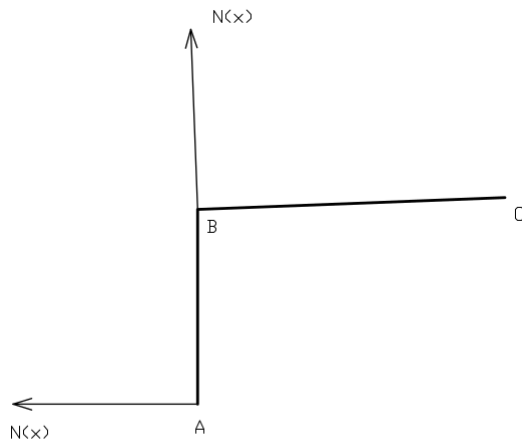
Vitesse (m/s)	Fréquence (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2	10	5	1	0	0	0	0	0
3	19	14	11	10	9	9	7	6
4	29	23	21	19	18	17	14	11
5	34	28	26	24	23	22	19	15
6	40	33	32	31	29	27	24	19
7	44	38	37	35	34	32	29	24
8	48	43	41	39	38	37	33	28
9	50	45	42	41	40	39	35	30
10	52	46	45	43	42	41	37	31
11	55	49	48	47	45	45	39	33
12	57	52	50	49	47	47	41	35
13	61	56	54	53	51	51	45	38
14	64	59	58	57	54	55	48	41
15	73	68	67	68	64	66	56	46



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document Réponse DR1

Q16 - Représenter l'allure des sollicitations internes  $N(x)$ ,  $V(x)$  et  $M_f(x)$  le long du poteau AB et de la poutre BC et indiquer les valeurs maximales



## Q43 – Compléter les tableaux

Coefficient d'absorption du local (R) par bande d'octave

centre de bande en Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$\alpha$	0,08	0,09	0,09	0,11	0,13	0,20
R						

Niveau de pression acoustique (Lp) en dB par bande de fréquence

centre de bande en Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
bouche 1						
bouche 2	44,38	48,22	49,61	50,54	43,38	38,06
bouche 3	44,38	48,22	49,61	50,54	43,38	38,06
bouche 4	40,74	44,36	45,74	46,29	38,81	32,71
bouche 5	40,74	44,36	45,74	46,29	38,81	32,71

Lp resultant						
--------------	--	--	--	--	--	--

Q43 – Tracer le spectre

