

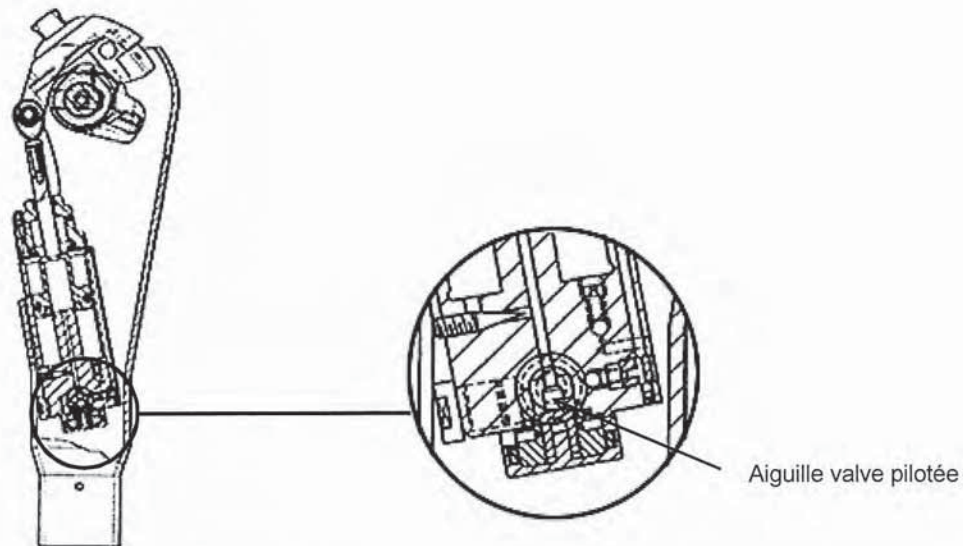


Figure 29. Localisation de la valve pilotée

Le principe est de créer une perte de charge variable et contrôlée par la valve pilotée permettant de freiner plus ou moins le déplacement du corps du vérin 12.

Afin de pouvoir positionner l'aiguille de la valve pilotée, la chaîne fonctionnelle constituée d'un moteur pas à pas, d'un réducteur, d'un dispositif vis-écrou et de la valve pilotée (figure 30) est implantée dans la prothèse active 1P360.

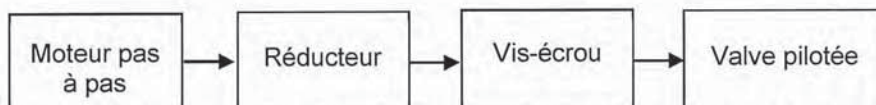


Figure 30. Structure globale de la chaîne fonctionnelle associée au contrôle de la flexion du genou prothétique

La synthèse d'une loi de commande à implanter dans le microprocesseur pour le contrôle de la position de l'aiguille de la valve pilotée nécessite l'élaboration d'un modèle de simulation multiphysique du comportement de la jambe prothétique lors de la phase pendulaire.

3.2.3.1. Élaboration d'un modèle de simulation multiphysique à l'aide d'une approche acausale

Cette partie a pour objectif d'élaborer un modèle de simulation multiphysique permettant, dans un premier temps, de mettre en évidence les enjeux liés à la mise en place d'une prothèse de genou passive, puis, dans un second temps, de simuler un modèle d'une prothèse active avec contrôle de l'angle de flexion par la valve pilotée.

Question 21 : proposer un graphe de liaisons de la jambe prothétique en considérant seulement les solides indéformables définis sur le document réponse DR3. Représenter alors la structure globale du modèle de simulation modélisant la jambe prothétique à l'aide des blocs de liaison proposés dans le document réponse DR3.

On s'intéresse ensuite au module pneumatique permettant de contrôler l'angle de flexion du genou pendant la phase pendulaire.

Question 22 : représenter, sur le document réponse DR4, la circulation du fluide lors de la phase pendulaire. Préciser les intervalles de valeurs de l'angle de flexion et le signe de la vitesse angulaire de la prothèse pour chacune des 4 figures.

Question 23 : déterminer la phase du cycle de marche durant laquelle la flexion de la prothèse est contrôlée par la valve pilotée. Justifier ce choix vis-à-vis des résultats de l'analyse de la figure 18. Quel est l'intérêt du réglage du débit par la mise en place des vis pointeau 40 et 41 (figure 22) ?

Afin de simplifier le modèle de simulation, les débits de fuite créés par les vis pointeau sont négligés. L'étude du module pneumatique peut donc se ramener à l'étude d'un vérin double effet.

Question 24 : après avoir analysé le parcours du fluide, construire le circuit pneumatique en phase pendulaire à l'aide des blocs physiques proposés sur le document réponse DR5.

3.2.3.2. Modélisation du comportement thermodynamique du vérin double effet

Afin de simuler le modèle multiphysique de la prothèse de genou, il est enfin nécessaire d'élaborer un modèle thermodynamique des chambres du vérin.

Le fluide utilisé dans le module pneumatique est de l'air. Afin d'obtenir un modèle complet décrivant la dynamique du corps du vérin, il est nécessaire de décrire l'évolution des pressions dans chacune des deux chambres à volume variable avec phénomène de transvasement.

La figure 31 décrit partiellement le circuit pneumatique où p_i , V_i et S_i représentent respectivement la pression, le volume et la surface associée à la chambre i .

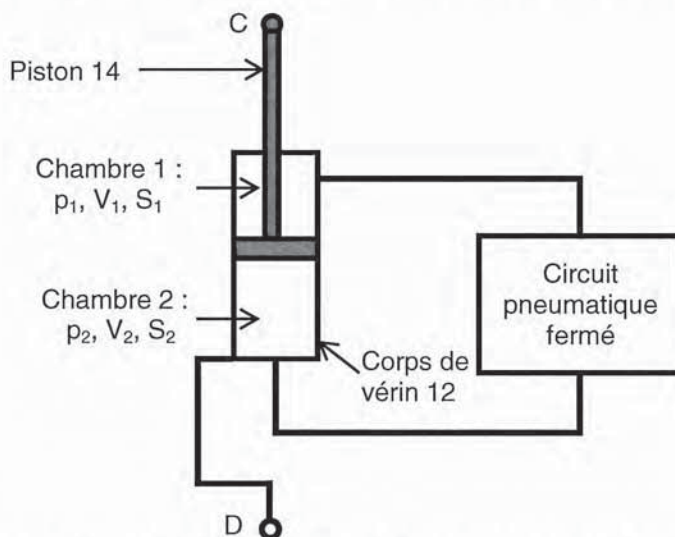


Figure 31. Description partielle sous forme d'un schéma du module pneumatique

La masse d'air contenue dans chacune des chambres du vérin varie au cours du temps ce qui permet de considérer le vérin comme un système thermodynamiquement ouvert qui peut être représenté par le schéma de la figure 32.

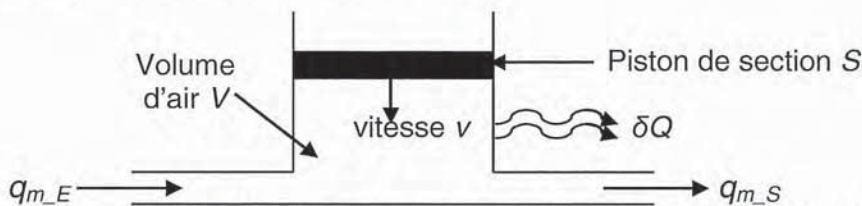


Figure 32. Modèle d'une chambre à volume variable du vérin pneumatique

Les hypothèses retenues pour cette étude sont :

- les grandeurs thermodynamiques, la pression p , la température T , la masse volumique ρ sont considérées uniformes, à chaque instant, à l'intérieur de la chambre considérée ;
- la transformation est isentropique de coefficient γ ;
- l'air est considéré comme un gaz parfait répondant aux lois suivantes
 - loi d'état $\frac{p}{\rho} = r.T$, où r est la constante universelle des gaz parfaits ;
 - $h = c_p T = c_v T + \frac{P}{\rho}$, où h est l'enthalpie, c_p et c_v les chaleurs massiques respectivement à pression et volume constant ;
 - loi de Mayer $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$ et $c_v = \frac{r}{\gamma - 1}$;
- l'écoulement s'effectue sans échange de travail, ni de chaleur avec l'extérieur (adiabatique) ;
- l'échange de travail avec le piston est réversible ;
- l'énergie cinétique du fluide dans la chambre est négligeable ;
- la différence de hauteur entre les conduites d'alimentation et refoulement est négligée.

Question 25 : les débits massiques en entrée et en sortie des chambres étant respectivement définis par q_{m_E} et q_{m_S} , écrire l'équation de conservation de la masse d'air.

Question 26 : à partir de l'équation de conservation de la masse et de l'équation d'état des gaz parfaits, montrer que l'évolution de la pression est régie par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{r.T}{V} (q_{m_E} - q_{m_S}) + \frac{p}{T} \frac{dT}{dt} - \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} .$$

L'analyse de l'équation obtenue permet de mettre en évidence que l'évolution de la pression dans la chambre est liée à l'évolution de la température.

Question 27 : à l'aide du premier principe de la thermodynamique pour les systèmes ouverts rappelé ci-dessous et en négligeant les termes de second ordre, écrire la variation de l'énergie totale du fluide contenu dans l'espace défini figure 32 en fonction des travaux des forces extérieures.

Premier principe de la thermodynamique pour un système :

$$dU + dE_c + dE_p = \delta W + \delta Q$$

- où
- dU représente la variation d'énergie interne ;
 - dE_c la variation d'énergie cinétique ;
 - dE_p la variation d'énergie potentielle ;
 - δW le travail des efforts extérieurs ;
 - δQ la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur.

Question 28 : après avoir dérivé l'équation obtenue à la question 27, déterminer l'équation différentielle décrivant l'évolution de la température T dans la chambre du vérin en fonction de T , V , p , r , q_{m_E} , q_{m_S} .

Question 29 : simplifier l'équation obtenue à partir des hypothèses suivantes

- la transformation est une transformation isentropique ;
- l'échange de travail est réversible ;
- l'air est considéré comme un gaz parfait ;
- les hypothèses sur les écoulements permettent d'écrire les relations

- à l'entrée, $h + \frac{v^2}{2} = c_v \cdot T_e + \frac{v_e^2}{2} = c_p \cdot T$;
- à la sortie, $h + \frac{v^2}{2} = c_v \cdot T_s + \frac{v_s^2}{2} = c_p \cdot T$.

Question 30 : à l'aide des deux équations établies aux questions 26 et 29, donner l'équation différentielle décrivant l'évolution de la pression en fonction de γ , p , V , T , r , q_{m_E} , q_{m_S} ainsi que v la vitesse de déplacement du corps de vérin 12 et S la section sur laquelle s'applique la pression p .

Nous disposons maintenant d'un modèle de simulation de la prothèse passive du genou durant la phase pendulaire.

La simulation de ce modèle, dont des éléments ont été élaborés dans ce sujet, permet de tracer l'évolution de l'angle de flexion durant la phase pendulaire de la jambe prothétique. La figure 33 présente des résultats de simulation du modèle précédemment élaboré pour 3 vitesses de marche différentes. L'origine est le début de la phase pendulaire et l'axe des abscisses est gradué en % du cycle de marche.

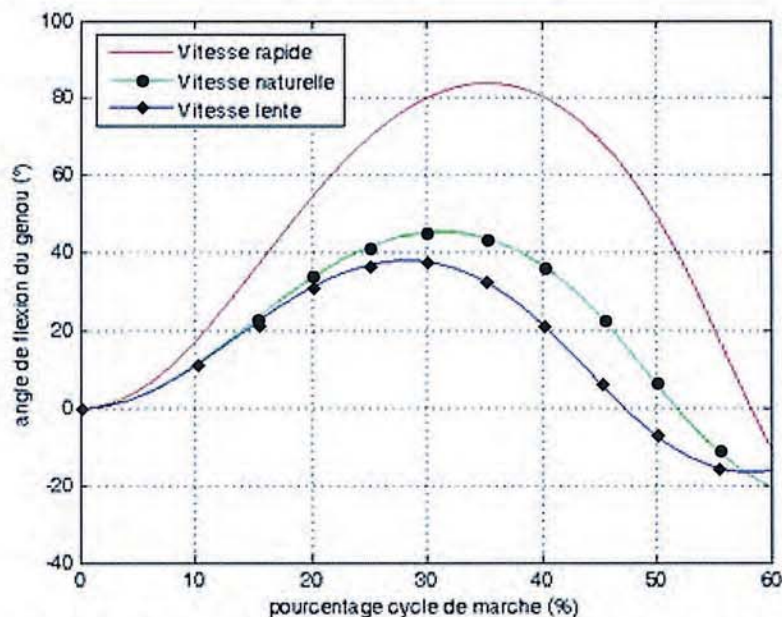


Figure 33. Comportement du genou prothétique sans contrôle de la flexion pour 3 vitesses de marche

Question 31 : à partir des résultats de simulation fournis sur la figure 33, commenter les évolutions de l'angle de flexion du genou pour les 3 vitesses de marche.

L'étude précédente a permis de valider le comportement du modèle d'une prothèse passive, c'est-à-dire, sans contrôle de l'angle de flexion. Les performances simulées sont conformes à celles présentées sur la figure 18.

Afin d'améliorer le comportement de cette prothèse lors de la phase de flexion du genou prothétique, la prothèse active 1P360 intègre un contrôle de la section de passage du fluide basée sur la chaîne fonctionnelle de la figure 30.

Les résultats de simulation présentés figure 34 sont obtenus pour une vitesse de marche constante, pour 3 sections de passage différentes et constantes durant la phase pendulaire. L'origine est le début de la phase pendulaire et l'axe des abscisses est gradué en % du cycle de marche.

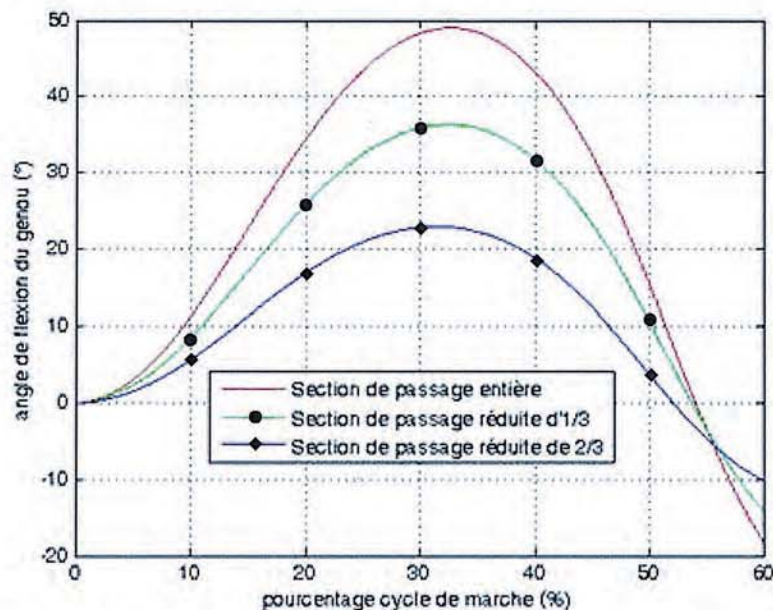


Figure 34. Comportement du genou prothétique avec contrôle de la flexion par la valve pilotée pour 3 sections de passage du fluide pneumatique à vitesse de marche constante

Question 32 : à partir des résultats de simulation fournis sur la figure 34, montrer que le réglage de la section de passage de l'air via la valve pilotée permet un contrôle de la flexion du genou lors de la phase de flexion pour les 3 sections de passage de fluide. Quelle serait donc la suite à donner à cette étude afin de contrôler l'angle de flexion du genou pendant la phase pendulaire ?

4. Dimensionnement du vérin pneumatique de la prothèse active 1P360

Objectifs : déterminer le couple matériau – procédé pour le vérin pneumatique vis-à-vis de contraintes imposées et valider le choix de ce matériau.

4.1. Choix d'un couple matériau – procédé

4.1.1. Présentation des contraintes de choix

Cette partie doit permettre de procéder au choix d'un couple matériau – procédé afin de satisfaire des contraintes mécaniques et environnementales. Pour cela, une démarche en trois étapes est proposée :

1. déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques au matériau du vérin ;
2. choisir un couple matériau – procédé adapté au vérin ;
3. valider le choix du matériau.

Afin de procéder au choix du couple matériau – procédé, différents objectifs fonctionnels doivent être pris en compte :

Objectif 1 – le matériau doit rester dans le domaine élastique, avec un coefficient de sécurité s égal à 2 ;

Objectif 2 – le choix du matériau doit permettre de minimiser le prix du vérin ;

Objectif 3 – le matériau choisi doit être en adéquation avec le procédé d'obtention adapté à la forme de la pièce et à la production désirée (1 200 pièces / an) ;

Objectif 4 – le choix du matériau doit minimiser l'impact environnemental dans une démarche d'écoconception.

Afin d'optimiser le matériau du vérin, les critères de choix retenus sont deux indices de performance $Prix1$ et $Prix2$ permettant de procéder au choix du matériau par l'utilisation de cartes à bulles d'Ashby.

Le tableau de la figure 35 regroupe dans le cas du vérin les éléments de choix à prendre en compte.

Pièce	Vérin
Objectif	Minimiser le prix du vérin
Contraintes	Résister en compression avec un coefficient de sécurité s de 2 Ne pas flamber Minimiser l'impact environnemental Choisir une famille de matériaux du type métaux et alliages ferreux
Variables fixées	Effort F , longueur L et diamètre intérieur D_{int}
Variables libres	Diamètre D_{ext} Caractéristiques intrinsèques du matériau

Figure 35. Eléments à prendre en compte lors du choix du matériau du vérin

On considère une situation très simplifiée, dans laquelle le vérin peut être modélisée par une poutre AB de section constante (où D_{ext} et D_{int} sont respectivement les diamètres extérieur et intérieur de la section du modèle) et soumise à un effort F (figure 36).

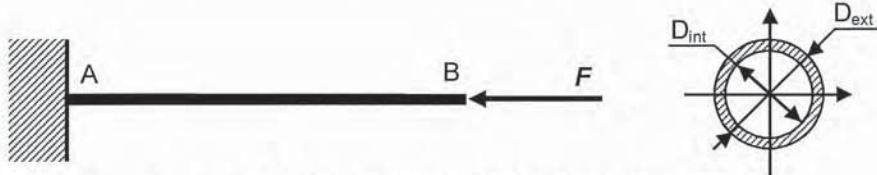


Figure 36. Modèle simplifié du vérin pneumatique

4.1.2. Étude des objectifs 1 et 2

Question 33 : déterminer, dans le cas du modèle simplifié de la figure 36, la relation traduisant la résistance à la compression du vérin entre la contrainte de compression, les diamètres et l'effort F .

Question 34 : exprimer le prix du vérin en fonction des paramètres géométriques, de la résistance pratique à la compression R_{pc} , du prix massique noté P_m , du coefficient de sécurité s et de la masse volumique ρ . En déduire un indice de performance noté $Prix1=f(R_{pc}, P_m, \rho)$ répondant aux objectifs 1 et 2.

On s'intéresse maintenant au risque de flambement de la tige du vérin.

Hypothèses :

- la ligne moyenne de la poutre est parfaitement rectiligne sans sollicitation ;
- la poutre est de section constante S ;
- le problème est supposé plan ;
- les forces de volumes sont négligées ;

- et le comportement du matériau est considéré élastique, linéaire, de caractéristiques mécaniques constantes.

Notations :

- module d'Young E ;
- limite élastique σ_e ;
- diamètres du vérin D_{ext} et D_{int} ;
- longueur de sortie de la tige L_s ;
- longueur de flambement $L_f = 2 \cdot L_s$;
- charge axiale F .

La figure 37 représente le modèle simplifié du vérin à partir d'une poutre rectiligne homogène, de longueur L_f , bi-articulée en A et en B (sans déplacement latéral en B), de section S à deux plans de symétrie, de module d'Young E , d'inertie constante et soumise à un effort de compression F .

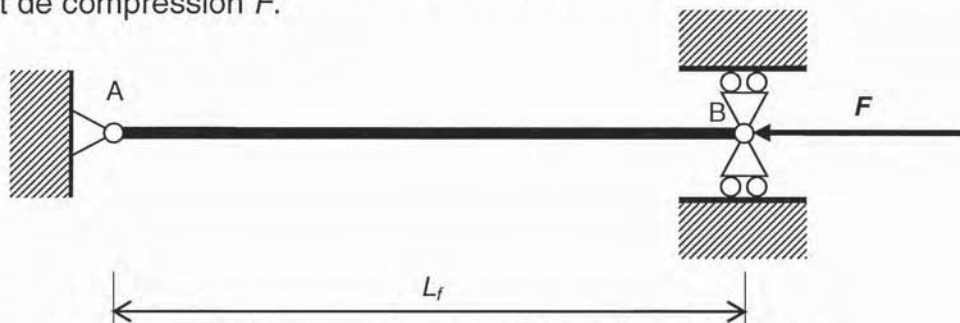


Figure 37. Modèle simplifié d'étude du flambement du vérin

Question 35 : déterminer littéralement la charge critique de compression F_{cc} . En déduire un second indice de performance $Prix2 = f(E, \rho, P_m)$ répondant aux objectifs 1 et 2, pour lequel P_m représente le prix massique.

Question 36 : après avoir tracé sur les cartes à bulles des documents DR6 et DR7 les 2 indices de performance $Prix1$ et $Prix2$, proposer une exploitation de ces indices. En déduire trois champs de matériaux possibles répondant aux objectifs 1 et 2.

4.1.3. Étude de l'objectif 3

On s'intéresse désormais au procédé de fabrication de la tige du vérin. L'objectif est de proposer un procédé d'obtention adapté au matériau et aux caractéristiques dimensionnelles.

Question 37 : compte-tenu de l'objectif 3, proposer un moyen d'obtention de la tige du vérin. Justifier votre choix en précisant les critères retenus.

Suite à cette étude, plusieurs matériaux répondant aux objectifs 1, 2 et 3 sont utilisables. Afin de limiter la suite de l'étude, seuls deux matériaux seront étudiés.

4.1.4. Étude de l'objectif 4

On s'intéresse enfin à l'objectif 4 pour les deux matériaux suivants : 34CrMo4 et X3CrNiMoN27-5-2. Les critères permettant d'affiner le choix du matériau répondant à l'objectif 4 sont :

- l'acidification de l'air ;
- l'empreinte carbone ;
- l'énergie totale consommée ;

- et l'eutrophisation de l'eau.

Ces différents critères sont définis par :

- l'acidification de l'air - ce critère traduit notamment la présence de dioxyde de soufre, d'oxydes nitreux dans l'air. Cette présence dans l'air, lors des pluies, est à l'origine de l'acidification de l'eau de pluie qui contribue à l'acidification des lacs et des sols. Ces acides peuvent rendre la terre et l'eau toxiques pour la faune et la flore, mais aussi peuvent dissoudre les matériaux d'origine humaine comme le béton. Ce critère est exprimé en équivalent kg de dioxyde de soufre (SO₂) ;
- l'empreinte carbone - ce critère traduit la présence notamment de dioxyde de carbone (et autres gaz) résultant de la combustion des combustibles fossiles qui s'accumulent dans l'atmosphère, contribuant au réchauffement de la planète. Le réchauffement planétaire est responsable, entre autres, de la fonte des glaciers, de l'extinction de certaines espèces animales et de dérèglements climatiques ;
- l'énergie totale consommée - ce critère, exprimé en mégajoules (MJ), traduit l'énergie consommée tout au long du cycle de vie du produit. Ce critère tient également compte de l'énergie nécessaire en amont pour obtenir et transformer ces énergies ;
- l'eutrophisation de l'eau - ce critère traduit la présence d'éléments nutritifs dans l'eau tel que l'azote, le phosphore et les fertilisants agricoles. Cette présence stimule l'éclosion d'algues, ce qui épuise l'oxygène dissous dans l'eau et se traduit par la mort de la faune et de la flore. Ce critère est exprimé en équivalent kg de phosphate (PO₄).

Ces 4 critères sont déterminés sur quatre des cinq phases de vie de la pièce étudiée (création du matériau, fabrication de la pièce, transport et fin de vie).

Question 38 : analyser le document technique DT1. Indiquer quel matériau répond de façon optimale à l'ensemble des 4 objectifs fonctionnels retenus.

L'analyse menée a permis de proposer un matériau répondant aux 4 objectifs définis en début de partie, pour le choix du matériau du vérin. Ce choix répondant à des objectifs multicritères est donc basé sur des compromis en termes de performances globales. Cette étude pourrait donc être élargie, à l'ensemble de la prothèse 1P360 qui aurait pour conséquence de rajouter des contraintes, et à tous les champs de matériaux. Cette étude plus globale permettrait une analyse plus performante, et pourrait remettre en cause le choix de matériau effectué.

4.2. Validation du matériau retenu sur la prothèse 1P360 sur le critère de flambement

Le choix de la société Prothéor pour le matériau de la tige du vérin s'est porté vers un acier C45 ayant pour caractéristiques :

- module d'Young $E = 205\,000\text{ MPa}$;
- limite élastique $\sigma_e = 430\text{ MPa}$.

Pour un effort maximal de $F = 600\text{ N}$, les caractéristiques dimensionnelles retenues sont :

- diamètre de la tige $D_{ext} = 8\text{ mm}$;
- diamètre de la tige $D_{int} = 6\text{ mm}$;
- longueur de sortie de la tige $L_s = 140\text{ mm}$.

Le rayon de giration i et l'élancement λ sont respectivement définis par les relations

$$i = \sqrt{\frac{I}{S}} \text{ et } \lambda = \frac{L_f}{i}$$

où I est le moment quadratique et S la section de la tige du vérin.

Question 39 : calculer la charge critique de compression F_{cc} pour la première demi-onde. Conclure quant à la charge appliquée sur le vérin.

Question 40 : à partir de quelle valeur de L_s , le risque de plastification en compression simple peut-il intervenir avant le risque de flambement ? Donner l'allure de la courbe représentant la variation de F_{cc} en fonction de L .

Question 41 : déterminer puis calculer la contrainte critique σ_{cc} en prenant en compte le rayon de giration i et l'élancement λ . Conclure quant à la contrainte appliquée sur le vérin. À partir de quelle valeur de λ , le risque de plastification en compression simple peut-il intervenir avant le risque de flambement ?

Question 42 : donner l'allure de la courbe représentant la variation de σ_{cc} en fonction de λ .

Question 43 : conclure quant à la validité du matériau.

L'étude menée dans cette partie a permis de valider le choix du matériau du vérin fait par la société Prothéor en tenant compte des contraintes économiques et environnementales. Cependant, cette validation, basée sur les modèles proposés aux figures 36 et 37, est par conséquent assujettie aux hypothèses adoptées. Par conséquent, l'utilisation d'un logiciel d'analyse mécanique et de calculs par éléments finis permettra d'optimiser le choix du matériau vis-à-vis de la forme réelle du vérin.

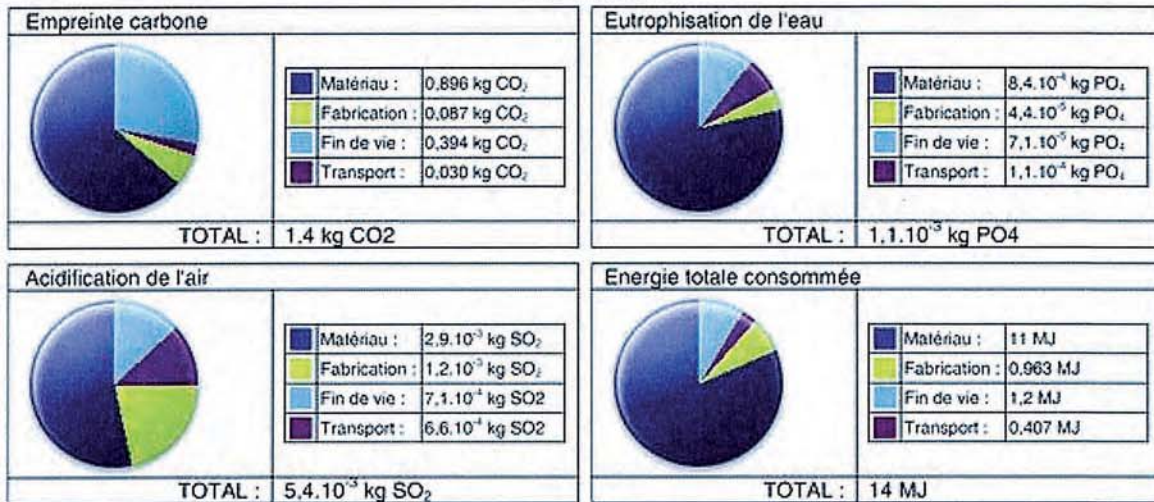
5. Synthèse de l'étude menée

Question 44 : proposer une synthèse décrivant et justifiant la démarche mise en œuvre dans le questionnement de ce sujet, pour répondre à la problématique globale d'amélioration des prothèses passives pour les sujets prothétiques ayant subi une amputation trans-fémorale.

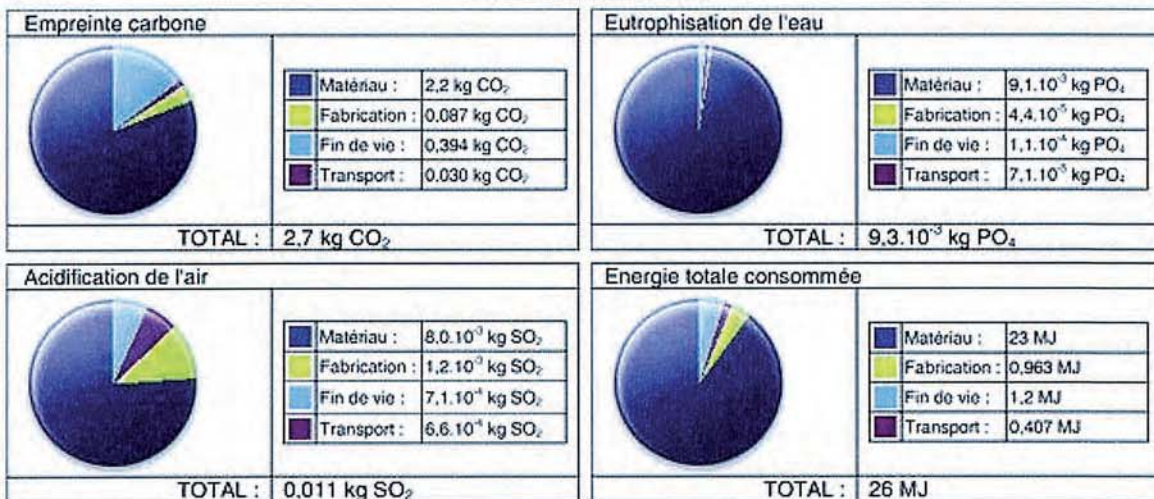
DOCUMENT TECHNIQUE

DT1 : comparaison des matériaux sur le critère de l'impact environnemental

34CrMo4



X3CrNiMoN27-5-2



Création du matériau (Matériau) : ceci englobe toutes les étapes, de l'extraction du minerai brut jusqu'à la fabrication de la matière en passant par l'énergie et toutes les ressources consommées ainsi que le transport des matières premières.

Fabrication de la pièce (Fabrication) : le procédé de fabrication et l'emplacement ont une influence significative sur l'environnement. Chaque procédé (fraisage, moulage, ...) utilise un type et une quantité de ressources d'énergie différents. Chaque région du monde utilise ses propres méthodes pour générer de l'électricité. Ceci signifie que, pour produire un kWh d'énergie, l'impact environnemental varie d'une région à l'autre.

Fin de vie : se réfère au sort des composants une fois qu'ils arrivent en bout de course. Ils peuvent être recyclés, mis à la décharge ou incinérés. Ceci est déterminé en fonction des moyennes observées dans la région d'utilisation du produit.

Transport : ceci prend en compte l'impact sur l'environnement du transport des pièces du lieu de production jusqu'au lieu d'utilisation. La distance entre régions et le mode de transport (camion, train, avion, bateau) détermine le niveau d'impact.