

SESSION 2017

AGRÉGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

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	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	103	1268

1. Présentation du projet Beluga XL

Le sujet s'appuie sur la conception et la fabrication des différentes parties du nouvel avion de transport de pièces mécaniques de grande envergure d'Airbus, le BELUGA XL (figure 1), ainsi que son assemblage final. Ce programme a été lancé en 2014, cinq appareils devraient être produits, avec une certification pour le premier appareil en 2019.



Figure 1
Rendu réaliste de la maquette de conception du BELUGA XL

Pour ce nouveau BELUGA XL, pour des raisons économiques, le choix de conception est basé sur une hybridation de l'A330.

La conception s'appuie sur une structure partielle d'A330, appelée NFA en sortie des chaînes de montage. Le fuselage du NFA sera ensuite découpé afin d'accueillir le nouveau fuselage du BELUGA XL.

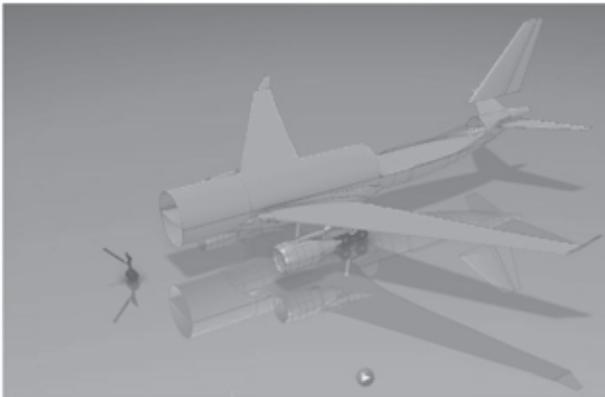


Figure 2
NFA

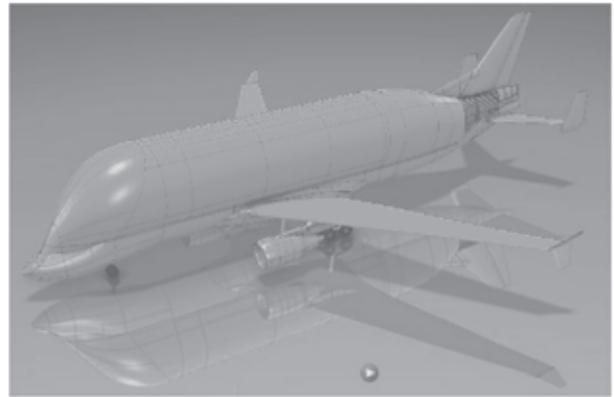


Figure 3
Fuselage Beluga assemblé

Les études proposées dans le sujet permettent de répondre à certaines exigences du diagramme des exigences partiel relatif à « la conception d'une solution d'hybridation de l'A330 vers le BELUGA XL » (figure 4).

Elles ont pour objectif de valider un ensemble de solutions permettant la production en petite série du BELUGA XL et concernent :

- la manipulation du NFA (étude 1) ;
- le déplacement du NFA vers le site de production (étude 2) ;
- la mise en position de la structure du NFA sur le site de production (étude 3) ;
- la découpe du fuselage du NFA (étude 4).

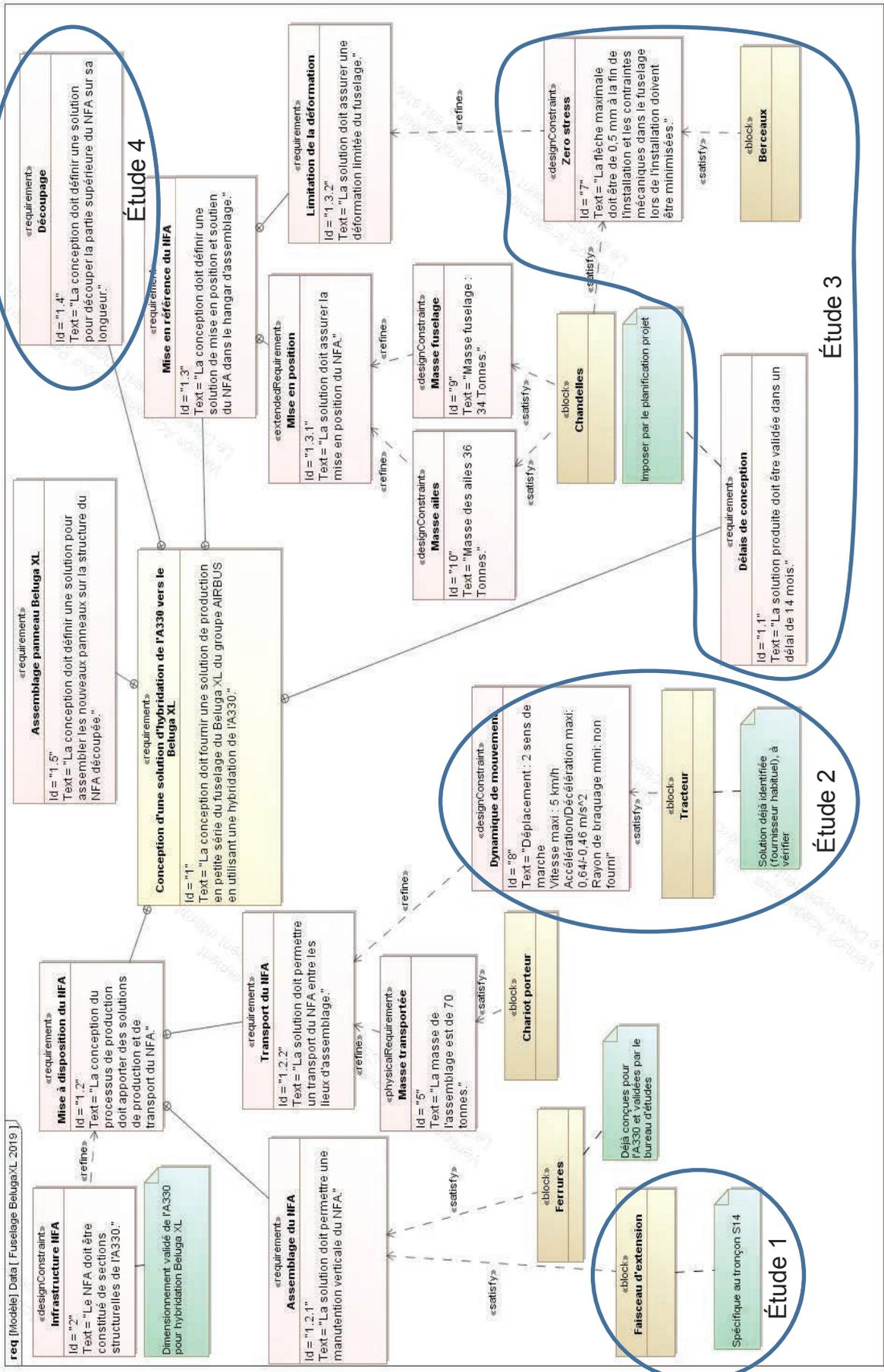


Figure 4
Diagramme des exigences

Notations utilisées :

- torseur des actions mécaniques de i sur j exprimé au point M dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\{T_{i \rightarrow j}\}_M = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_{ij} \\ \vec{M}_{M,ij} \end{array} \right\}_M = \left\{ \begin{array}{cc} X_{ij} & L_{ij} \\ Y_{ij} & M_{ij} \\ Z_{ij} & N_{ij} \end{array} \right\}_{M; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}} ;$$

On pourra, afin de simplifier les notations, pour une liaison, utiliser la notation simplifiée pour les composantes du torseur exprimé au point M dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\{T^M_{i \rightarrow j}\}_M = \left\{ \begin{array}{cc} X_M & L_M \\ Y_M & M_M \\ Z_M & N_M \end{array} \right\}_{M; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}} ;$$

- torseur cinématique du mouvement de i par rapport à j au point M dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\{V_{i/j}\}_M = \left\{ \begin{array}{c} \vec{\Omega}_{i/j} \\ \vec{V}_{M,i/j} \end{array} \right\}_M = \left\{ \begin{array}{cc} \omega_{x \ ij} & V_{Mx \ ij} \\ \omega_{y \ ij} & V_{My \ ij} \\ \omega_{z \ ij} & V_{Mz \ ij} \end{array} \right\}_{M; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}} ;$$

- torseur dynamique de i dans son mouvement par rapport au référentiel galiléen Rg au point M dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\{D_{i/Rg}\}_M = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_{di/j} \\ \vec{\delta}_{M,i/j} \end{array} \right\}_M = \left\{ \begin{array}{cc} R_{dx \ ij} & \delta_{Mx \ ij} \\ R_{dy \ ij} & \delta_{My \ ij} \\ R_{dz \ ij} & \delta_{Mz \ ij} \end{array} \right\}_{M; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}} .$$

2. Étude 1 : manipulation du NFA

Mise en situation

Le NFA issu de la chaîne d'assemblage ne permet pas d'envisager une manipulation de sa structure sur sa partie avant sans déformer et endommager celle-ci lors de la phase de mise en position pour le découpage. C'est pourquoi, il est nécessaire d'ajouter des raidisseurs et un faisceau d'extension à la structure du NFA (figure 5).

Les concepteurs du processus ont donc dû définir :

- une structure d'extension en treillis appelée faisceau ;
- une solution de liaison entre le faisceau et le NFA.

Objectif général : valider les solutions constructives de liaison et de dimensionnement du faisceau.

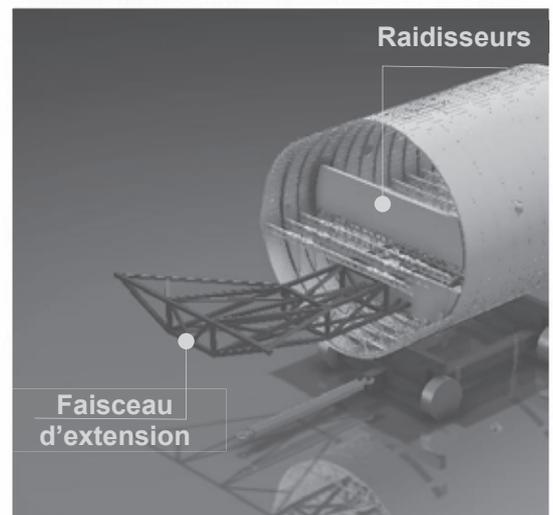


Figure 5
NFA muni du faisceau d'extension

Objectif 1 : valider une solution constructive de liaison permettant de répartir la charge sur la structure du NFA.

La structure du NFA dispose de six rails parallèles fixés longitudinalement sur le pont inférieur de la soute avec des points d'accrochage prédéfinis.

Afin de répartir la charge, le choix de la liaison globale entre le faisceau et les rails du NFA s'est orienté vers celui d'une structure à 4 étages de plusieurs palonniers comme le montrent le schéma et le modèle cinématique associé de la figure 6. Le faisceau sera ainsi lié au dernier étage en trois points.

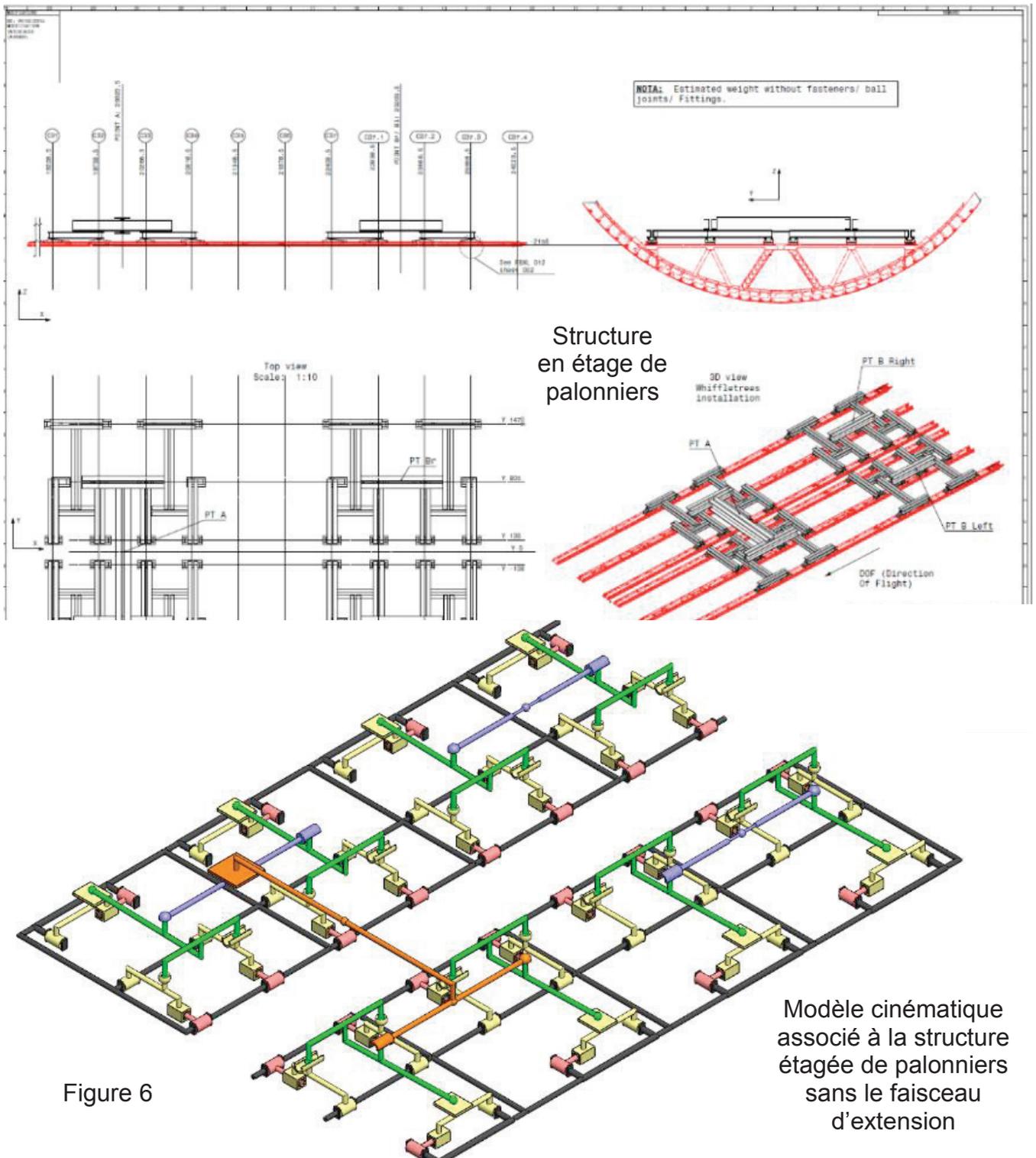


Figure 6

Le modèle cinématique proposé pour les deux étages inférieurs de palonniers est donné figure 7. Il sera répété 8 fois. Chaque étage inférieur est en liaison avec l'étage supérieur 3 en M par une liaison soit sphérique, soit sphère/cylindre de direction \vec{x} , soit sphère/plan de normale \vec{z} :

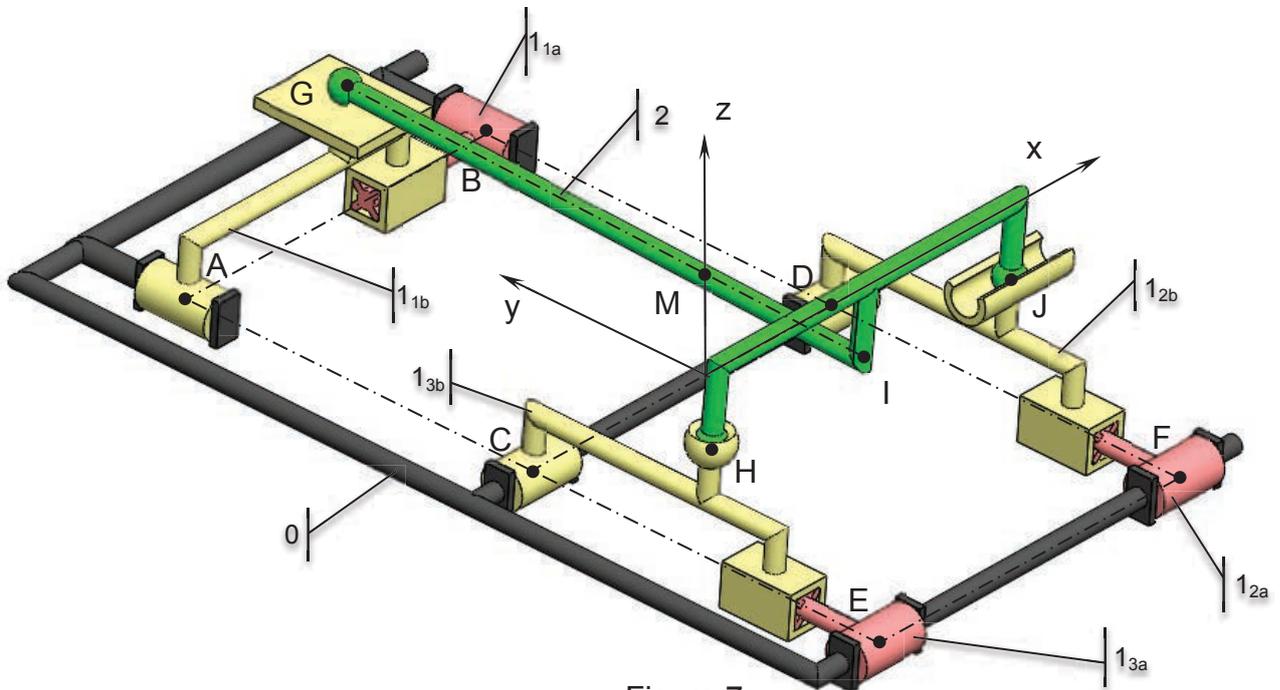


Figure 7
Modèle cinématique des étages inférieurs

Données géométriques :

$$\overline{AC} = \overline{BD} = \overline{CE} = \overline{DF} = \overline{GM} = \frac{2}{3}\overline{GI} = -d\vec{y} \quad \text{avec } d = 665 \text{ mm}$$

$$\overline{AG} = e\vec{x} + h\vec{z} \quad \text{avec } e = 265 \text{ mm et } h = 25 \text{ mm}$$

$$\overline{AB} = \overline{CD} = \overline{EF} = \overline{HJ} = 2\cdot\overline{HI} = 2\cdot e\vec{x}$$

Question 1

Montrer que la chaîne fermée $\{0 ; 1_{1a} ; 1_{1b}, 0\}$ présente un degré d'hyperstatisme $h_1 = 3$. Quel est l'intérêt d'un tel degré d'hyperstatisme par rapport à la structure porteuse ?

Question 2

Proposer sous forme schématique, une cotation fonctionnelle permettant d'assurer le montage de l'ensemble $\{0 ; 1_{1a} ; 1_{1b}\}$ pour les surfaces de révolution participant aux liaisons pivots avec la pièce 0 (on notera t la tolérance associée).

Question 3

Déterminer la nature de la liaison équivalente entre 2 et 0. Montrer que quelle que soit sa nature, la connaissance du chargement extérieur appliqué à 2 en M par l'étage supérieur permet de déterminer les torseurs d'actions mécaniques de 2 sur 1_{1b} , pour tout $i \in \{1 ; 2 ; 3\}$.

Question 4

En supposant que les actions mécaniques exercées par l'étage supérieur 3 (non représenté sur la figure 7) sur 2 sont, en l'absence de toutes autres actions mécaniques extérieures, de la forme :

$$\{T_{3 \rightarrow 2}\}_M = \begin{Bmatrix} X_{32} & 0 \\ Y_{32} & 0 \\ Z_{32} & 0 \end{Bmatrix}_{M; \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}}$$

En supposant que X_{32} et Y_{32} sont négligeables devant Z_{32} , montrer en utilisant la relation $h \ll e < d$, que l'action suivant \bar{z} dans chaque palier 1_{ij} en liaison avec 0 vaut $Z_1 \approx Z_{32} / 6$.
Que peut-on dire alors de la solution proposée en termes de répartition de la charge ?

Question 5

Pour les mêmes actions mécaniques exercées par 3 sur 2 en M, déterminer les indices ij des solides 1_{ij} en liaison avec 0 qui transmettent le chargement extérieur au NFA suivant \bar{x} et \bar{y} .

En déduire, la liaison entre 1_{ij} et 0 la plus sollicitée.

L'étude complète de la structure, en y ajoutant les étages supplémentaires et le faisceau d'extension et connaissant la charge appliquée par le milieu extérieur, a permis de déterminer que le point d'ancrage le plus sollicité subissait une charge maximale $F_{\max i}$ de 5 200 N.

Remarque : on appelle point d'ancrage le lieu d'une liaison entre la structure à étages et le faisceau d'extension.

Le bureau d'étude garantit une charge limite admissible par les points d'ancrage de 25 000 N.

Question 6

Valider dès lors la solution de palonniers, en supposant que le bureau d'étude impose un coefficient de sécurité de 4 pour cette liaison.

Question 7

La figure 8 ci-contre présente la structure des poutres utilisées sur 4 étages pour assurer la transmission d'efforts choisie par le bureau d'études.

Justifier le choix d'accroissement des sections droites des poutres suivant l'étage qu'elles constituent par rapport à l'objectif visé.

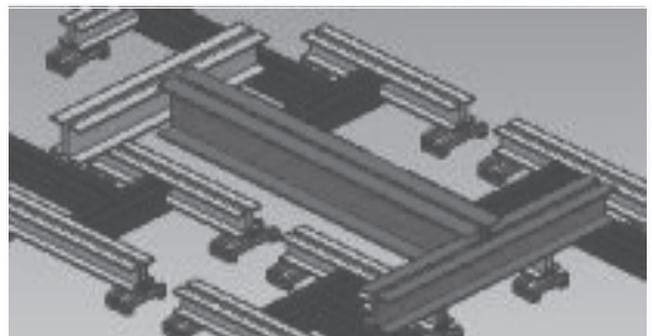


Figure 8

Visualisation des poutres de structure

Objectif 2 : valider le dimensionnement du faisceau d'extension

Les résultats de simulations sur la structure d'extension réalisée en acier S235JR sont obtenus par un logiciel d'éléments finis.

Pour les 2 cas de charges les plus défavorables en utilisation, ces résultats sont donnés sur les figures 9 et 10.

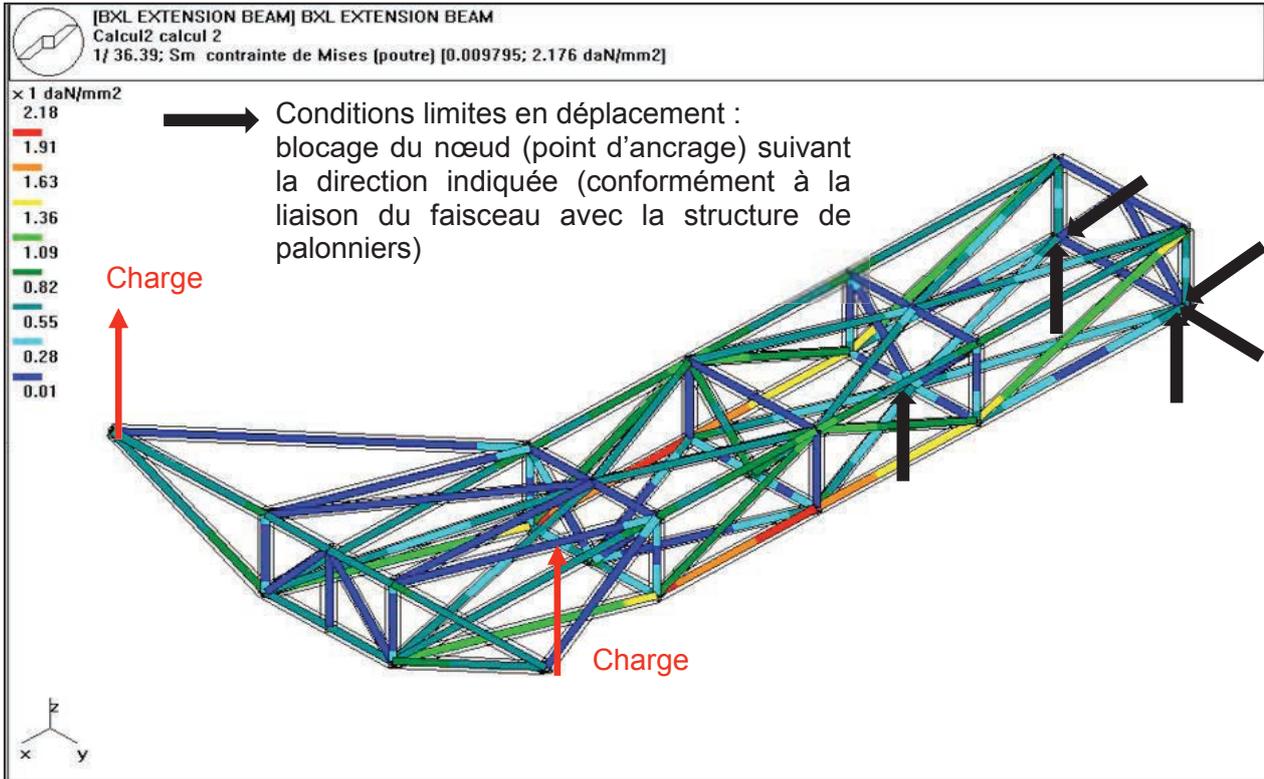


Figure 9
Charges appliquées suivant \vec{z} à l'extrémité du faisceau d'extension

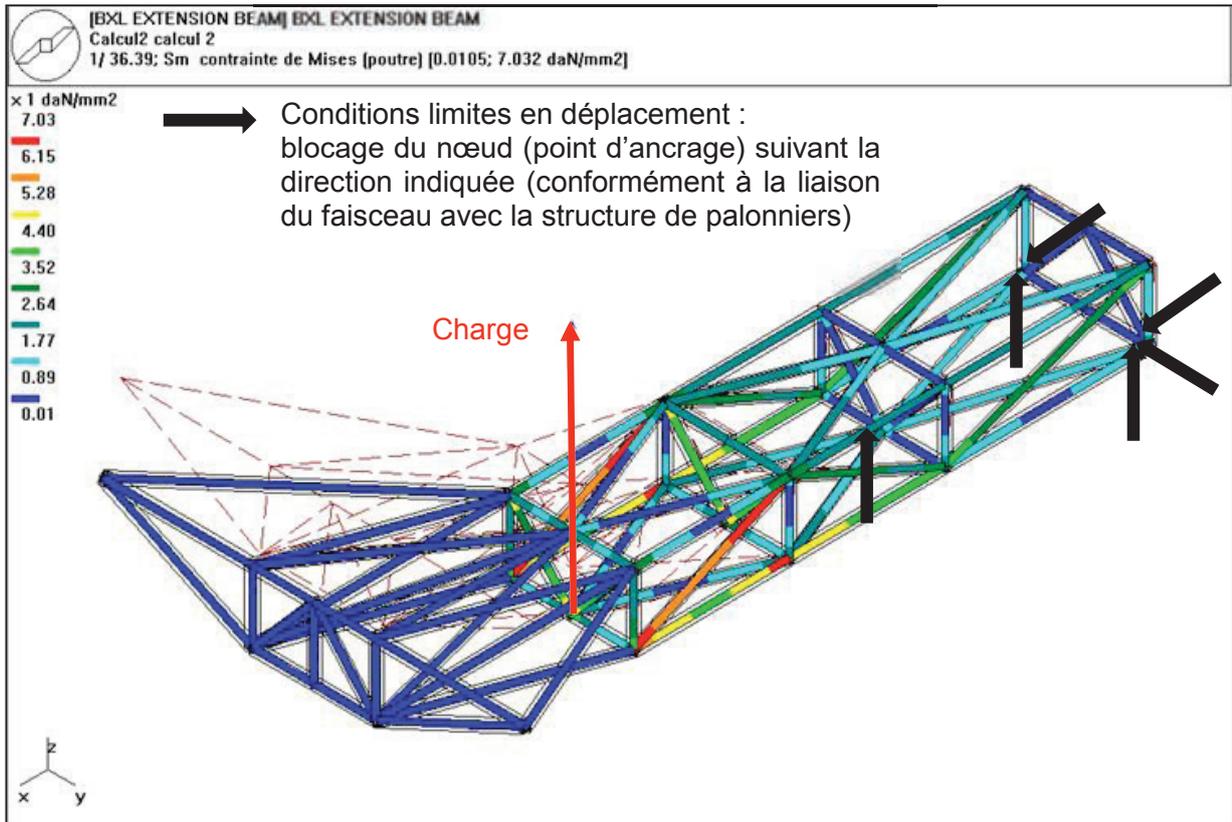


Figure 10
Charge appliquée suivant \vec{z} à l'extrémité de la section constante rectangulaire du faisceau

Question 8

En analysant la structure en treillis, justifier la situation géométrique (nœud de liaison, orientation) des barres les plus sollicitées.

Question 9

Valider le dimensionnement de la structure proposée à partir des résultats de simulation.

Objectif 3 : proposer les choix techniques pour la réalisation du treillis.

Le choix de l'assemblage s'est porté sur une structure mécanosoudée. Les profilés utilisés sont en acier S235JR et sont tubulaires de section carrée définie figure 11.

On s'intéressera ici uniquement au cadre le plus sollicité du treillis dont la structure géométrique assemblée est donnée figure 12.

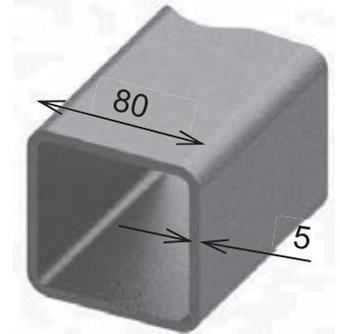


Figure 11

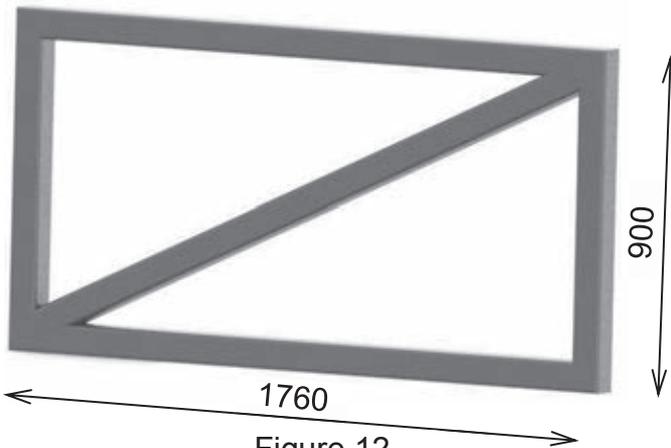


Figure 12
Structure cadre

Question 10

Proposer et justifier une technologie de soudage compatible avec le matériau utilisé dans le cadre d'une production quasi-unitaire.

Question 11

Proposer sous forme de dessin à main levée une solution de conception du cadre en faisant apparaître la définition des cordons de soudure compatibles avec le contexte d'utilisation et le procédé de

fabrication.

On rappelle, que lors de la soudure, il existe une zone du matériau qui ne fond pas mais qui est affectée par le process : la Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Dès lors dans la dimension transverse à la soudure, on a évalué l'évolution de la résistance élastique du matériau (Re) en fonction du cycle thermique de soudage dans des conditions optimales de réglage et en absence de préchauffage (figure 13).

Question 12

Expliquer les raisons pour lesquelles la ZAT possède des caractéristiques mécaniques plus faibles que le métal de base proche de la zone fondue.

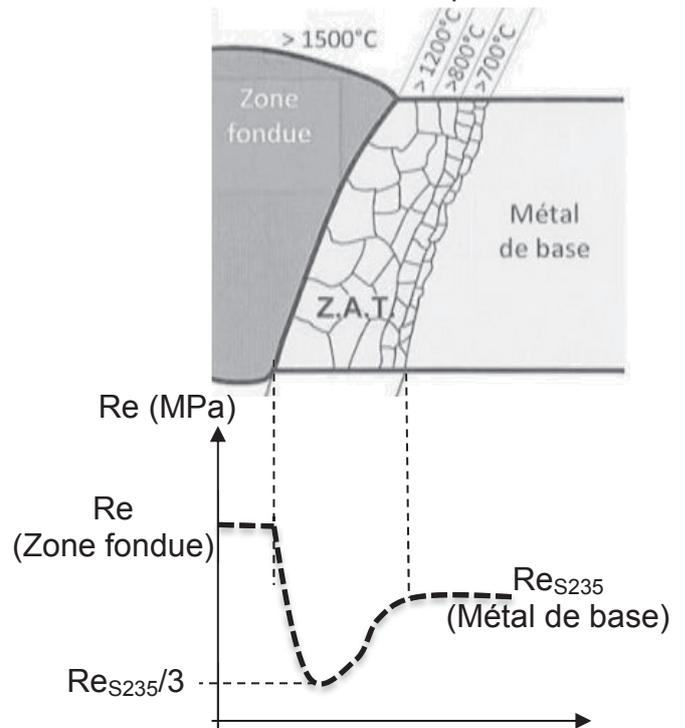


Figure 13
Évolution de Re en fonction de la distance au cordon de soudure suivant la direction transverse

Question 13

À partir des résultats du dimensionnement du treillis, déterminer si le processus de fabrication remet en cause la structure par rapport aux charges appliquées.

Question 14

Proposer des solutions pour limiter l'impact des phénomènes thermiques en agissant directement sur le processus de soudage ou par l'installation d'un processus complémentaire.

Question 15

Conclure sur la faisabilité de la solution par adjonction d'un faisceau d'extension pour assurer la manipulation du NFA.

3. Étude 2 : déplacement du NFA

Objectif général : justifier les choix techniques pour les déplacements du NFA.

Afin d'assurer le transport du NFA, une structure spécifique de remorquage appelée chariot va être installée sous son fuselage. Le NFA est alors lié à cette structure et sanglé afin d'assurer son maintien en position.

Le chariot est ensuite attaché à un tracteur par l'intermédiaire d'une barre de tractage qui assure son déplacement, par la transmission d'un effort horizontal au niveau de l'axe des roues « avant » du chariot.

L'ensemble NFA-chariot repose alors, pendant la phase de roulage, sur les roues porteuses du chariot et celles des trains d'atterrissage principaux situés sous les ailes (voir figure 14 ci-contre).

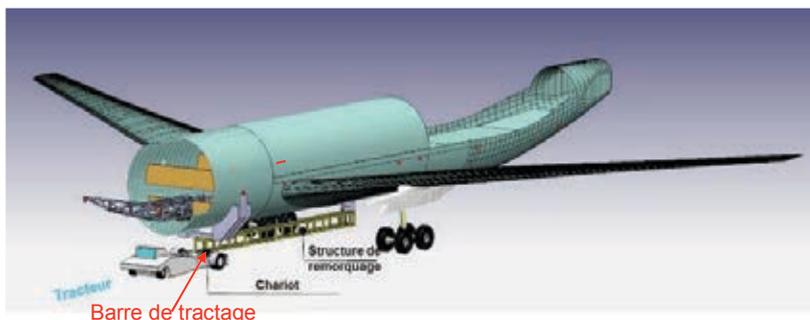


Figure 14
NFA remorqué

Les exigences concernant les mouvements imposées par le bureau d'études lors du transport pour des trajectoires rectilignes sont :

- deux sens de déplacement (marche arrière et avant) ;
- vitesse maximale de déplacement limitée à 5 km/h ;
- accélération maximale limitée à $A_x = 0,64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- décélération maximale limitée à $D_x = -0,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Le problème est supposé plan de par le mouvement étudié, la symétrie de la géométrie et des chargements.

Le contact roues/sol est alors modélisé par des contacts ponctuels en M et N dans le plan de symétrie (figure 15). Ces liaisons supposées avec frottement suivant un modèle de Coulomb, de coefficient f estimé dans le cas le plus défavorable égal à 0,05.

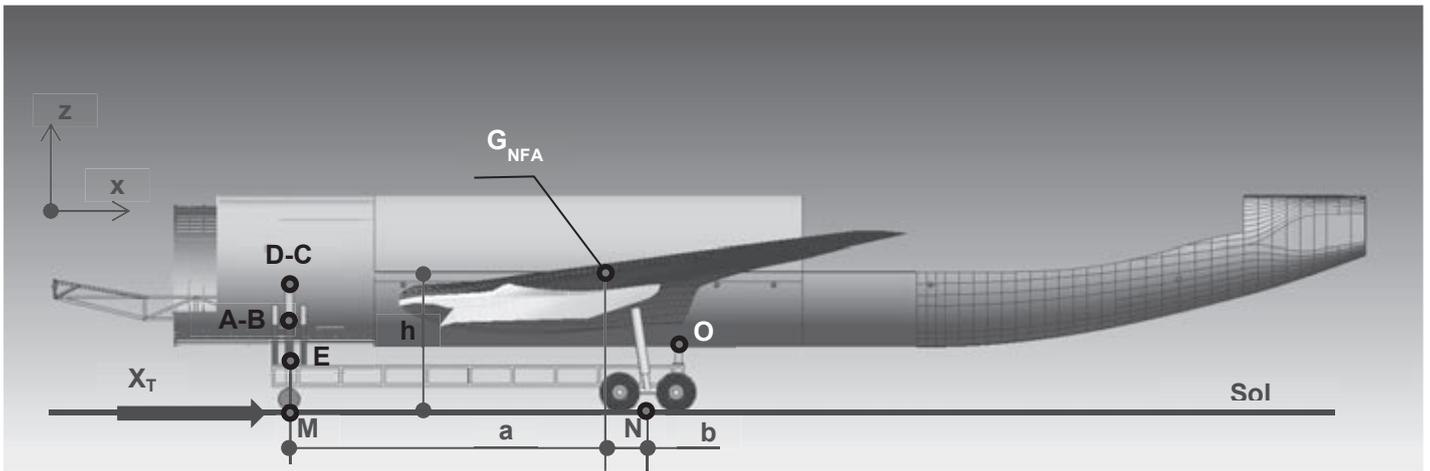


figure 15
Modèle d'étude dynamique du
déplacement du NFA

On donne, les grandeurs suivantes concernant l'étude dynamique envisagée :

- $a = 10,85 \text{ m}$;
- $b = 1,76 \text{ m}$;
- $h = 3,80 \text{ m}$;
- $m_{\text{NFA}} = 77\,000 \text{ kg}$ (masse de l'ensemble : NFA + chariot et structure de remorquage) ;
- G_{NFA} (centre de gravité de l'ensemble : NFA + chariot et structure de remorquage) ;
- $-\vec{g} \cdot \vec{z} = g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (accélération de pesanteur).

Hypothèses d'étude supplémentaires :

- on limite l'étude à des déplacements uniquement suivant des trajectoires rectilignes de telle façon que l'action de la barre de tractage sur le chariot X_T soit portée par \vec{x} ;
- on supposera que la hauteur d'accrochage de la barre de tractage par rapport au sol est suffisamment faible pour considérer que son action sur le chariot est dans le plan du sol.

Un modèle cinématique complémentaire entre le chariot, composé de l'ensemble {berceau (1), infrastructure (2) et roues porteuses (3)} et le NFA (4) construit à partir de la documentation Airbus est proposé figure 16 ci-après, où on considère les liaisons sans frottement :

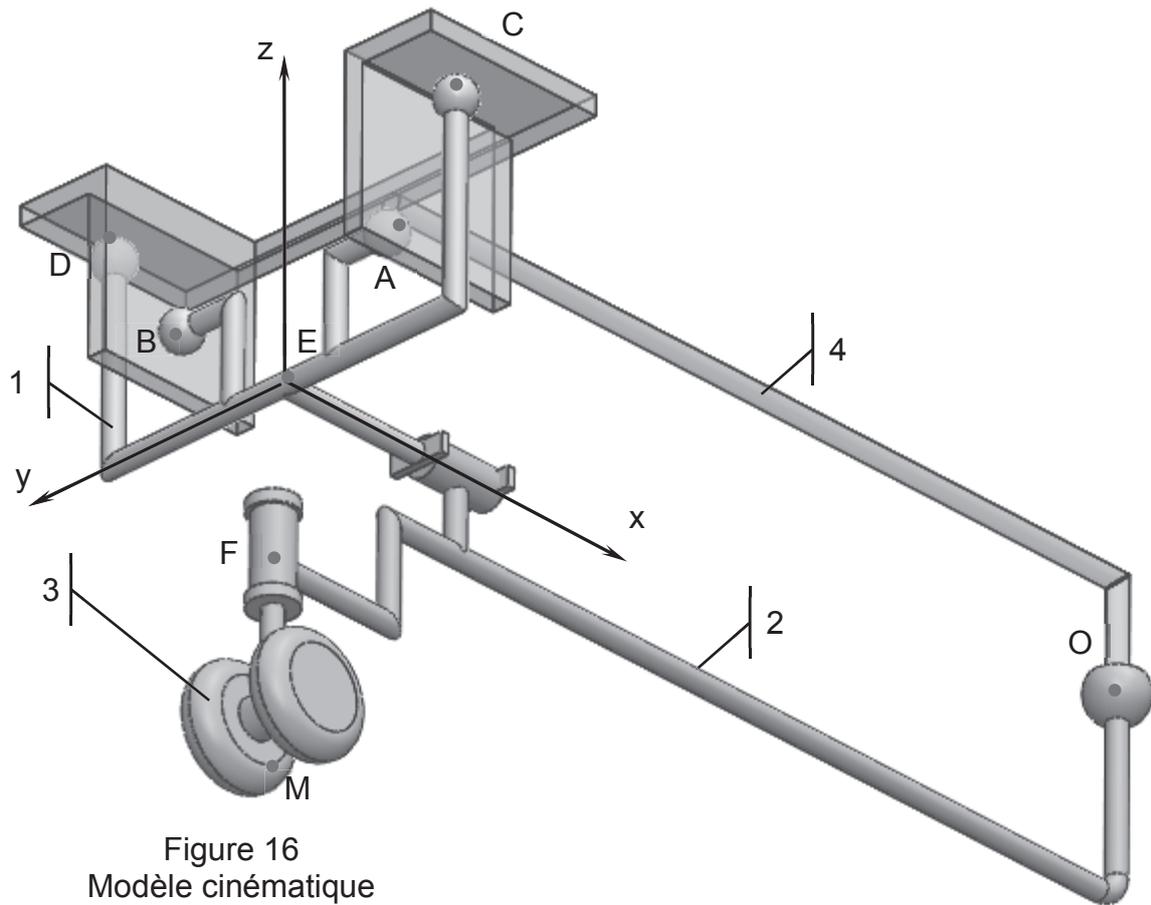


Figure 16
Modèle cinématique
Liaison NFA-Chariot

Données géométriques :

- $\overline{OC.x} = \overline{OD.x} = \overline{OE.x} = \overline{OF.x} = \overline{OA.x} = \overline{OB.x} = x_C$
- $\overline{OC.y} = \overline{DO.y} = y_C$; $\overline{OA.y} = \overline{BO.y} = y_A$; $\overline{OE.y} = \overline{OF.y} = 0$;
- $\overline{OC.z} = \overline{OD.z} = z_C$; $\overline{OA.z} = \overline{OB.z} = z_A$; $\overline{OE.z} = z_E$; $\overline{OF.z} = z_F$.

Le point F de la figure 16 caractérise la liaison pivot entre les roues porteuses (3) et l'infrastructure du chariot (2).

Les liaisons en C et D sont réalisées entre le berceau (1) et des ferrures spécifiques du fuselage du NFA (4). Afin de ne pas les rompre, l'effort transmis ne doit pas dépasser 8 000 daN en ces points. Les appuis sur les ferrures sont de nature unilatérale.

Les liaisons en A et B représentent l'appui entre le fuselage du NFA (4) et le berceau de soutien (1) pour encaisser les actions mécaniques transverses.

La liaison en O est une liaison rotule, modèle simplifié d'une liaison assurée entre l'infrastructure (2) et le NFA (4).

Objectif 1 : valider la solution porteuse du NFA.

Question 16

En s'appuyant sur le modèle de la figure 15 et en appliquant le principe fondamental de la dynamique à l'ensemble {NFA + chariot}, écrire la ou les équation(s) pertinente(s)

permettant de déterminer l'action normale appliquée par le sol sur les roues porteuses du chariot.

Préciser les conditions de mouvement qui conduisent à une action normale maximale en M.

Faire l'application numérique.

Question 17

On suppose que les solides (1), (2) et (3) ont une masse négligeable.

En s'appuyant sur le modèle de la figure 16 et en appliquant le principe fondamental de la dynamique à (1), $\{(1) + (2)\}$ et $\{(1) + (2) + (3)\}$, écrire les équations pertinentes permettant de montrer que les actions exercées sur les ferrures aux points C et D sont égales en norme.

L'étude du problème global a permis d'estimer que les actions valent, dans le cas le plus défavorable, 6 014 daN pour un trajet rectiligne et correspondent environ à la moitié de l'action exercée par le sol sur les roues porteuses.

Question 18

En supposant que les liaisons en C et D sont celles critiques en terme de dimensionnement lors de la traction du NFA, conclure quant à la possibilité de déplacer le NFA en utilisant la solution proposée.

Objectif 2 : choisir le tracteur de remorquage.

Des véhicules de manutention existent déjà et sont disponibles sur le site de production. Le bureau d'études envisage donc de choisir parmi les tracteurs existants et répertoriés ci-dessous figure 17 (caractéristiques de performances fournies).

	TPX200	TPX200S
MOTEUR THERMIQUE	PERKIN 1004-40	DEUTZ BF4M1013C COM1 4 cyl. 115kW/2300tr/mn
POMPE HYDRO	1 Pompe A4VG180 REXROTH	1 pompe A4VG180 REXROTH
MOTEURS DE ROUES	2 moteurs POCLAINS MS35	2 moteurs POCLAINS MS50
EFFORT AU CROCHET	9 200 daN maxi / 67 850 lbs.ft	11 000 daN maxi / 81 120 lbs.ft
VITESSE MAXIMALE	22 km/h / 13,7 mph	17 km/h / 10,6 mph
FREIN DE SERVICE	Freinage hydraulique sur les roues avant et tambour sur les roues arrière	Freinage hydraulique sur les roues avant et tambour sur les roues arrière
FREIN DE PARK	Frein multidisques intégrés aux moteurs hydrostatiques appliqués par ressort et défreinés hydrauliquement	Frein multidisques intégrés aux moteurs hydrostatiques appliqués par ressort et défreinés hydrauliquement
ROUES AVANT	385 / 65 R22.5	445 / 65 R22.5 XZA
ROUES ARRIERES	245 / 70 R17.5	245 / 70 R17.5
POIDS MAXI ADMISSIBLE	25 000 kg / 55 000 lbs	35 000 kg / 77 100 lbs
POIDS DU TRACTEUR	11 000 kg / 24 200 lbs	11 500 kg / 25 300 lbs

	TPX200MT
MOTEUR THERMIQUE	DEUTZ BF6M1013CP COM1 6 cyl. 190kW/2400tr/mn
POMPE HYDRO	2 pompes A4VG125 REXROTH
MOTEURS DE ROUES	2 moteurs POCLAINS MS50
EFFORT AU CROCHET	10 000 daN maxi / 74 490 lbs.ft
VITESSE MAXIMALE	25 km/h / 15,6 mph
FREIN DE SERVICE	Freinage hydraulique sur les roues avant et tambour sur les roues arrière
FREIN DE PARK	Frein multidisques intégrés aux moteurs hydrostatiques appliqués par ressort et défreinés hydrauliquement
ROUES AVANT	445 / 65 R22.5 XZA
ROUES ARRIERES	295/60 R19.5
POIDS MAXI ADMISSIBLE	35 000 kg / 77 100 lbs
POIDS DU TRACTEUR	13 000 kg / 28 650 lbs

Figure 17
Caractéristiques des tracteurs disponibles sur site

Question 19

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à l'ensemble {NFA + chariot + structure de remorquage}, écrire l'équation pertinente permettant de déterminer l'action que doit exercer le tracteur, grâce à la barre de tractage, sur les roues porteuses du chariot lors des trois phases : accélération, vitesse constante et décélération. Faire l'application numérique dans les 3 cas, pour la marche avant et la marche arrière.

Question 20

Déterminer alors la puissance P_m développée par le tracteur sur le chariot dans son mouvement par rapport au sol pour une trajectoire rectiligne à vitesse constante maximale en supposant le non glissement au contact roue/sol.

Question 21

Valider alors la possibilité d'utiliser un tracteur déjà présent sur le site et donner sa référence.

4. Étude 3 : mise en position du NFA

Objectif général : valider la solution de mise en position du NFA pour répondre à la contrainte zéro stress nécessaire aux opérations d'enlèvements de matière et d'assemblage.

La mise en position horizontale du fuselage du NFA est assurée par un ensemble de chandelles (JIGS) et berceaux (CRADDLES) réglables en hauteur. Cette structure fortement hyperstatique est nécessaire pour assurer une déformation limitée du fuselage du NFA, avant tout découpage de ce dernier.

Les chandelles sont installées par couples (symétriquement de part et d'autre du fuselage du NFA) et réalisent des appuis sur des ferrures spécifiquement rapportées de façon temporaire sur l'infrastructure du fuselage (à travers ses parois) ou bien sur des organes déjà présents pour d'autres nécessités de maintenance. La pose des ferrures entraîne des enlèvements de matière sur les parois du fuselage. Afin de ne pas mettre en péril celui-ci, ces ferrures seront donc en nombre limité.

C'est pourquoi, on adjoint aux chandelles des berceaux de géométries spécifiques au lieu de chargement, et installés sur la partie inférieure du fuselage aux droits des cadres, cerclages structuraux, de ce dernier. Ces berceaux réaliseront des appuis de type surfacique de largeur limitée.

Toutefois, les actions mécaniques supportables par ces derniers sont inférieures à celles des chandelles.

Les lieux d'appuis sont définis géométriquement par leur abscisse respective par rapport à l'extrémité avant du NFA.

Le lieu d'implantation des organes de soutien et leur réglage doivent être optimisés pour limiter la flèche maximale du fuselage. De même, sachant que l'on ne peut installer tous les points d'appuis simultanément, il est nécessaire de définir l'ordonnancement de l'installation des appuis afin de limiter les états de contraintes sur la structure de l'A330.

Objectif 1 : justifier l'utilisation d'une modélisation simplifiée.

L'infrastructure du NFA, permet d'envisager une mise en place du fuselage suivant son axe sur n appuis.

Le bureau d'études de la division Beluga XL a estimé dans une pré-étude à $n = 12$ le nombre minimal d'appuis à mettre en place et a défini leur abscisse possible sur le fuselage du NFA indépendamment de leur nature (chandelles ou berceau).

Les appuis seront mis en place de façon séquentielle (c'est-à-dire les uns après les autres). On appelle par la suite, séquence, la définition dans l'ordre temporel de la mise en place des appuis.

Question 22

Déterminer le nombre N_{seq} de séquences possibles d'installation de ces 12 appuis (on fera l'hypothèse que les deux premiers appuis seront positionnés sur des lieux figés prédéfinis).

On suppose que le temps de calcul nécessaire pour obtenir le résultat de la déformation de la structure par simulation numérique pour une séquence donnée, en utilisant une étude éléments finis 3D, est au minimum de $t_{min3D} = 5$ min.

La division calcul du bureau d'études dispose de moyens lui permettant de lancer 20 simulations différentes simultanément. De plus, on suppose que 20 % des calculs ne seront pas envisagés car correspondant à des cas non réalistes.

Question 23

Estimer alors le temps global de calcul t_{gcal3D} nécessaire pour obtenir tous les résultats possibles et choisir la solution adéquate.

Question 24

Conclure quant à l'exigence de respect du planning prévisionnel qui prévoit, en début de projet, 14 mois pour réaliser la conception de la solution pour la mise en production du BELUGA XL.

La multiplicité des solutions ne permet pas d'envisager une étude par éléments finis 3D de la structure complète, les temps de calculs estimés s'avérant trop grands par rapport aux délais autorisés de conception.

Dans ce cadre, la division calcul envisage une solution par discrétisation sous forme de modèle poutre du fuselage, en exploitant les données géométriques et de répartition de masses du modèle 3D. Elle vérifiera alors le résultat obtenu par un rebouclage en réalisant une simulation 3D de la séquence solution issue du modèle 1D afin de vérifier sa pertinence.

Question 25

En estimant que le temps de calcul nécessaire pour obtenir un résultat de la mise en position suivant une séquence en utilisant une simulation éléments finis 1D est au maximum de $t_{min1D} = 30$ s, déterminer le nouveau le temps global de calcul t_{gcal1D} dans les mêmes conditions que pour les questions 22, 23 et 24.

Question 26

Conclure quant à la possibilité qu'une telle modélisation puisse permettre de valider l'exigence concernant le respect du planning prévisionnel.

Objectif 2 : valider les premières phases du séquençement.

Pour cela, il s'agit de déterminer, dans un premier temps, à partir d'un modèle simplifié du type de celui du bureau d'études, la charge encaissée par le premier couple d'appuis (chandelles) mis en place.

Puis il est nécessaire de valider la position optimale et la charge encaissée par le second couple de chandelles afin de valider le début de la solution d'une mise en place séquentielle des appuis.

Description des phases préliminaires de mise en position :

La mise en place des deux premiers appuis temporaires a été validée.

Lors de la phase 1, un appui est installé sur le faisceau d'extension objet de l'étude 1 et un autre est installé à l'abscisse 41 970 mm. Celui-ci sera par ailleurs conservé jusqu'à l'installation de toutes les chandelles.

Ensuite, des chandelles non étudiées ici sont installées sous les ailes de façon à éliminer leur effet sur le fuselage (la solution a fait l'objet d'une étude préliminaire validée par le bureau d'études).

Durant la phase 2 de l'installation, le faisceau d'extension et son appui sont ôtés après l'installation d'un premier couple de chandelles à l'abscisse 7 950 mm.

Dès lors le fuselage n'est plus en appui que sur deux couples de chandelles d'abscisses respectives :

- point A → 7 950 mm ;
- point B → 41 970 mm.

Le premier découpage en tranches de l'avion a conduit à un modèle équivalent poutre suivant :

- la section de l'avion est supposée cylindrique par tronçon de longueur l_k tel que le moment quadratique de la section droite suivant une direction transverse I_{Gz} soit égal à celui donné par la modélisation 3D ;
- le modèle est limité à 3 tronçons différents indicés $k = \{1,2,3\}$;
- le fuselage n'est sollicité que par son propre poids, suivant un modèle de répartition uniforme par tronçons, proportionnel à sa masse volumique ρ_{eq} et à l'accélération de pesanteur $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. La masse volumique sera supposée constante le long de la poutre et sera déterminée à partir de la masse globale du NFA, $M_{TF} = 34\,000 \text{ kg}$;
- la ligne moyenne sera supposée rectiligne ;
- la poutre a un module d'élasticité constant, $E = 70 \text{ GPa}$.

Hypothèses :

- à partir des considérations de symétries, on supposera le problème comme étant plan ;
- chaque contact avec le fuselage sera assimilé à un contact sphère-plan modélisant un couple de chandelles ;
- les ferrures et chandelles seront supposées parfaitement rigides et la charge admissible par chandelle est de 17 246 daN suivant son axe de poussée (donnée concepteur).

Le résultat issu de la CAO en rouge, présenté figure 18 fournit l'évolution du moment quadratique de la section droite du modèle 3D suivant l'axe (G, \vec{z}) . On lui a superposé une modélisation à moment quadratique constant par tronçon en bleu qui sera utilisée par la suite dans le modèle 1D.

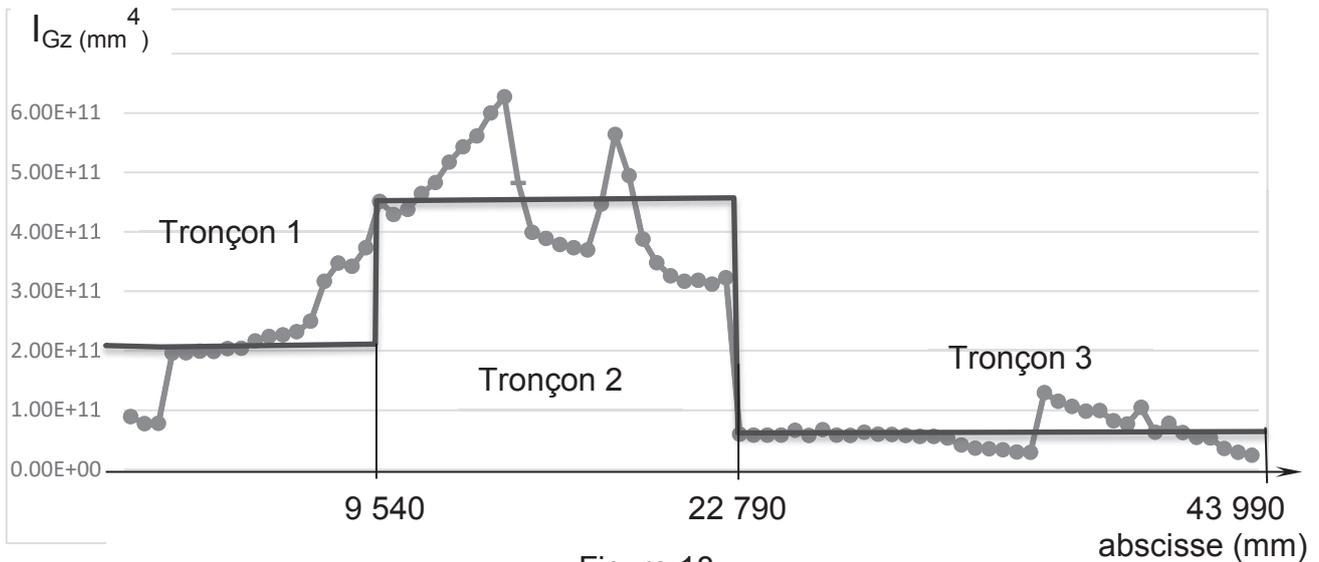


Figure 18
Évolution du moment quadratique
le long du fuselage

Les hypothèses de la mécanique des poutres seront supposées vérifiées.

Objectif intermédiaire : vérifier que les chandelles supportent la charge maximale que constitue le fuselage.

Question 27

Déterminer, pour chaque tronçon « k », le diamètre d_k du modèle poutre équivalent.
Donner alors le rapport d'élanement l_k/d_k .
Commenter la validité des hypothèses supposées de la mécanique des poutres.

Question 28

Déterminer la masse volumique ρ_{eq} équivalente du fuselage pour le modèle employé simplifié à partir de la masse totale $M_{TF} = 34\ 000$ kg du NFA et des dimensions l_k et d_k .

Quels que soient les résultats précédents, le modèle d'étude de mécanique des poutres pour le dimensionnement des premiers supports est résumé figure 19 ci-après :

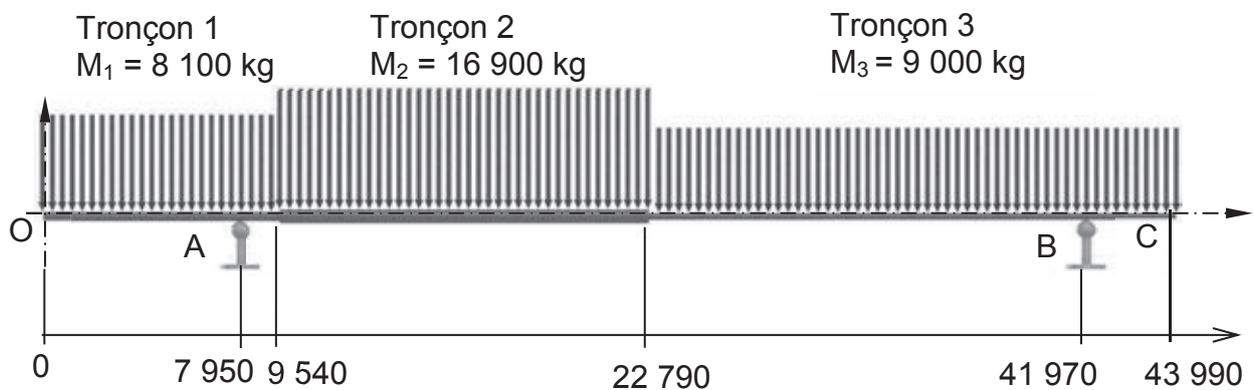


Figure 19
Modèle d'étude 2 appuis

Question 29

Déterminer alors la position x_G du centre de gravité du fuselage G_{fus} par rapport à la section origine (O).

En déduire la norme des actions mécaniques exercées par les supports sur le fuselage en A et B.

Vérifier la tenue des chandelles et conclure quant à la possibilité de mener à bien la phase 2 de positionnement.

Objectif intermédiaire : valider la phase 3 du séquençage d'installation des chandelles proposée par le bureau d'études.

Description

Les possibilités d'implantation des chandelles sont limitées (par la structure même du fuselage et par la prise en considération des usinages futurs) aux abscisses référencées : 2 120 mm, 3 710 mm, 18 550 mm, 19 610 mm, 21 730 mm, 27 560 mm et 37 100 mm.

La méthode choisie est celle d'implanter le couple de chandelles qui minimise la contrainte maximale sur le fuselage lors de son installation par son réglage à l'altitude « 0 ».

La phase 3 de l'installation prévoit, selon la division calcul d'Airbus, un appui à l'abscisse 19 610 mm.

On se propose d'étudier le modèle de la figure 20 pour valider cette solution où λ désigne l'abscisse du troisième appui.

Le centre de gravité de la poutre G_{fus} a pour abscisse, quels que soient les résultats trouvés précédemment, $x_{G_{fus}} = 18\,000$ mm.

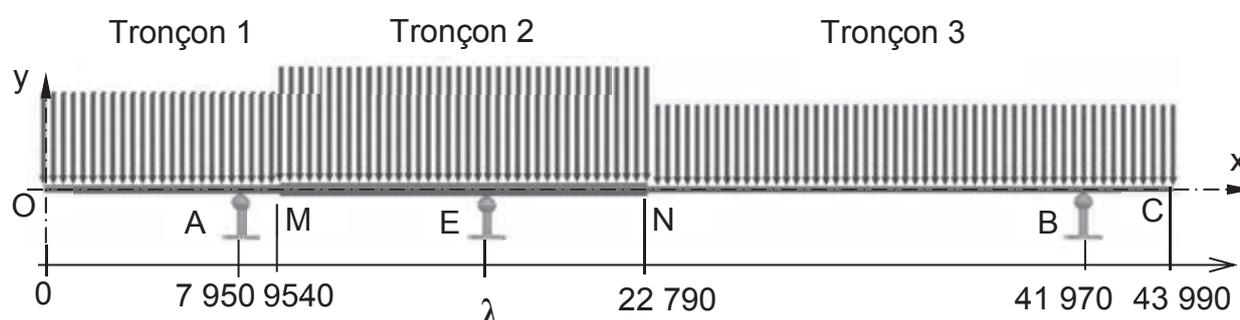


Figure 20
Modèle d'étude 3 appuis

Question 30

Montrer que λ doit appartenir à $]x_A, x_B[$ pour que le troisième appui ainsi positionné puisse assurer sa fonction d'appui unilatéral de soutien.

On note Y_i l'action mécanique exercée par l'appui en i sur le fuselage suivant $+\vec{y}$. Les hypothèses précédentes demeurent valides. La nature hyperstatique du modèle impose le choix d'une inconnue hyperstatique. On choisit Y_A .

Question 31

Montrer que l'implantation de l'appui en E implique une diminution de l'action exercée par le couple de chandelles implantées au niveau du point A, qui constitue l'appui critique en termes d'efforts à transmettre dans la phase 2.

Un tracé des diagrammes d'efforts tranchants T_y et de moments fléchissants M_{fz} , issu d'une simulation numérique pour le modèle précédent et tel que $\lambda > x_{Gfus}$, est fourni figure 21.

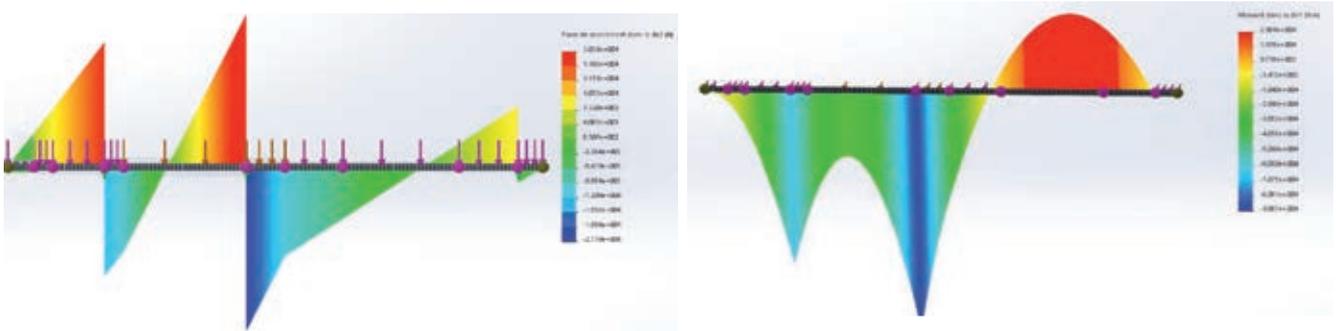


Figure 21

Diagramme des efforts tranchants T_y Diagramme des moments fléchissants M_{fz}

Question 32

Valider la conformité des paramètres de simulation (conditions limites en déplacement et actions mécaniques) en justifiant la forme des diagrammes à partir des lois caractéristiques de la mécanique des poutres et des données du problème posé.

Des simulations supplémentaires, obtenues à partir du modèle numérique fournissant les résultats de la figure 21, ont donc été réalisées en supprimant ou en modifiant la position suivant \bar{x} du troisième appui conformément aux possibilités données. Les résultats principaux de ces simulations sont résumés dans les tableaux (figure 22) ci-après.

Étude de déformation de type poutre						
Résultats sur les deux appuis (A et B)						
	Contrainte normale σ_{xx} maximale (MPa)	Flèche u_y maximale (mm)	Lieu géométrique de $u_{y\ MAX}$	Action sur l'appui le plus sollicité (kN)	Point d'appui le plus sollicité	Remarque et forme de la déformée
	9,59	21,6	entre A et B	235	A	Forme 1
Abscisse du point E (mm)	Résultats sur les trois appuis (A,B et E d'abscisse variable)					
18 550	1,34	1,33	entre N et B	182	E	Forme 2
19 610	1,50	1,18	entre N et B	168	E	
27 560	1,90	0,52	entre M et N	183	A	Forme 3
37 100	5,30	5,1	entre A et C	200	E	Forme 4 Inversion du signe des actions en C
Forme 1 :			Forme 2 :			
Forme 3 :			Forme 4 :			

Figure 22 :

Résultats des simulations en fonction de la position du 3^e appui

Question 33

Justifier le positionnement du troisième appui au point d'abscisse 18 550 mm lors de la phase 3 de la séquence de mise en position du NFA.

Objectif 3 : critiquer le modèle de simulation et l'améliorer

Les charges mises en jeu au niveau des appuis lors de la phase d'installation sont telles que le bureau d'étude se doit de valider l'hypothèse de rigidité infinie des appuis pour la simulation.

Éventuellement, il pourra compléter le modèle à simuler en fournissant au logiciel la matrice de raideur des appuis considérés comme élastiques.

Dans le cadre de l'étude, on se limitera à la détermination de la matrice de raideur des chandelles (JIGS). Les berceaux ont été en effet supposés parfaitement rigides après l'analyse de leur structure mécanique, de la nature de la liaison avec le fuselage et des charges supportées.

Le bureau d'études de la division Beluga XL d'Airbus, a choisi de modéliser (figure 23) l'appui sur les chandelles de la façon suivante :

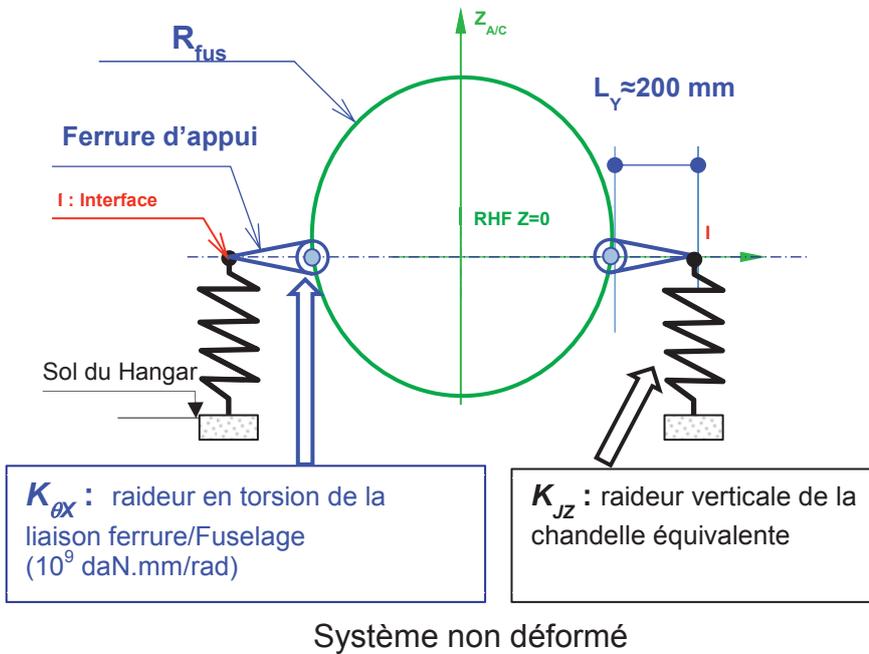
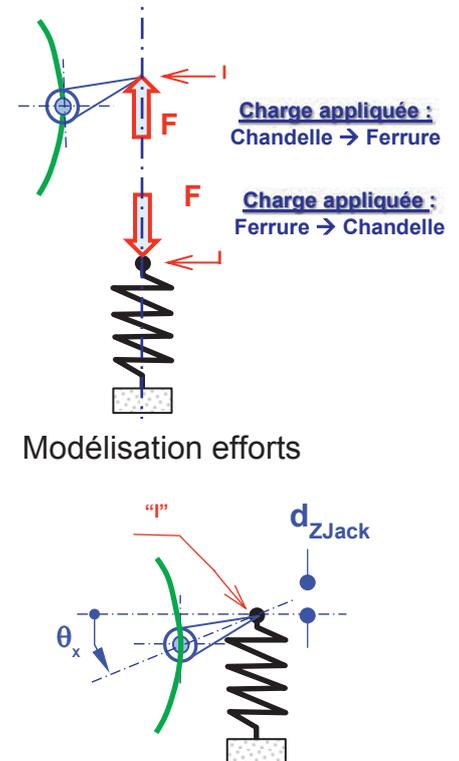


Figure 23
Modèle appui élastique



d_{ZJack} : Déplacement vertical du NFA en appui sur les chandelles

Modélisation déplacement

Chaque chandelle est quant à elle constituée d'un support sur lequel est monté un actionneur permettant le déplacement de l'appui.

Les données concernant ces chandelles extraites des documents Airbus sont fournies ci-après (figure 24).

	Fzmax (daN)	# of actuator	actuator type	Dnoyau (mm)	Stroke (mm)	Stiffness of the actuator (daN/mm)	z (mm)	L (mm)	Lsupport (mm)	Fcrit (daN)	Futilisation (daN)	Ftotal (daN)	RF	Ksupport (daN/mm)
Fr11	6 500	1	VME100	37	300	75 265	-2500	3 410	3 600	11 950	2 988	8 963	1,4	14 158
Fr21	7 500	1	VME100	37	300	75 265	-905	5 005	5 200	12 453	3 113	9 340	1,2	12 697
Fr21 Cr	16 000	2	VME100	37	350	64 513								
Chandelle Fr33 36 39.1 53.4 53.8 59 76	10 000	1	VME100	37	300	75 265	-990	4 920	5 200	17 246	4 312	12 935	1,3	14 175

Figure 24
Données chandelles

Question 34

Donner en fonction des raideurs K_1 (stiffness of the actuator) de l'actionneur et $K_{support}$, la raideur verticale équivalente de la chandelle K_{JZ} en daN/mm. Faire l'application numérique à partir des données du fabricant.

On supposera que l'actionneur est encasté rigidement sur le support, lui-même en liaison encastrement avec le sol du hangar supposé infiniment rigide.

Question 35

Déterminer alors l'expression de la raideur équivalente K_{eqJZ} en daN/mm de l'ensemble {Ferrures, Chandelles} en fonction de K_{JZ} , $K_{\theta X}$, L_Y .

On pourra supposer que l'angle de rotation θ_x des ferrures par rapport au référentiel de mise en position reste petit devant $\pi/2$.

La modélisation poutre de la solution d'installation, où tous les appuis sont supposés rigides, a mis en évidence que les efforts sur les différentes chandelles ont des valeurs variant entre 250 et 7 000 daN.

Question 36

Déterminer alors la variation d'altitude $\delta_{élast}$ en mm des points de la ligne moyenne résultant de l'élasticité des liaisons.

Question 37

Conclure quant à la nécessité de prendre en compte l'élasticité des liaisons vis-à-vis de l'exigence de déformation limitée du fuselage avant découpage.

La séquence optimale, et par conséquent, la solution d'installation des chandelles et des berceaux, a été en réalité obtenue par la division calcul d'Airbus à partir du modèle poutre plus complexe défini sur la figure 25 en augmentant le nombre d'appuis et en incluant l'élasticité des appuis.

Le résultat ainsi obtenu a dû, pour pouvoir être validé, être confronté au modèle 3D du fuselage mis en position suivant un séquençage analogue.

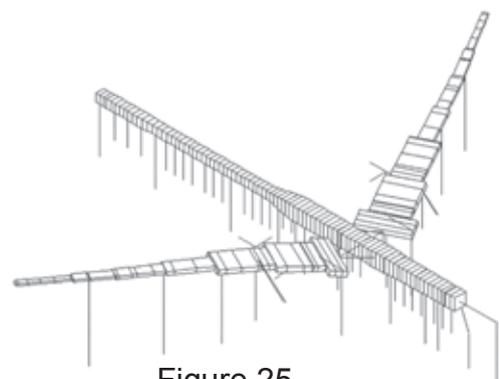


Figure 25

Les résultats des deux simulations (modèle poutre et modèle Éléments Finis Volumique (source Airbus)) ont fait alors l'objet d'un comparatif donné figure 26, dans lequel on trouve en abscisse le référencement des appuis de réglage et en ordonnées l'action mécanique transmise par les appuis au fuselage en daN.

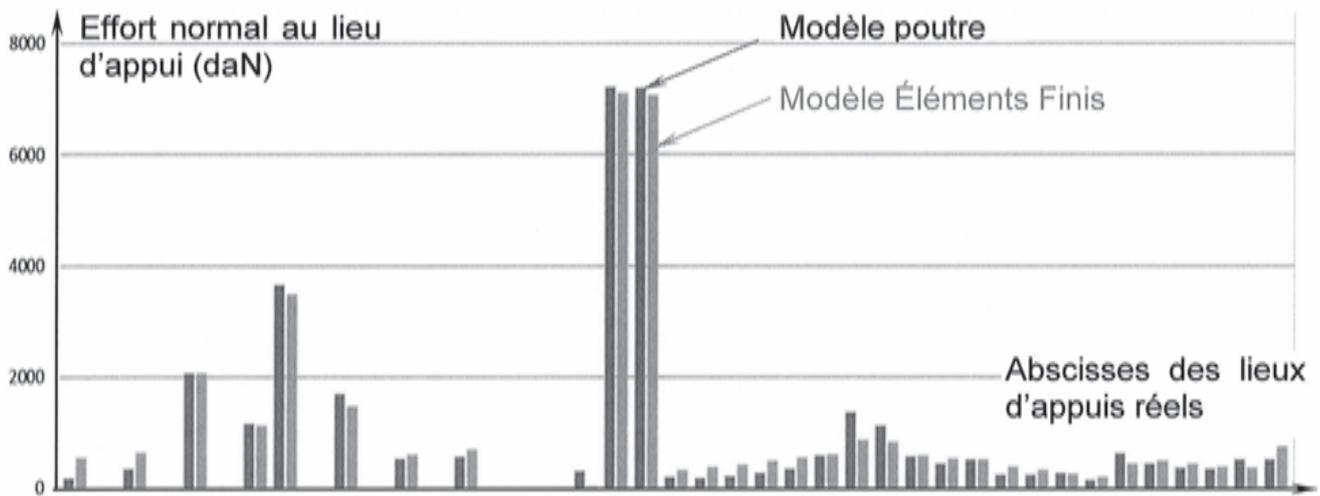


Figure 26

Question 38

Donner une estimation en pourcents (%) de l'écart relatif maximal entre les deux modèles. Conclure quant à la pertinence de la solution utilisée par la division calcul pour répondre aux exigences de délais et de définition de solution.

5. Étude 4 - Découpe du fuselage

Objectif : vérifier la faisabilité de la découpe du fuselage par l'outil coupant.

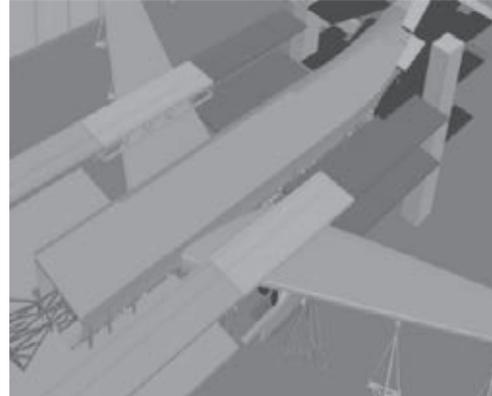
La conception de la solution de fabrication du Beluga XL implique le découpage du fuselage du NFA supposé être en alliage d'aluminium à faible teneur en silicium.

Le découpage se fera par parties suivant deux types de profils :

- rectiligne, le long du fuselage sur une longueur à découper de 23m (fige 27) ;
- courbe, sur la partie arrière (non étudié ici).



NFA positionné et non découpé



NFA découpé

Figure 27

La solution de découpe s'est orientée vers un enlèvement de matière en utilisant une scie de type circulaire autonome énergétiquement, qui sera guidée par un rail fixé sur le fuselage du NFA et déplacée manuellement par un opérateur qualifié se déplaçant debout sur un échafaudage (figure 28).

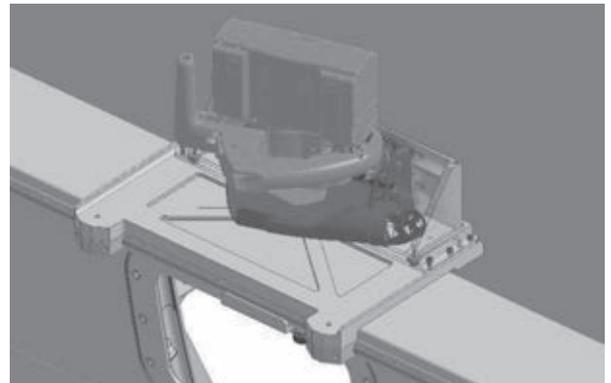


Figure 28

Scie sur le rail de guidage

Question 39

Proposer d'autres solutions de découpe et énoncer des critères ayant motivé le choix établi de génération de copeaux.

Les outillages envisagés pour l'opération de découpe linéaire sont définis ci-après :

- scie circulaire à lame plongeante FESTOOL (figure 29) ;



Figure 29
Scie TSC 55

Caractéristiques techniques	TSC 55
Tension de la batterie	1x18 V – 2x 18 V (36 V)
Régime à vide (2x18 V)	2650 – 5200 min ⁻¹
Régime à vide (1x18 V)	2650 – 3800 min ⁻¹
Ø de lame	160 mm
Profondeur de coupe	0 – 55 mm
Profondeur de coupe à 45°	0 – 43 mm
Plage angulaire	-1° à 47°
Ø du raccord d'aspiration	27 / 36 mm
Capacité de la batterie Li-Ion	5,2 Ah
Poids (avec batteries 1x18 V/2x18 V)	4,6 kg / 5,3 kg

- puissance utile $P_u=1\ 200\text{W}$;
 - variateur de vitesse intégré réglable de 1 à 6 (échelle supposée linéaire) au quart de division près.
- Outil : lame Scie Festool TF52 (figure 30)
Données :
- $\varnothing D = 160\text{ mm}$;
 - $N_{\max} = 9\ 500\text{ tr/min}$;
 - $a_p = 2,2\text{ mm}$ (largeur de lame) ;
 - $Z = 52\text{ dents}$;
 - arête de coupe rapportée (cartouche brasée), en carbure de tungstène micrograin (forme de dents : TF (figure 30)).

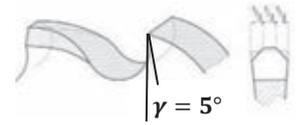


Figure 30
Géométrie denture

Les conditions de coupe préconisées par le fournisseur Festool sont :

- matériau usiné \rightarrow Alliage d'aluminium (%Si < 5 %) ;
- puissance spécifique de coupe supposée $\rightarrow W_C = 14\text{ W}/(\text{cm}^3/\text{min})$;
- réglage variateur recommandée par Festool \rightarrow 4 à 6 suivant matériau ;
- vitesse d'avance usuelle recommandée (sciage Alliage aluminium) \rightarrow
 $V_f = 1\ 200\text{ à }2\ 500\text{ mm/min}$;
- gamme de vitesse de coupe recommandée (sciage alliage aluminium) \rightarrow
 $V_C = 1\ 000\text{ à }2\ 000\text{ m/min}$.

Question 40

Déterminer, pour un réglage du variateur V_{Reg} préconisé par le fabricant de la scie circulaire, l'expression de la vitesse de coupe V_C . Commenter cette préconisation pour la plage recommandée. On supposera l'outillage équipé de deux batteries de 18V.

On choisit le réglage tel que la vitesse de coupe soit d'environ 2 100 m/min, c'est-à-dire une vitesse de rotation de 4 180 tr/min.

Question 41

Déterminer, pour la plage de vitesse d'avance recommandée V_f de l'outil par rapport à la pièce, la plage de la vitesse d'avance par dent f_z (mm/tour/dent). Déterminer alors la vitesse d'avance V_{f1} que devra respecter l'opérateur pour mettre en place une avance par dent, f_z égale à 0,01 mm/tour/dent.

Question 42

En déduire alors la puissance nécessaire à la coupe P_C pour une épaisseur de tôle à découper de e_T (8 mm) (figure 31).

On pourra, pour cela, déterminer le débit copeau Q_C et utiliser la puissance spécifique de coupe W_C .

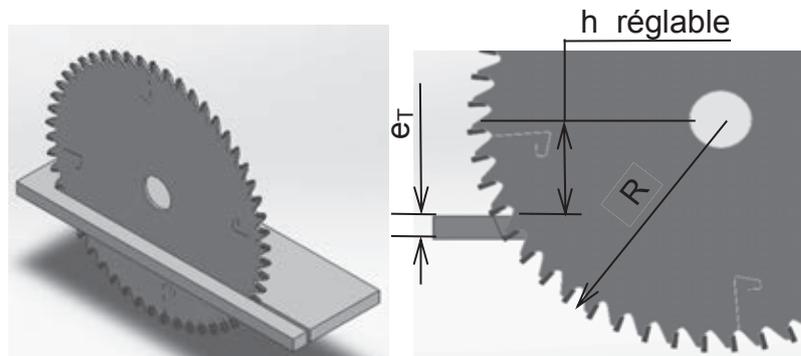


Figure 31
Géométrie de la coupe

Vérifier alors la capacité de la scie circulaire à fournir la puissance nécessaire.

On suppose à présent que la puissance nécessaire à la coupe représente en première approximation le produit $F_c \times V_c$.

Question 43

Justifier l'hypothèse concernant l'approximation de l'expression de la puissance en fonction des grandeurs cinématiques présentes.

Déterminer alors la valeur de l'effort exercé par la dent de l'outil sur la pièce nécessaire à la formation du copeau F_c .

Quel que soit le résultat trouvé à la question 43, on supposera que F_c vaut 15 N.

Question 44

Vérifier alors la conformité de la solution envisagée par rapport aux règles d'ergonomie imposées par le droit du travail résumé en figure 32 ci-après ou proposer une solution dans le cas contraire.

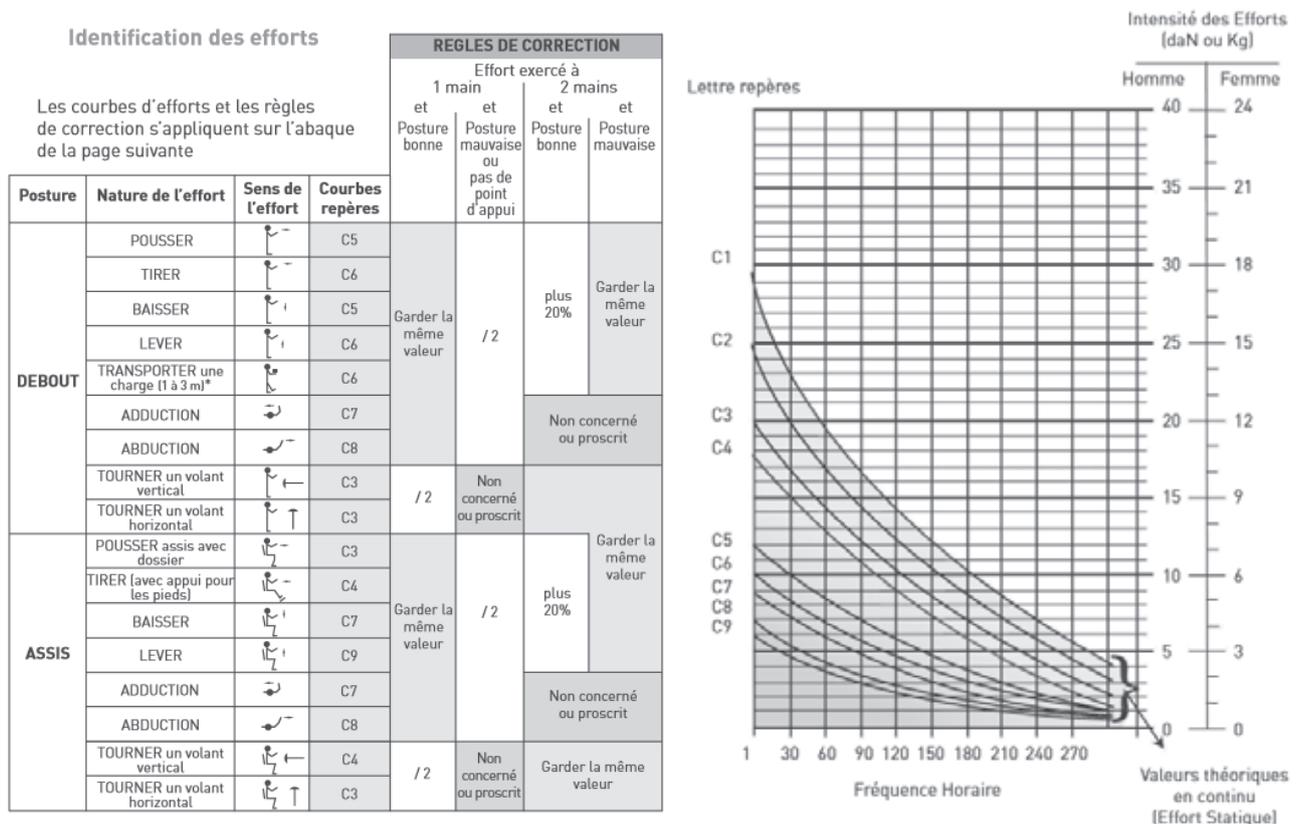


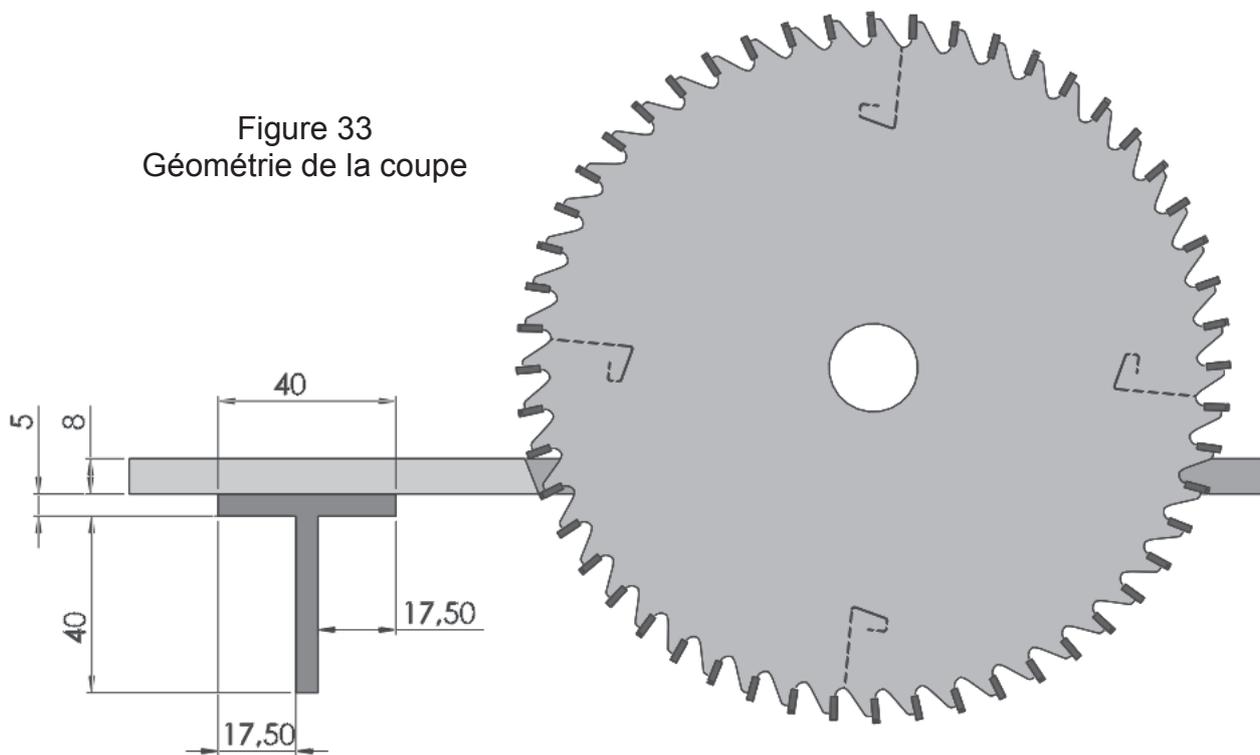
Figure 32

Effort limite exigible par un opérateur en fonction des conditions de travail

En réalité, la découpe n'a pas lieu que sur une tôle d'épaisseur constante. En effet, l'outil doit aussi découper les cadres de cerclage permettant de rigidifier la structure et délimitant les sections. Ceux-ci seront assimilés à des poutres en T (épaisseur e_L) dans un alliage d'aluminium de mêmes caractéristiques pour la coupe que la tôle.

Le modèle géométrique à découper est alors défini figure 33.

Figure 33
Géométrie de la coupe



Question 45

En supposant que la plongée maximale de la lame est de 55 mm, vérifier que l'outillage est capable, géométriquement, de découper l'ensemble cadre/tôle.

Question 46

En prenant une modélisation similaire à l'étude de découpe de la tôle, déterminer alors la puissance de coupe nécessaire $P_{c\text{ cadre}}$ maximale et l'effort de coupe $F_{c\text{ cadre}}$ maximal exercé par l'outil sur la pièce lors de la découpe de ces « points durs ».

Question 47

Conclure quant à l'adéquation du processus d'enlèvement de matière avec l'exigence du bureau d'études quant à l'hybridation de l'A330 en Beluga XL et sur la nécessité d'un entraînement des opérateurs pour assurer le découpage.

6. Synthèse

Question 48

À partir des éléments mis en avant dans le sujet et par votre analyse, rédiger en quelques lignes une synthèse mettant en évidence la stratégie de la division Beluga XL dans la recherche de solutions pour pouvoir répondre dans les délais aux exigences de conception et production du futur gros-porteur du groupe Airbus Industrie.