Génie mécanique

Cours No 14.2
Résumé du cours

V.Michaud

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL

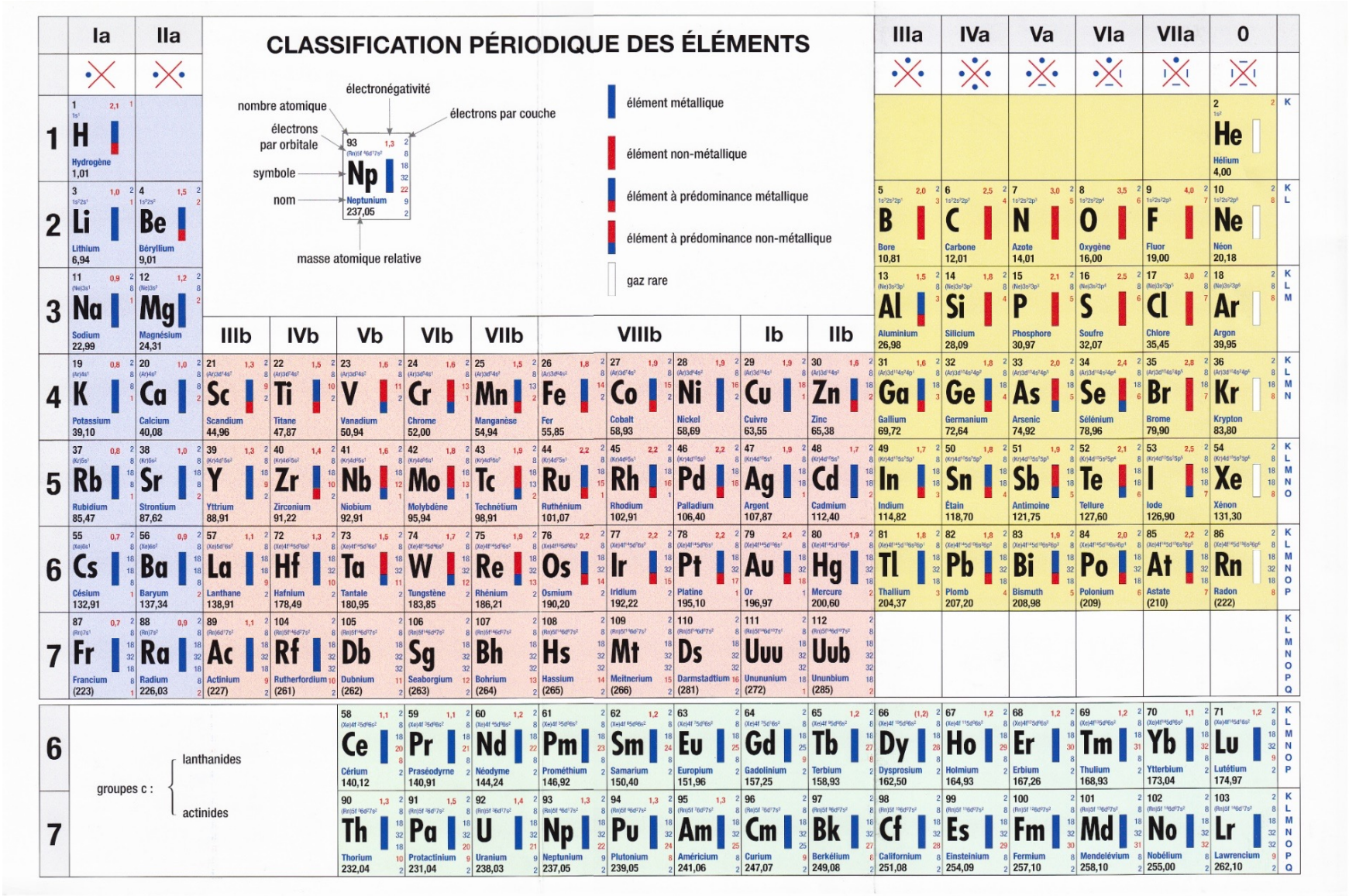
Résumé du cours

Objectifs du cours…donnés au cours 1:

Dans le cadre de votre futur métier d'ingénieur(e) en mécanique, vous serez amenés à concevoir des pièces, des mécanismes, à utiliser et à choisir des matériaux.

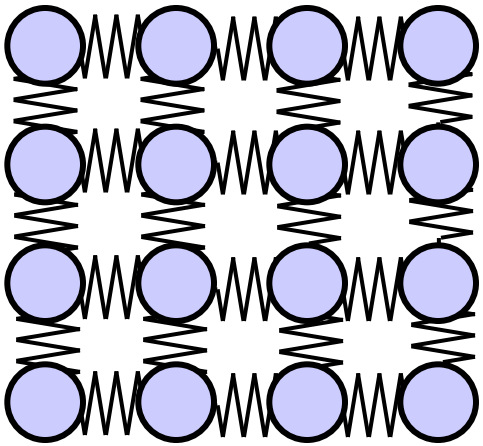
Lesquels choisir? Comment faire? Comment savoir les risques au niveau de la durabilité? Comment la pièce va résister à la chaleur? Quel impact en termes d'usure, de bruit?
Qu'est ce qui fait que tel matériau va résister plus que tel autre, sera plus rigide, ou plus souple?
Si je choisis un métal donné, par exemple l'Aluminium, comment savoir si je prends un métal pur ou un mélange avec du Cuivre, du Magnésium, etc? Si je demande un revêtement de surface?

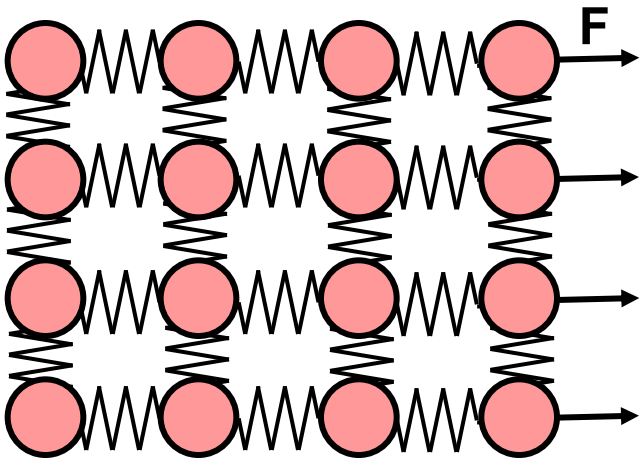
Le terrain de jeu



Fil rouge: potentiel de Lennard Jones

Pour un cristal, relation entre les propriétés élastiques et les liaisons interatomiques.





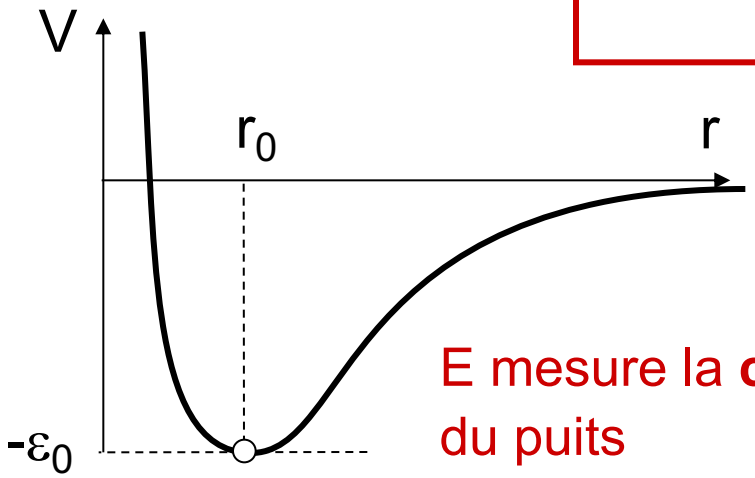
En prenant un potentiel de Lennard-Jones:

$$V = \varepsilon_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{6} \right]$$

On a en traction uniaxiale

une « raideur » E:

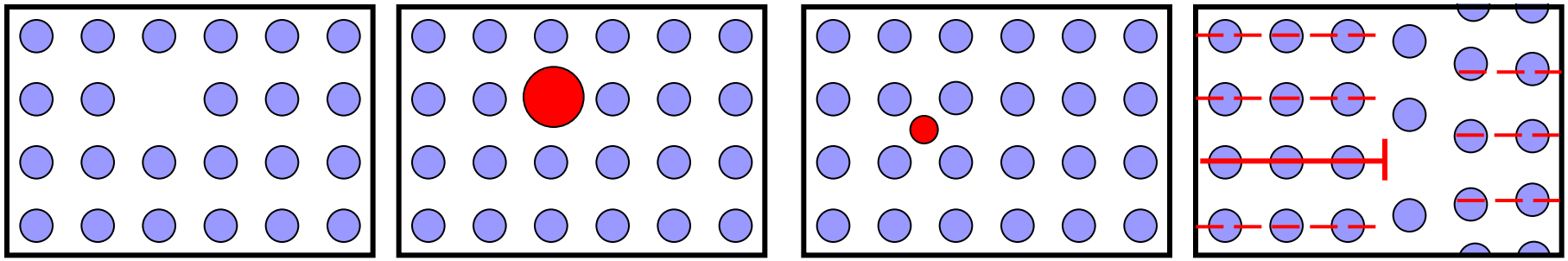
$$E = \frac{72\varepsilon_0}{r_0^3}$$



E mesure la **courbure** du puits

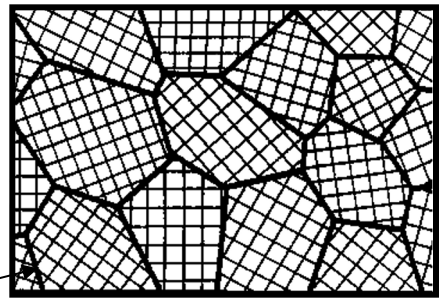
Présence de défauts

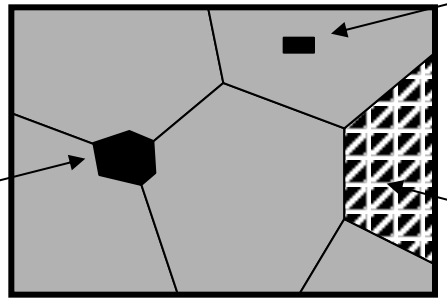
Le cristal parfait n'existe pas! Types de **défauts**:



Lacune | Défaut ponctuel (substitutionnel) | Défaut ponctuel (interstitiel) | Dislocation

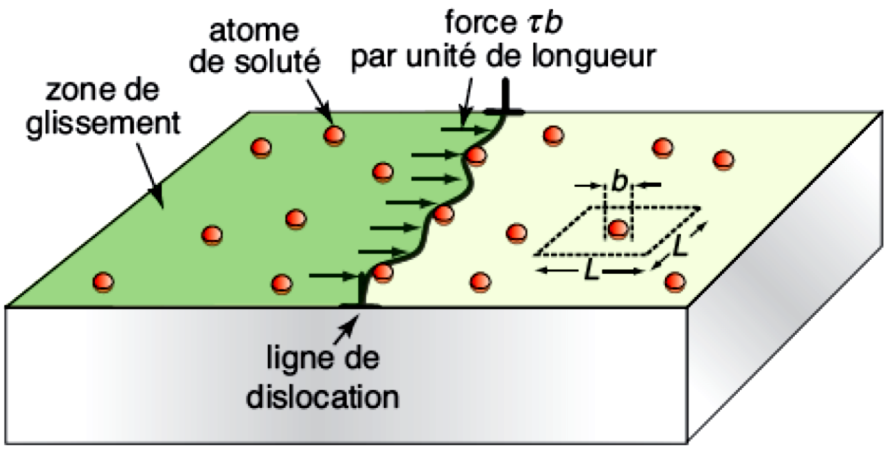
Mais surtout, la plupart des matériaux sont **polycristallins** et composés de plusieurs phases (**multiphasés**)

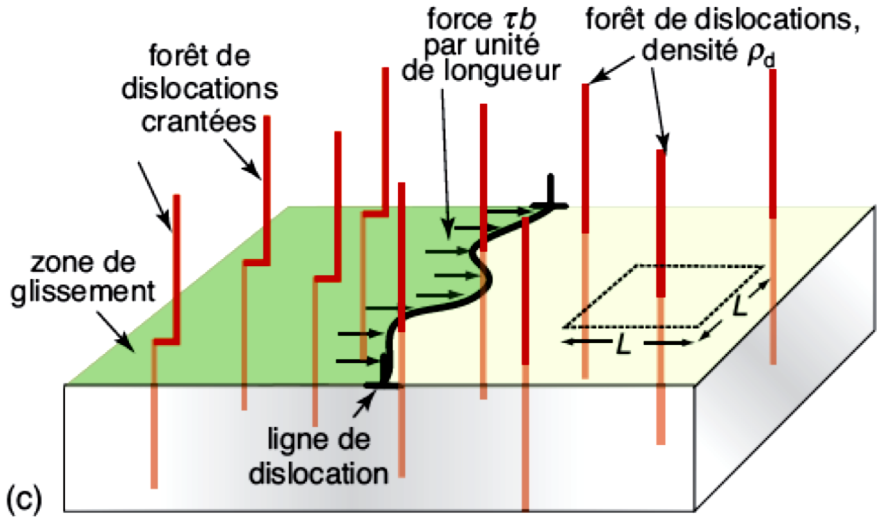




Les propriétés mécaniques

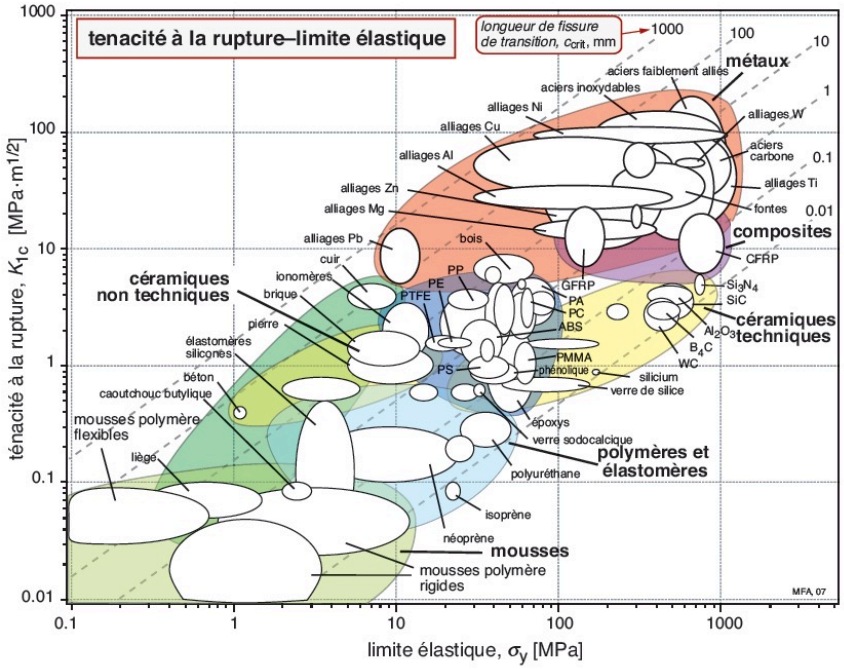
Elles dépendent de la nature des liaisons entre les atomes et de leur énergie de liaison (cela définit la rigidité, i.e. le module d'Young E), et aussi de la possibilité que des défauts (dislocations, par exemple) puisse se déplacer sous une contrainte externe (cela gouverne si le matériau est fragile ou ductile, et sa limite d'élasticité).

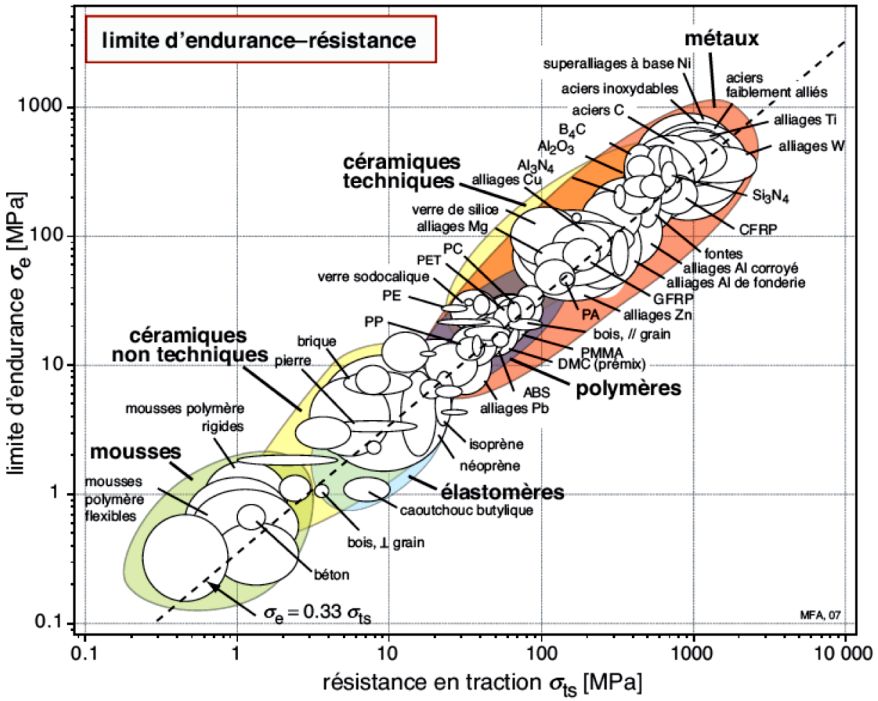




Les propriétés mécaniques

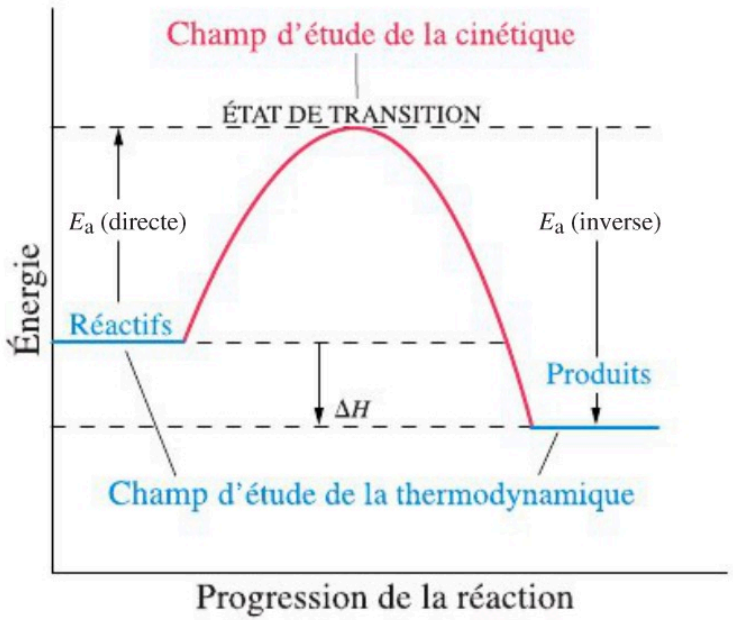
Les défauts macroscopiques (petites fissures, entailles, etc) sont aussi ceux qui vont faire se casser prématurément les matériaux fragiles, dont la ténacité peut être faible... Et cela peut aussi avoir une influence sur le comportement en fatigue!





L'équilibre et le temps d'y arriver…

Thermodynamique: considère les potentiels chimiques relatifs des réactifs et des produits. Elle permet de prédire si une réaction est spontanée ou non, de calculer la quantité de travail que l'on peut attendre de cette réaction et de déterminer la composition de l'équilibre.



Cinétique: s'intéresse plutôt au potentiel chimique des états intermédiaires, et explique pourquoi une réaction est lente ou rapide.

L'équilibre et la thermodynamique

Durant une transformation (transformation physique ou réaction chimique), la **variation d'énergie interne** du système est égale à la somme de la **quantité de chaleur Q** échangée avec l'environnement et du **travail W** fourni (mécanique, électrique..).

$$\Delta U = W + Q$$

La variation d'**enthalpie** du système **ΔH** est égale à la chaleur Q_P fournie au système, **à pression constante**.

L'entropie mesure le degré de désordre du système, si:

$$\Delta S_{univers} = \Delta S_{système} + \Delta S_{environnement} > 0 \quad \text{réactions spontanées}$$

$$\Delta S_{univers} = \Delta S_r^0 + \frac{-\Delta H_r^0}{T}$$

$$\Delta G_r^0 = \Delta H_r^0 - T\,\Delta S_r^0$$

L’équilibre et la thermodynamique

Dans les **corps purs**, la thermo permet de comprendre la chaleur spécifique, ce qui se passe au point de fusion et de vaporisation, et les diagrammes d’états.

Dans les **mélanges non réactifs** (alliages, solutions), la thermo permet de comprendre les phases en présence en fonction de la température et de la composition.

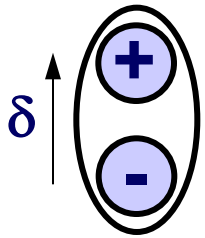
Dans les **mélanges réactifs** (réactions chimiques), la thermo permet de comprendre les équilibres de réactions…dont par exemple les réactions acide base et oxydo-réduction.

Et les électrons bougent…

Charge

$\pm q$ [A.s]

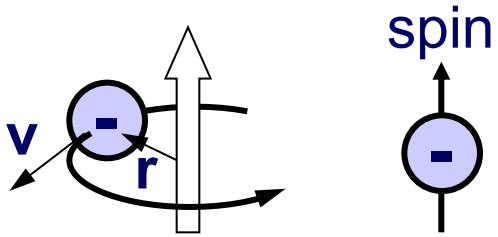
(1C=1A.s)



Dipôle électrique

$\mathbf{p} = q\delta$ (vecteur)

[A.s. m]



Dipôle magnétique

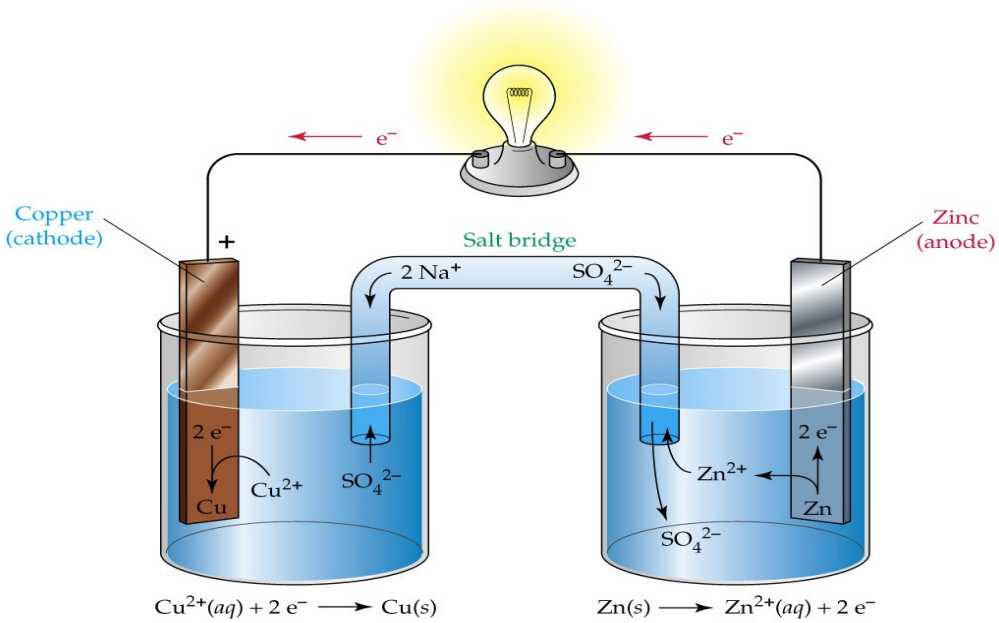
$\mathbf{m} = ½\, q\mathbf{r}\times\mathbf{v}$ (+ spin)

(vecteur) [A.m^2]

Ce sont eux qui gouvernent si un matériau est conducteur ou isolant, son comportement magnétique, etc..

On peut même générer de l'énergie électrique!

Si on sépare deux demi-réactions d'oxydo-réduction et on les relie électriquement on peut créer une pile électrochimique (aussi appelée cellule galvanique).

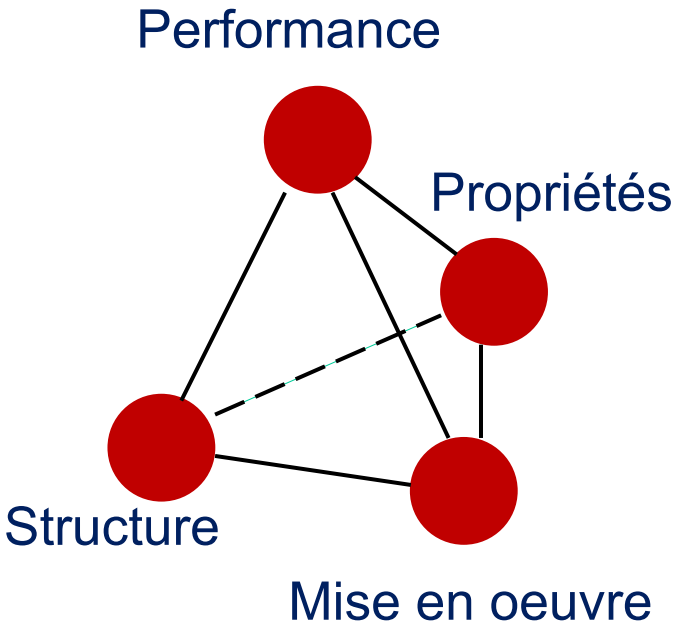


réduction oxydation

Une réaction chimique spontanée provoque un **flux d'électrons de l'anode vers la cathode**. Le **pont salin (ions indifférents du point de vue redox)** est nécessaire pour assurer l'électroneutralité des solutions.

Lien structure, propriétés, mise en oeuvre

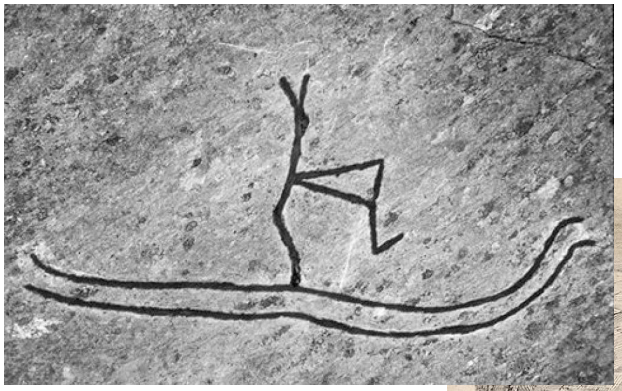
Et voilà, maintenant vous saisissez la relation entre la **composition atomique**, la **microstructure** (arrangement des atomes, liaisons, défauts…) qui provient de la **fabrication** (thermodynamique, cinétique, réactions chimiques, étapes thermiques…) et les **propriétés** mécaniques, mais aussi thermiques, électriques, magnétiques, en fonction de la température et aussi de l'environnement présent (corrosion, usure, etc.) avec des moyens de protéger les surfaces (cémentation, diffusion d'espèces chimiques, galvanisation, ..).



Et pour finir…

A quoi ça sert, la science des matériaux?
Exemple du ski…

Les matériaux du ski



Gravure rupestre, Norvège, 3000 ans BC

Sami, wikipedia

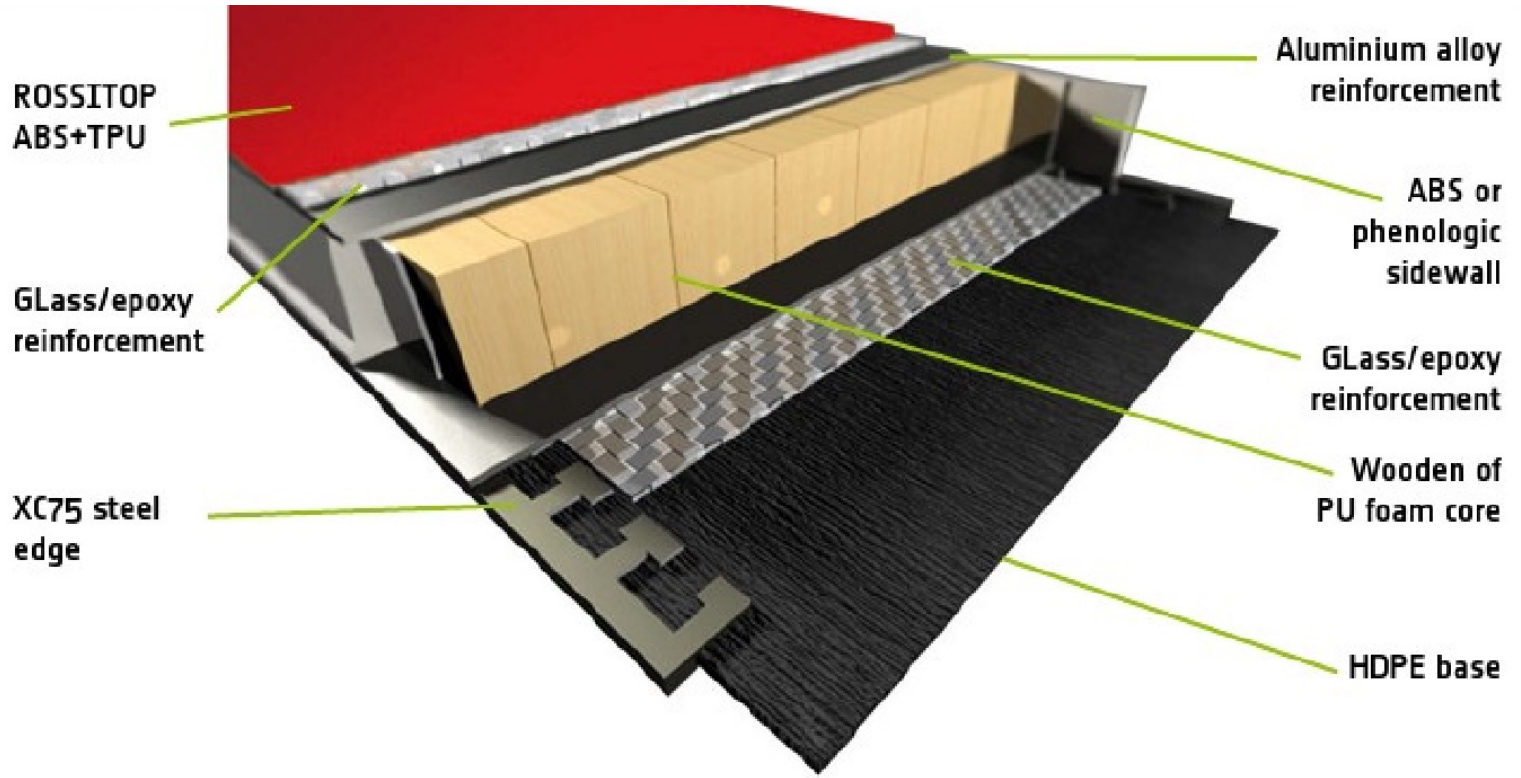
En 1767, wikipedia

En 1900, wikipedia

Disponibilité, résistance mécanique en flexion, glisse?

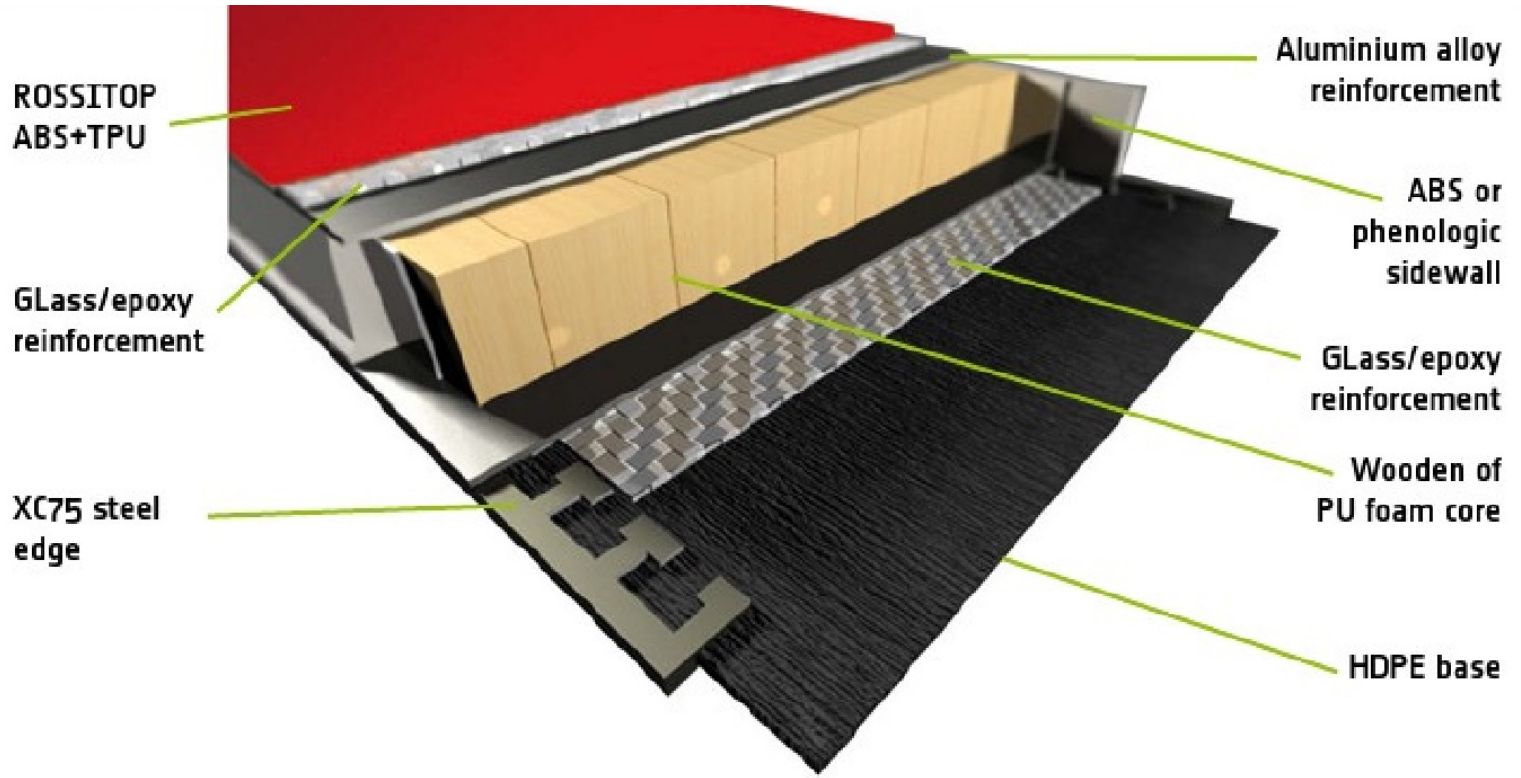
Les (multi-)matériaux du ski

Un ski moderne est un assemblage multi-couches de nombreux matériaux différents: polymer, composite, bois, acier, aluminium, etc assemblés avec une colle. Chaque couche est choisie pour ses propriétés particulières.



Les (multi-)matériaux du ski

Comment trouver des informations sur les matériaux que l'on peut utiliser, quelles sont leurs propriétés?
Il existe des databases (EduPack, sinon Matweb par exemple)



Exemble ABS, database

Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)

General properties

Density	1.01	-	1.21	Mg/m^3
Price	2.36	-	2.6	US $/kg
Date first used	1937			

Mechanical properties

Young's modulus	1.1	-	2.9	GPa
Yield strength	18.5	-	51	MPa
Tensile strength	27.6	-	55.2	MPa
Elongation	1.5	-	100	% strain
Hardness - Vickers	5.6	-	15.3	HV
Fatigue strength	11	-	22.1	MPa
Fracture toughness MPa.m1/2	1.19	-	4.29	

Thermal properties

Max Service temp	61.9	-	76.9	C
Thermal expansion	84.6	-	234	µstrain/C
Specific heat	1390	-	1920	J/kg.C
Thermal conductivity	0.188	-	0.335	W/m.C

Electrical properties

Conductor or insulator?	Good insulator

Optical properties

Transparency			Opaque	
Refractive index	1.53	-	1.54	

Processability

Castability	1	-	2	
Moldability	4	-	5	
Machinability	3	-	4	
Weldability	5			

Eco properties

Embodied energy, primary production	90.3	-	99.9	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	3.64	-	4.03	kg/kg
Recycle				

CES EduPack
(grantadesign.com)

Attention à vos sources d'information!

Comment trouver des informations sur les matériaux que l'on peut utiliser, quelles sont leurs propriétés?
Exemple: L'alliage d'Alu utilisé dans les skis s'appelle le Titanal.

"Titanal is an aluminum alloy with titanium, vanadium, and several other alloying elements that give it exceptionally high yield strength," says K2's lead ski engineer Jed Yeiser. "It is used extensively in skis (and aircraft, for that matter) due to its high bulk modulus and extremely high yield strength compared to other aluminum alloys. The material has better inherent damping properties than many composites, especially carbon fiber, Kevlar, and, to a lesser extent, fiberglass."

Attention à vos sources d'information!

Demandons a Chat GPT?

What is titanal?

Titanal is a trademarked name for a type of metal alloy, specifically a high-strength aluminum-based material that is reinforced with titanium. It is commonly used in applications where strength, light weight, and durability are required, such as in the manufacturing of skis, snowboards, and other sports equipment.

Composition and Properties:

- **Titanal** is typically composed of an aluminum matrix with small amounts of titanium and other elements (like zirconium and sometimes nickel), making it both strong and lightweight.
- It has a high strength-to-weight ratio, good fatigue resistance, and is resistant to corrosion, making it well-suited for high-stress environments.

Uses:

- **Skis and Snowboards**: In winter sports, Titanal is often used in the construction of ski and snowboard cores. It is incorporated into ski laminates to enhance stiffness, stability, and edge grip without significantly increasing the weight of the ski.
- **Aerospace and Automotive**: Due to its strength and light weight, Titanal may also be used in various engineering applications, though it's more common in consumer goods like skis.

The key benefit of Titanal is that it allows manufacturers to produce durable products that can withstand high impacts while still remaining relatively light.

Titanal, pas de titane mais du Zn, Mg, Cu, Zr!

Rm tensile strength [N/mm^2]	Rm 0.2 yield strength [N/mm^2]	Minimal strain [%]	Density [kg/m^3]	Thermal expansion [K^{-1}]	Young modulus [Gpa]
630	600	12	2820	$23 \cdot 10^{-6}$	72

Composition: Al 88.5%, Zn 7%, Mg 2.5%, Cu 1.7%, Zr 0.1%

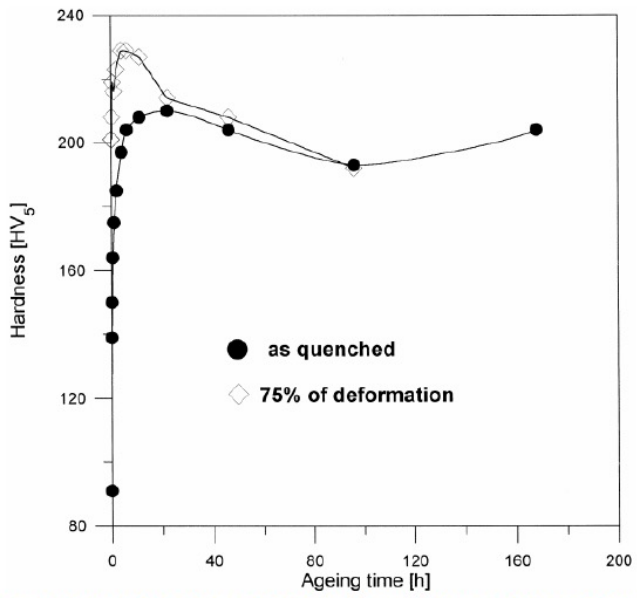


Figure 3 : Hardness changes of AlZnMgCuZr alloy aged at 120°C after quenching and after additional deformation of 75% by rolling [4]

Surface and mechanical properties:

Surface	Temper	Thickness [mm]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A50 [%]
Phosphoric acid anodized	T6-TIT	≥ 0,3* - ≤ 0,40	≥ 600	≥ 565	≥ 7
Untreated		0,50 – 0,60	≥ 600	≥ 580	≥ 7
		0,70 – 1,20	≥ 620	≥ 600	≥ 7

*0.30mm thickness only available upon request

Dimensional tolerances:

	Phosphoric acid anodized		Untreated		Unit
	Nominal dimensions	Tolerance	Nominal dimensions	Tolerance	
Thickness	≥ 0,40 - ≤ 1,20	+/- 0,03	≥ 0,40 - ≤ 1,20	+/- 0,03	mm
Width	50 - 310	+ 0,8 / - 0	≥ 50 - ≤ 310 > 310 - ≤ 1.000	+ 0,8 / -0 +/- 1,5	mm
Internal diameter	500	+/- 10	500	+/- 10	mm
External diameter	1.500	+ 0 / - 700	1.500	+ 0 / - 700	mm

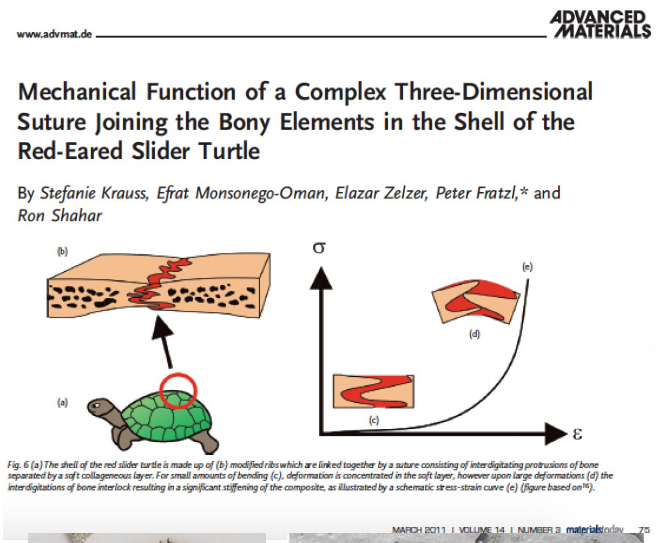
AMAG delivers the aluminium in thicknesses of 0.4 mm to 1.2 mm for use in the skiing industry.

Shaped Ti technology:
Fischer sports uses Shaped Ti technology, which makes a decisive difference to the middle widths of skis. The narrower the ski, the longer the Titanal® layer – and the smaller the flex cut (*Figure 1*). This helps to give the ski direction and thus allows more precise control.

Did you know?
AMAG Titanal® (AlZn7MgCuZr) is part of the group of 7xxx alloys. It is a very high-alloyed metal, which makes it extremely difficult to cast into rolling slabs in continuous casting. Successful casting requires a highly sophisticated smelting treatment and grain refinement as well as carefully coordinated casting parameters combined with a metallurgically optimal casting method. With appropriate heat treatment, this alloy becomes exceptionally strong – an AMAG is capable of series production of this alloy in sheet form and in accordance with international standards.

Pour aller encore plus loin… le rêve!

De l’idée au concept final en passant par de la simulation…et des itérations

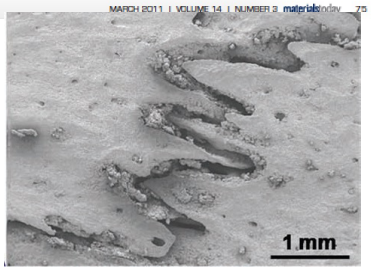

www.advmat.de ADVANCED MATERIALS

Mechanical Function of a Complex Three-Dimensional Suture Joining the Bony Elements in the Shell of the Red-Eared Slider Turtle

By *Stefanie Krauss, Efrat Monsonego-Oman, Elazar Zelzer, Peter Fratzl,* and Ron Shahar*

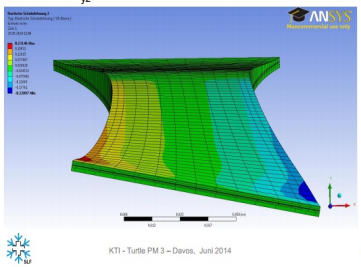
Fig. 6 (a) The shell of the red slider turtle is made up of (b) modified ribs which are linked together by a suture consisting of interdigitating protrusions of bone separated by a soft collagenous layer. For small amounts of bending (c), deformation is concentrated in the soft layer, however upon large deformations (d) the interdigitations of bone interlock resulting in a significant stiffening of the composite, as illustrated by a schematic stress-strain curve (e) (figure based on[10]).

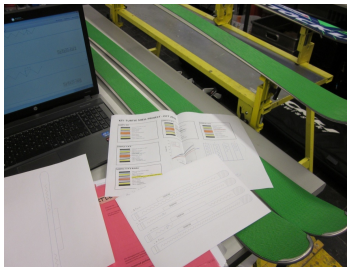
MARCH 2011 | VOLUME 14 | NUMBER 3 materialstoday 75

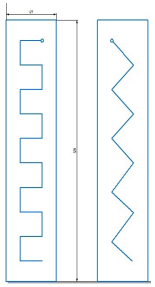


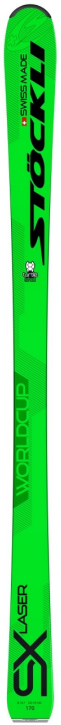
Suture between the ventral osteoderms of leatherback turtle, from W. Yang et al., JOM 2012 , 64 , 475.

TCS layer with highest shear strains
ε_{yz} = -16…16%



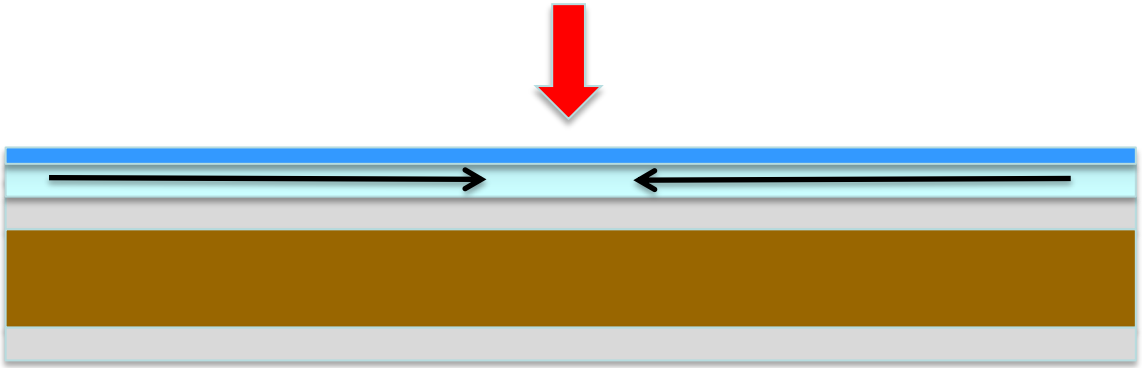






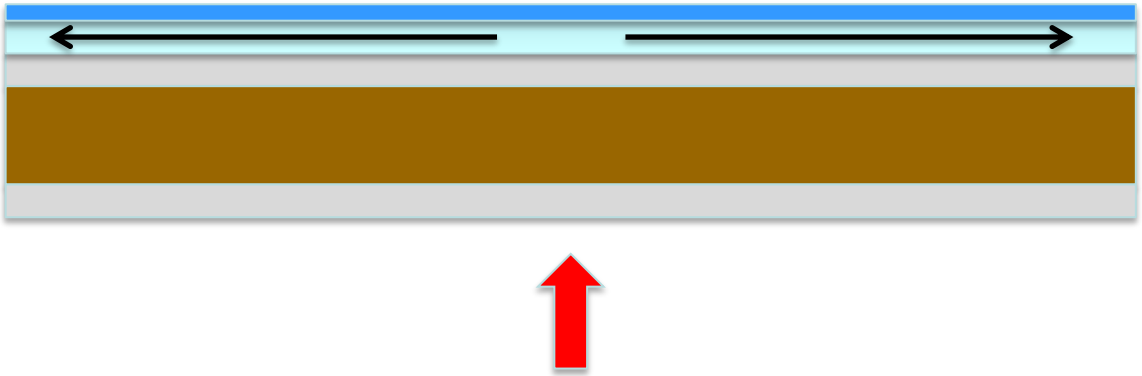
Le rêve suivant…

En flexion dans le sens du ski



Compliant en compression

Dans l‘autre sens



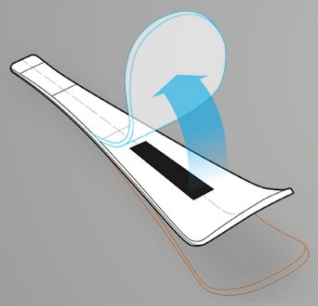
Rigide en traction

24

Le résultat

TECHNOLOGY

CARBON STEERING CONTROL



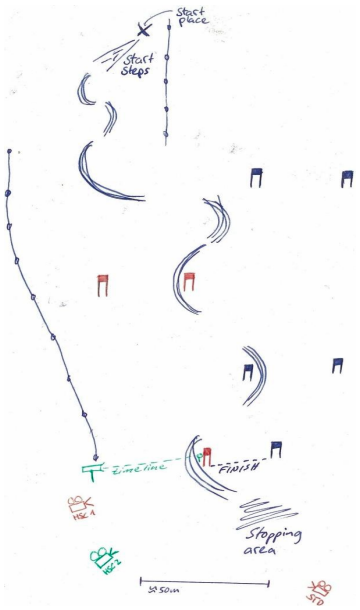
CSC Technology was successfully used in the Alpine Skiing World Cup. The carbon laminate visibly recognizable in the window is glue-laminated as appropriate for each end point. In the flex line, the carbon laminate flexes ideally so that the ski loses none of its perfect tuning. On strong impacts, the carbon laminate comes under tension through its specialized glue laminate at the ends, which results in less flattening out on the snow.

BENEFITS

- Perfect control, even in difficult conditions

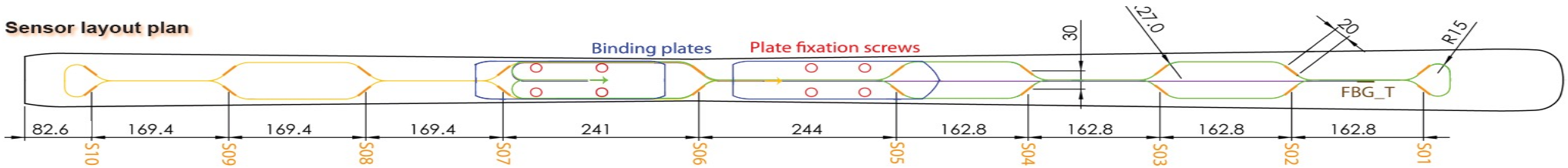
Tests sur neige

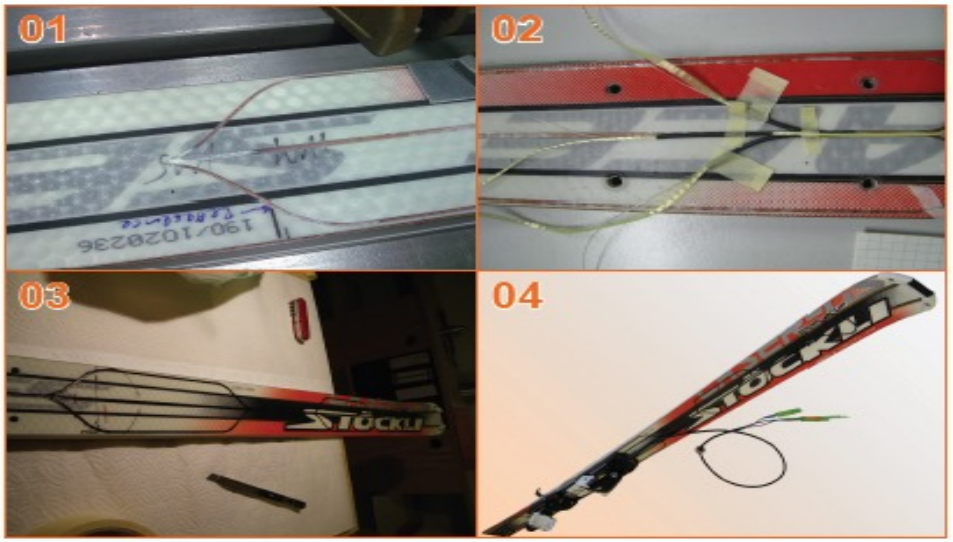
Finalement, on teste les skis pour vérifier les propriétés et le plaisir des skieurs (ou la performance!), comment obtenir plus que des données subjectives…



Master project S. Vogel

Instrumentation avec des fibres optiques pour tests sur neige





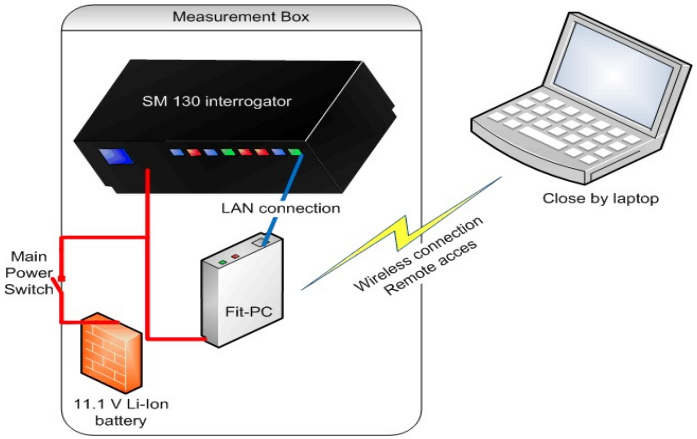
(01) A grove for the optical fiber integration is machined according the sensor layout plan.

(02) The fibers containing the FBG are bonded in the groves.

(03) All fibers are protected and sealed by adhesive (Sikaflex-252).

(04) The finished ski containing 25 FBG within 3 optical fibers.

Instrumentation avec des fibres optiques pour tests sur neige



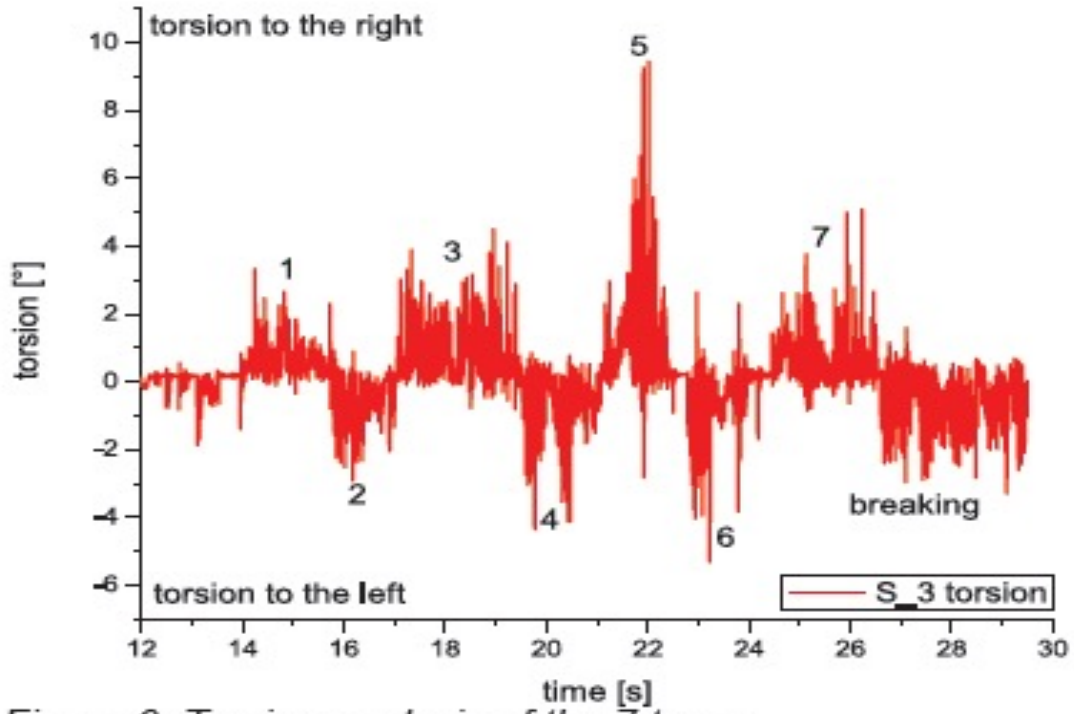


Figure 6: Torsion analysis of the 7 turns

Les slides sur le ski ne sont pas à savoir pour l'examen!

Examen

Mercredi 22 janvier

15h15 – 18h15

(Je vous enverrai un email avec la répartition dans les salles. Ces listes seront aussi affichées sur les portes le jour de l'examen)

Consignes:

- N'oubliez pas votre carte d'étudiant (ou en tout cas une pièce d'identité)
- Vous n'aurez droit à aucune documentation. Vous disposerez des formulaires (qui sont sur Moodle) qui seront remis en dernière page des questions (et que vous pourrez par commodité détacher).
- Vous aurez droit à une calculatrice non programmable (mode examen ok).
- Seules les réponses développées et écrites sur le questionnaire seront corrigées et compteront pour la note.
- Des feuilles de brouillon à la fin du questionnaire seront à votre disposition pour faire des calculs provisoires. Vous laisserez les feuilles de brouillon attachées au questionnaire.
- Les réponses devront être écrites LISIBLEMENT A L'ENCRE (stylo-bille, feutre ou plume, les réponses au crayon sont considérées comme nulles).
- Munissez-vous d'une REGLE pour les traits de construction dans un graphique.
- Lisez attentivement les questions !

Remerciements

- les **assistants** (Jeroen, Vincent, Nour, Laurène, Léa, Ilse, Jean-Baptiste, Brian, Michele, Inyoung, Anna, Marie) et **assistants-étudiants** (Katharina, Maxime, Nils, Melchior, Karl, Eliott, Lucas, Luca, Quentin, Guilhem, Leo, Inès, Hippolyte, Tanguy, Pierre, Rami, Léopold, Antoine, Thibault, Zina, Corentin) qui vous ont aidé à digérer le cours…
- **vous, étudiantes et étudiants**, pour votre assiduité même dans des conditions pas toujours idéales, votre intérêt et votre collaboration.

Bon examen (le 22 janvier à 15h15)

Séance questions en janvier, si vous le désirez, à organiser avec les délégués. Il y a aussi le forum Ed Discussion!

Merci!

Bonnes fêtes!