

Dossier industriel : patin à roulettes « On Wheelz »

PREMIÈRE PARTIE

ADRIEN SPACH*

Les épreuves d'admission à l'agrégation externe des sciences industrielles de l'ingénieur demandent la réalisation et la soutenance d'un dossier technique. Nous présentons ici l'étude scientifique d'un tel dossier. L'exploitation pédagogique sera présentée dans un prochain article.

L'objet d'étude de ce dossier a été développé par Flaneurz, une start-up fondée en 2013 par Florian Gravier (designer) et Arnaud Darut-Giard (ingénieur Arts et Métiers). Cette jeune entreprise est née d'une passion : le patin à roulettes 2 x 2 roues, aussi appelé *roller quad*. Le marché actuel ne permet pas de répondre aux exigences de ces entrepreneurs adeptes d'une utilisation technique du patin à roulettes et souhaitant pouvoir rouler quelle que soit la paire de chaussure utilisée.

Les patins à roulettes à sangles existants présentent un défaut majeur : le mauvais maintien en position de la chaussure lors d'une utilisation « agressive » des patins. Ils décidèrent donc de concevoir le patin à roulettes « On Wheelz », doté d'une interface composée de deux semelles. La première est fixée dans la chaussure (partie femelle), la seconde sur le châssis du patin (partie mâle). Ensemble, elles permettent de fixer de manière amovible la chaussure sur le patin. L'intérêt est de pouvoir patiner avec n'importe quelle paire de chaussures et ainsi d'« allier la pratique d'un sport à son look », à condition de bien vouloir modifier au préalable ses chaussures de façon définitive **1**.

La conception du produit a commencé avec la création de la société. Aujourd'hui, l'entreprise finit d'assembler une première série de 300 paires de patins à roulettes « On Wheelz » précommandés.

L'innovation réside dans la liaison entre la chaussure et le patin à roulettes. Des crochets à l'avant (notés 1 sur la figure **2A**) et à l'arrière (notés 2) ont été installés pour s'assurer que la chaussure ne se décolle pas du châssis du patin à roulettes et l'empêcher ainsi de glisser par rapport à cette surface (selon l'axe noté \vec{z}).

Pour éviter tout mouvement relatif entre la chaussure et le patin à roulettes, une dernière pièce est nécessaire afin de bloquer la translation de la

MOTS-CLÉS

ITEC,
mécanique,
résistance
des matériaux

* Professeur agrégé de sciences industrielles de l'ingénieur, option mécanique, École normale supérieure de Cachan (94).

Cet article est une version condensée de la partie scientifique d'un dossier soutenu lors de l'agrégation externe sciences industrielles de l'ingénieur, option mécanique, session 2016.

chaussure dans la direction \vec{x} . Cette pièce s'appelle logiquement « Stop_X » (notée 3 sur la figure **2A**).

Pour assembler la chaussure au patin à roulettes, il suffit de faire glisser le crochet avant dans la platine avant de la chaussure, puis de plaquer la platine arrière sur la semelle du patin **2B**. De par leur géométrie, au contact de la platine arrière, les deux crochets arrières se déplacent selon \vec{x} pour permettre le contact entre la chaussure et le châssis. Puis, grâce à un ressort, les deux crochets arrières viennent s'insérer dans la platine arrière afin d'empêcher la chaussure de se décoller de son socle.

Comme tout objet commercialisé, les patins à roulettes « On Wheelz » doivent répondre à un ensemble d'exigences. Elles sont de trois types **3** :

- les exigences liées à la norme EN 13899;
- les exigences liées à la construction : ce sont des conditions que doit remplir la chaussure pour pouvoir être modifiée;
- les exigences liées à l'utilisation.

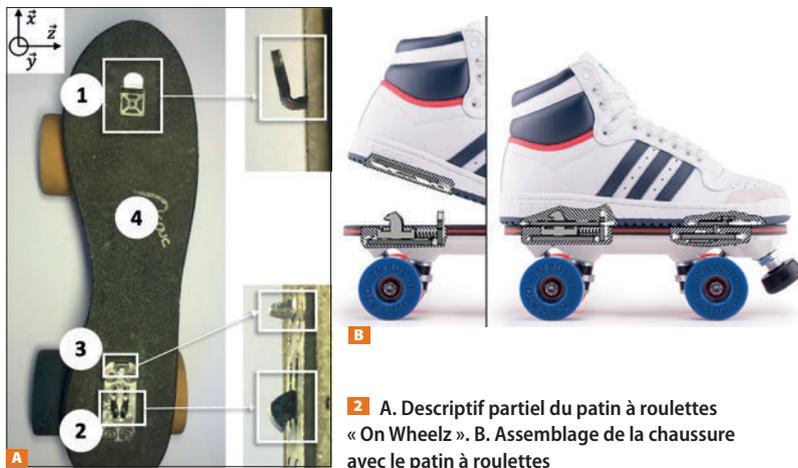
Cette dernière exigence a été rajoutée par l'entreprise. En effet, la norme en vigueur en la matière est composée d'un ensemble d'essais mécaniques correspondant à une utilisation récréative du patin à roulettes, alors que les patins « On Wheelz » sont destinés à une utilisation plus sportive. Même si ces patins répondent à la norme en vigueur, il reste donc une zone d'ombre quant à leur comportement dans des conditions plus « agressives ». La problématique de ce dossier est donc d'évaluer le comportement mécanique des pièces les plus sollicitées lors d'une pratique poussée du patin à roulettes, afin d'en définir les limites d'utilisation. Ces résultats permettront à l'entreprise d'élaborer la prochaine version de leur produit.

Périmètre de l'étude

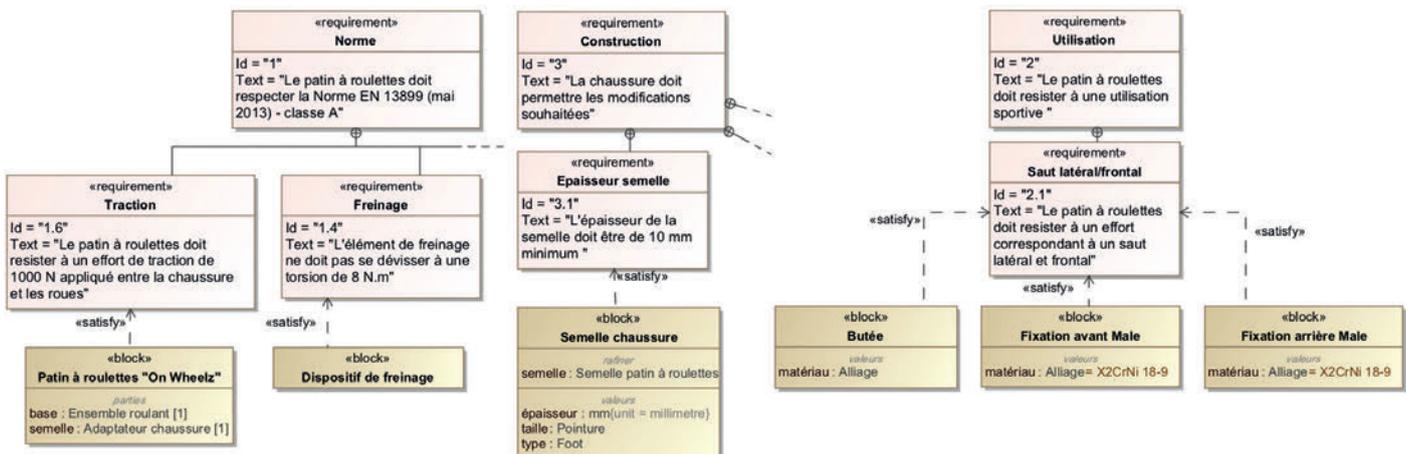
Les platines avant et arrière de l'adaptateur **1** ne feront pas partie de l'étude. La géométrie de ces pièces leur confère une importante résistance mécanique, contrairement aux pièces avec lesquelles elles sont en contact : crochet avant, Stop_X, ainsi que les deux crochets arrières. En suivant la même réflexion, nous sortons également le châssis du périmètre d'étude, ainsi que les trains avant et arrière du patin à roulettes.



1 Chaussure modifiée avec et sans adaptateur



2 A. Descriptif partiel du patin à roulettes « On Wheelz ». B. Assemblage de la chaussure avec le patin à roulettes



3 Exigences liées au patin à roulettes « On Wheelz »

Notre périmètre d'étude est donc composé 4 :

- du crochet avant;
- des crochets arrière;
- du Stop_X;
- de la semelle technique du patin à roulettes.

Hypothèses et modélisation

La première hypothèse est de considérer qu'en dehors du périmètre défini les pièces sont infiniment rigides.

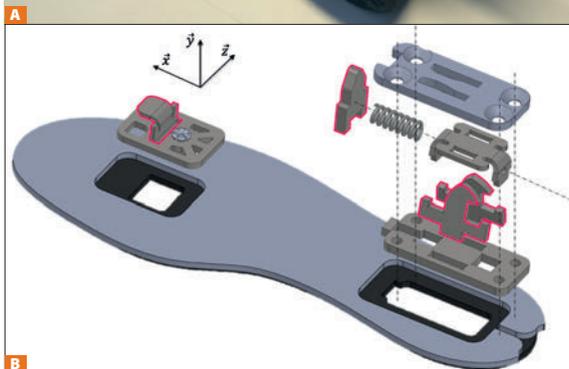
La modélisation des liaisons entre l'adaptateur patin à roulettes et l'adaptateur chaussure est essentielle, car c'est à partir de cette modélisation qu'il sera possible d'identifier quelle pièce est sollicitée en fonction de quelle utilisation.

La méthode est la suivante :

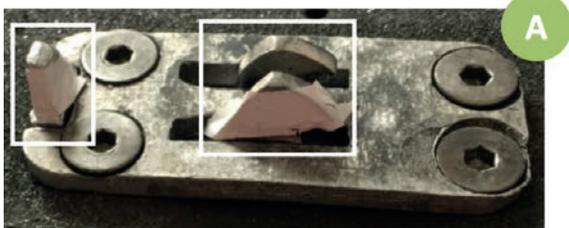
- analyse des surfaces en contact;
- analyse des degrés de liberté;
- caractérisation des liaisons.

Ainsi, il vient logiquement les deux premières liaisons :

- liaison entre le crochet avant (notée 1 sur la figure 2A) et la platine avant, liaison linéaire annulaire de centre A et d'axe (A, \vec{x}) :
 - les surfaces de contact bloquent toutes translations relatives selon \vec{y} et \vec{z} ,
 - la translation relative selon \vec{x} reste libre,
 - toutes les rotations relatives restent libres (pour un débattement relativement faible);



4 A. Éléments étudiés (en rose). B. Vue en éclaté de la partie arrière du patin à roulettes

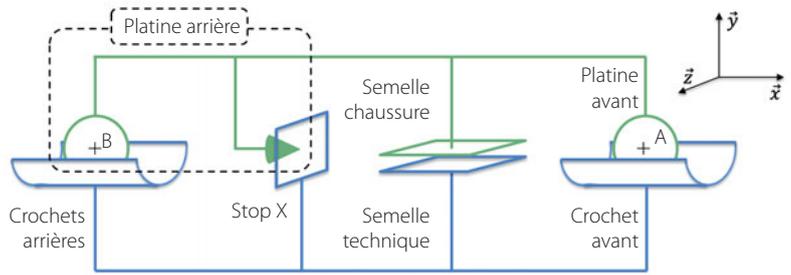


5 Analyse globale des liaisons

– liaison entre la semelle technique (notée 4) et la semelle chaussure, appui plan de normale \vec{y} .

En ce qui concerne la liaison entre la pièce Stop_X et la platine arrière ainsi qu'entre les deux crochets arrières et la platine arrière, la caractérisation des liaisons est plus complexe en raison de la nature des surfaces en contact.

Les surfaces de contact du crochet avant, des crochets arrières et du Stop_X avec l'adaptateur patin à



6 Schéma cinématique des liaisons au niveau de l'interface patin à roulettes-chaussure

roulettes sont quasiment alignées sur l'axe (A, \vec{x}) . Ainsi, lors d'un déplacement de l'adaptateur patin à roulettes selon \vec{z} , les trois pièces citées induisent de l'hyperstatisme puisque deux contacts suffiraient. La question qui se pose est donc de savoir quelles sont les deux pièces, parmi les trois citées, qui seront les premières en contact avec les deux platines de l'adaptateur patin à roulettes.

Pour répondre à cette question, nous avons posé des hypothèses et mis en place une expérimentation.

Nous ne prendrons pas en compte la distributivité des défauts de fabrication et de montage, ni l'élasticité des pièces une fois sollicitées. Nous nous plaçons ainsi volontairement dans le cas le plus défavorable, donc surdimensionnant, afin de garantir la sécurité lors de l'utilisation du patin à roulettes.

Ensuite, en appliquant un film blanc sur les surfaces à étudier (étape A sur la figure 5), puis en assemblant le patin à roulettes et en appliquant des chocs latéraux sur l'adaptateur patin à roulettes (étape B), nous identifions rapidement la pièce qui reprend les efforts et dans quel sens.

Nous concluons que la liaison entre les deux crochets arrières et la platine arrière est une liaison linéaire-annulaire de centre B et d'axe (B, \vec{x}) .

En ce qui concerne la liaison entre le Stop_X et la platine arrière :

- son rôle est d'empêcher toute translation selon \vec{x} ;
- les surfaces en contact entre les deux pièces sont extrêmement réduites.

Nous pouvons en conclure que cette liaison est modélisable comme une ponctuelle de normale \vec{x} .

De plus, nous allons considérer que l'adaptateur patin à roulettes (composé des platines avant et arrière) et la semelle de la chaussure ne forment qu'un solide. Il est alors possible de synthétiser l'ensemble des liaisons précédemment identifiées.

À partir de ce modèle, nous faisons l'hypothèse que toutes ces liaisons sont parfaites, excepté l'appui plan. Pour modéliser le contact au niveau de cette liaison, nous allons utiliser le modèle de Coulomb afin d'identifier les forces reprises par la semelle du patin à roulettes (appelé semelle technique sur la figure 1) dues à l'adhérence. Nous allons nous placer à la limite du glissement.

Nous avons posé des hypothèses puis mis en place une expérimentation



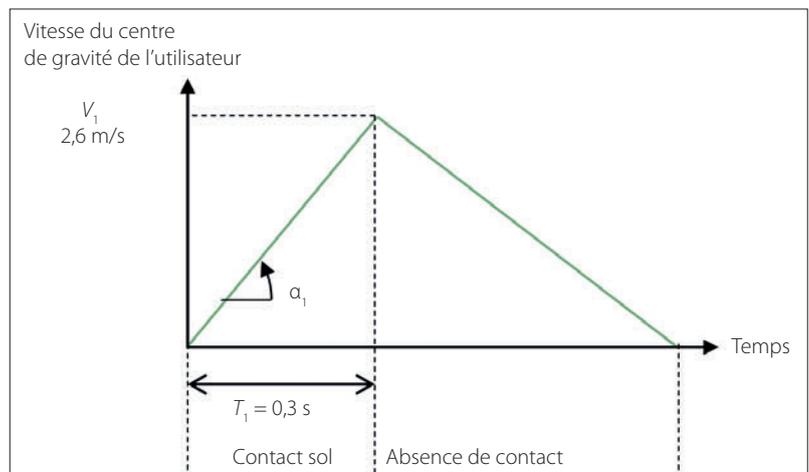
7 Saut latéral

Au niveau de l'interface chaussure-patin à roulettes, nous allons opter pour un coefficient d'adhérence $f = 0,7$, soit un coefficient élevé représentatif d'un contact entre du caoutchouc et une surface rugueuse.

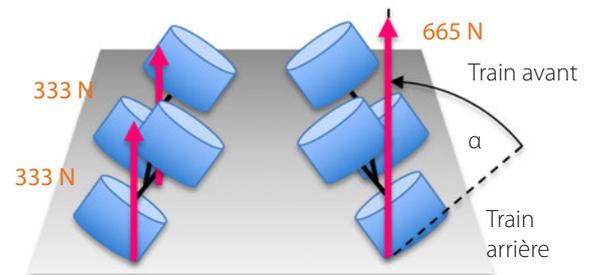
Cas de sollicitations et efforts correspondants

Trois cas critiques ont été identifiés avec les concepteurs dans le cadre d'une utilisation sportive « agressive » : le freinage latéral, le saut latéral et le saut frontal. Ce sont les cas pour lesquels les patins à roulettes présentent le plus grand nombre d'endommagements. Nous allons nous intéresser ici uniquement à la sollicitation la plus critique : le saut latéral. Ce saut consiste à prendre appui sur les deux roues extérieures des deux patins à roulettes afin d'effectuer un saut 7.

Les données d'entrée qui vont être utilisées par la suite proviennent des conditions dans lesquelles le jeu de pièces que nous avons à notre disposition a été sollicité. Ceci permettra d'avoir une comparaison pertinente entre les résultats du modèle et le profil des pièces réelles.



8 Profil de la vitesse en fonction du temps pour un saut latéral



9 Modèle de répartition des efforts lors d'un saut latéral

Le profil de vitesse en fonction du temps pour le saut latéral est affiché en figure 8. Ce profil est issu de la thèse de P. Samozino (2009).

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à l'ensemble Σ_1 {patin à roulettes ; utilisateur}, en prenant m la masse de l'utilisateur qui a sollicité le patin à roulettes et en considérant le temps T_1 uniquement, nous obtenons :

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

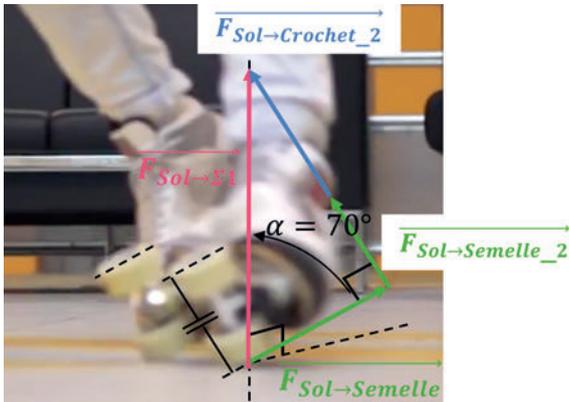
En projection selon la direction de la gravité :

$$F_{\text{Sol} \rightarrow \Sigma_1} - m \cdot g = m \cdot a_1 = m \cdot \frac{V_1}{T_1}$$

$$F_{\text{Sol} \rightarrow \Sigma_1} = 72 \cdot \left(\frac{2,6}{0,3} + 9,81 \right) = 1330 \text{ N}$$

Nous faisons l'hypothèse que les deux patins à roulettes sont sollicités équitablement, soit 665 N par patin.

De plus, pour chaque patin à roulettes, nous avons a priori deux éléments qui reprennent les efforts (crochet avant et l'un des deux crochets arrières). Nous allons nous placer dans le cas le plus défavorable où seulement un train arrière reprend l'ensemble de la force de son patin 9. En effet, lors d'un saut, il est probable que l'utilisateur n'ait que trois appuis ponctuels avec le sol (cas isostatique).



10 Modèle de répartition des efforts lors d'un saut latéral avec adhérence

Ainsi, nous formulons l'hypothèse que dans le cas le plus défavorable l'ensemble des efforts est repris uniquement par un crochet arrière, le crochet avant ne reprenant aucun effort.

Nous identifions grâce à plusieurs vidéos, fournies par Flaneurz, l'angle formé par le patin à roulettes en cours de poussée : $\alpha = 70^\circ$ 10. En conservant l'hypothèse des liaisons parfaites, la répartition des efforts pour le patin à roulettes qui possède le crochet arrière le plus sollicité est la suivante :

$$\|F_{Sol \rightarrow Crochet}\| = \sin(\alpha) \cdot \|F_{Sol \rightarrow \Sigma_1}\| = 625 \text{ N}$$

$$\|F_{Sol \rightarrow Semelle}\| = \cos(\alpha) \cdot \|F_{Sol \rightarrow \Sigma_1}\| = 228 \text{ N}$$

Nous calculons dans un premier temps l'effort tangentiel repris par la semelle par adhérence, pour ensuite le retrancher à la valeur initiale d'effort tangentiel que reprenait le crochet arrière.

$$F_{Sol \rightarrow Semelle_2} = f \times F_{Sol \rightarrow Semelle} = 0,7 \times 228 = 159 \text{ N}$$

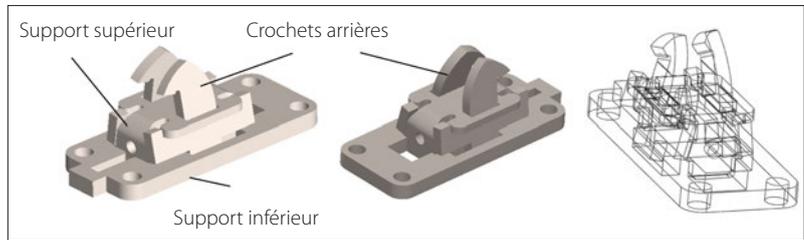
$$F_{Sol \rightarrow Crochet_2} = F_{Sol \rightarrow Crochet} - F_{Sol \rightarrow Semelle_2} = 625 - 159 = 466 \text{ N}$$

Nous allons désormais nous intéresser au modèle numérique de ces pièces pour ensuite effectuer une simulation par éléments finis et, en comparant les résultats au réel, il sera possible de valider ou d'affiner le modèle construit.

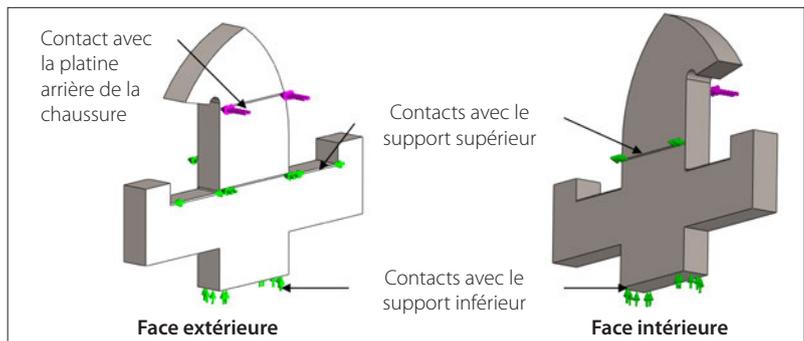
Modèle numérique, simulations et comparaison avec le réel

Pour construire le modèle numérique, nous nous sommes appuyés sur le modèle CAO fourni par Flaneurz. L'ensemble de l'étude est réalisé grâce au logiciel Solidworks et à la suite Solidworks Simulation.

Afin d'obtenir des résultats cohérents, nous avons considéré les contacts entre les pièces comme des surfaces de largeur 0,1 mm. Cette valeur provient de l'épaisseur du marquage présent sur les pièces réelles.



11 Modèle numérique partiel



12 Conditions aux limites du crochet arrière

Mis à part le crochet arrière étudié, le reste des pièces est considéré comme infiniment rigide et à cet égard des conditions de type « appui plan » ont été imposées au niveau des surfaces de contact.

Pour déterminer la localisation des contacts avec les autres pièces, permettant ainsi de savoir où appliquer l'effort extérieur et les conditions aux limites, nous avons croisé deux démarches :

- celle présentée plus haut qui consiste à appliquer un film blanc sur les pièces étudiées et à solliciter le mécanisme une fois assemblé ;
- celle qui permet d'identifier les contacts grâce au modèle CAO partiel 11.

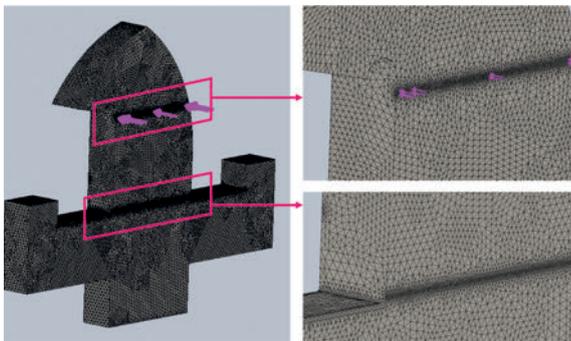
Pour les simulations suivantes, nous allons avoir une superposition de contraintes en jeu, ce qui va se traduire par la nécessité d'avoir une contrainte équivalente. De plus, étant donné que nos pièces sont composées de métal, un matériau ductile, nous allons opter pour le critère de von Mises pour comparer les contraintes calculées avec la résistance en traction de l'acier.

Ensuite, nous simplifions la pièce dans les zones où il y a très peu de sollicitations, en nous intéressant principalement à supprimer les congés des crochets arrière pour diminuer le temps de calcul tout en ayant des résultats fiables.

En appliquant la démarche expliquée précédemment, nous déterminons les conditions aux limites de notre pièce 12.

L'ensemble des flèches roses correspond à l'effort appliqué (N), les flèches vertes indiquent un appui plan.

Les surfaces de contact (de largeur 0,1 mm) nous imposent un maillage extrêmement fin afin de pouvoir connaître le comportement de la pièce dans ces



13 Maillage crochet arrière

surfaces. Nous effectuons donc un maillage local de 0,03 mm maximal dans ces zones pour avoir au moins trois éléments dans la largeur de ces surfaces tout en évitant des temps de calcul trop longs. Pour le reste de la pièce, nous optons pour un maillage de 0,2 mm maximal.

Pour obtenir ces deux tailles de maille, nous avons mené une étude de convergence. Nous sommes partis d'un maillage grossier (maille de 0,5 mm), nous avons lancé la simulation et enregistré les résultats. Nous avons répété cette action, en affinant le maillage, et tant que les résultats de la simulation (en l'occurrence les valeurs de la contrainte équivalente au sein de la pièce) présentaient une différence avec le maillage précédent, nous avons répété la boucle. À partir du moment où un maillage plus fin n'ajoutait pas en précision, il y a convergence et la boucle s'arrête : nous avons trouvé le bon maillage pour notre pièce.

La pièce est maillée par des éléments tétraédriques du second ordre. Nous obtenons le profil de maillage présenté figure 13.

Le crochet est réalisé en acier inoxydable X2CrNi18-9 et, pour information, a été obtenu par découpe laser. Après simulation pour un effort $F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Crochet}_2} = 466 \text{ N}$, nous obtenons les résultats présentés figure 14.

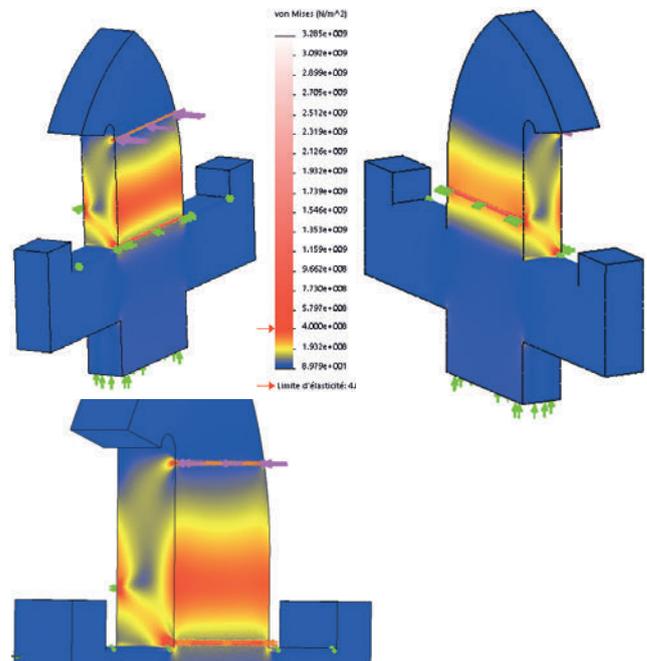
Nous avons un matériau qui a pour limite élastique $R_e = 400 \text{ MPa}$, les zones affichées en rouge vif sont celles qui plastifient.

Nous retrouvons une cohérence des surfaces qui ont maté entre l'expérimental et le simulé 15. Sur la troisième image de cette figure 15, les zones en bleu correspondent aux zones où la pièce a plastifié.

Ces résultats nous permettent de valider le modèle construit ; nous allons donc pouvoir l'utiliser dans la partie suivante pour déterminer les limites d'utilisation du patin à roulettes pour un saut latéral.

Limites d'utilisation

Nous allons identifier l'effort maximal que peut subir le crochet arrière. Cet effort pourra ensuite être ramené



14 Simulation $F = 466 \text{ N}$ crochet arrière

au poids maximal de l'utilisateur, ce qui constitue la principale variable d'entrée de notre modèle.

Nous définissons d'abord le cahier des charges suivant : les déformations plastiques doivent uniquement avoir lieu au niveau des contacts entre les pièces (matage).

La démarche utilisée pour déterminer l'effort maximal qui peut être appliqué en respectant ce cahier des charges est d'effectuer un ensemble de simulations par itération.

Nous déterminons ainsi l'effort maximal :

$$F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Crochet}_2_MAX} = 525 \text{ N}.$$

Le résultat de la simulation est présenté figure 16. Sur l'image c de cette figure, les zones en bleu correspondent aux zones où la pièce a plastifié.

Pour un patin à roulettes, avec un coefficient d'adhérence f toujours égal à 0,7, nous obtenons :

$$\begin{aligned} F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle_MAX}} &= \frac{1}{\tan(\alpha)} \times (F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Crochet}_2_MAX} + f \times F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle_MAX}}) \\ F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle_MAX}} &= F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Crochet}_2_MAX} \times \frac{1}{\tan(\alpha) - f} = 256 \text{ N} \end{aligned}$$

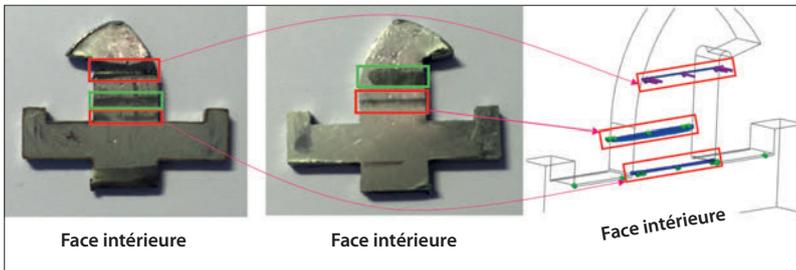
De plus :

$$F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle}_2_MAX} = f \times F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle_MAX}} = 180 \text{ N}$$

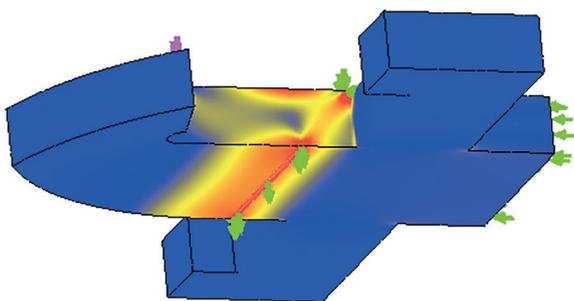
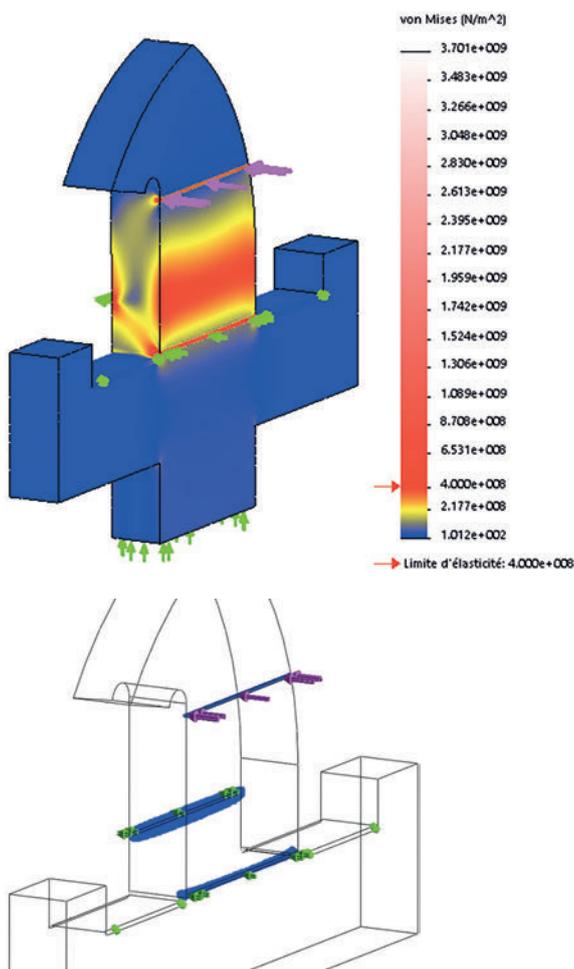
Soit l'effort maximal pour une jambe :

$$F_{\text{Sol} \rightarrow \Sigma_1_MAX} =$$

$$\sqrt{F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle_MAX}}^2 + (F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Semelle}_2_MAX} + F_{\text{Sol} \rightarrow \text{Crochet}_2_MAX})^2} = 750 \text{ N}$$



15 Analyse de la pièce réelle avec la simulation $F = 466 \text{ N}$. Les surfaces encadrées en rouge correspondent à un marquage de la pièce et celles en vert ne correspondent qu'à une teinte locale de la pièce



16 Simulation $F = 525 \text{ N}$ crochet arrière

Nous obtenons alors un effort maximal de 1 500 N appliqué par l'utilisateur à l'ensemble des patins à roulettes, ce qui nous permet de déterminer la masse maximale de l'utilisateur :

$$m_{\text{MAX}} = 2 \times F_{\text{Sol} \rightarrow \Sigma_1 - \text{MAX}} \times \frac{t_2}{t_2 \times g + V_2}$$

$$= 1500 \times \frac{0,3}{0,3 \times 9,81 + 2,6} = 81 \text{ kg}$$

Conclusion

L'objectif de cette étude était de déterminer les limites d'utilisation du patin à roulettes pour un cas précis, identifié comme étant le plus critique pour notre système.

Rappelons que ce produit est régi par la norme EN 13899 – classe A, c'est-à-dire pour des utilisateurs de 20 à 100 kg. Puisque ce produit est destiné à des personnes dont le poids dépasse les limites d'utilisation calculées lors de cette étude, nous pouvons conclure qu'il y a un risque que les pièces se détériorent de façon irréversible jusqu'à la rupture. De plus, pour ce type de pièce, nous devrions trouver un coefficient de sécurité entre 2 et 3.

Cependant, il y a un retour critique à avoir sur cette étude, en particulier :

- l'analyse a été réalisée sur un jeu de pièces dont les sollicitations subies ne sont pas entièrement connues ;
- la répartition des efforts entre les jambes au cours du temps lors d'un saut est inconnue ;
- beaucoup d'hypothèses surdimensionnantes ont été posées.

Un des prolongements intéressants de cette étude serait d'identifier les modifications à apporter aux pièces afin d'atteindre les caractéristiques souhaitées, en prenant pour degrés de liberté le choix du matériau et la géométrie des pièces. C'est cette démarche que nous avons choisie pour une application pédagogique orientée vers une classe de STI2D et qui sera présentée dans un prochain numéro. ■

SOURCES

P. Samozino, *Capacités mécaniques des membres inférieurs et mouvements explosifs. Approches théoriques intégratives appliquées au saut vertical*, université Jean-Monnet, Saint-Étienne, 2009 (pour l'approche théorique du saut vertical).

IUT Lyon 1 :

<http://dds.univ-lyon1.fr/webapp/website/website.html?id=2886239&pageId=207633>, consulté en avril 2016 (pour la valeur du coefficient d'adhérence utilisé).

J.-L. Fanchon, *Guide de mécanique : sciences et technologies industrielles*, Nathan, 2001 (pour le coefficient de sécurité).

Roller on wheelz :

<http://www.flaneurz.com/fr/>