

Introduction

**Modélisation et simulation
par éléments finis**

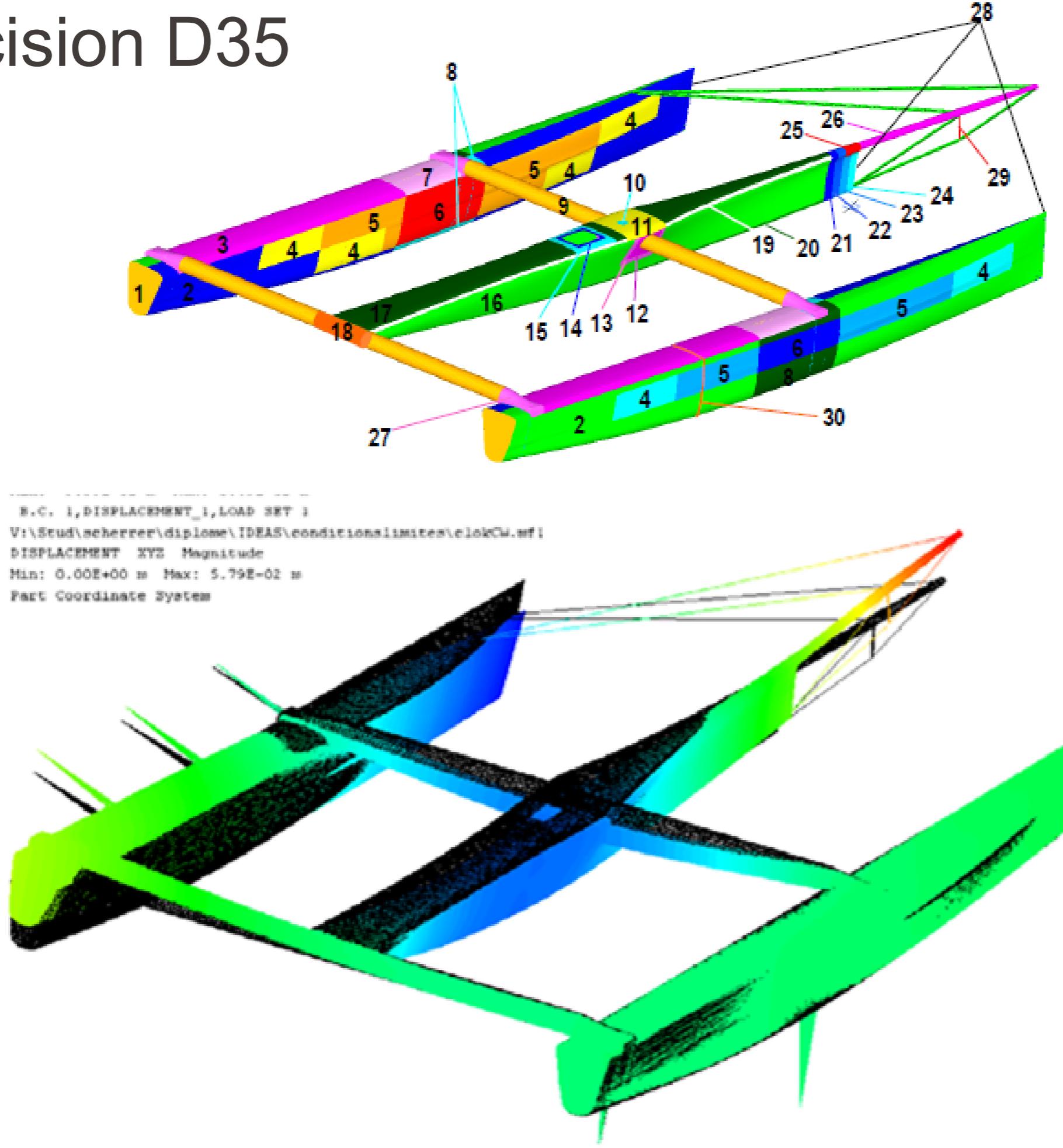
Modélisation et simulation

- Avantages :
 - Peut traiter des géométries complexes (impossible analytiquement).
 - Utile quand les expériences sont impossibles, chères, dangereuses, trop longues etc.
 - Information « complète » (résolue en temps / espace).
- Inconvénient / risque : peut facilement obtenir des résultats plaisants mais faux → importance de comprendre la méthodologie, justifier les hypothèses de modélisation, vérifier la convergence, etc.
- Pas un substitut à la théorie et aux expériences, mais un outil complémentaire.

Simulations EF : exemples

- Décision D35

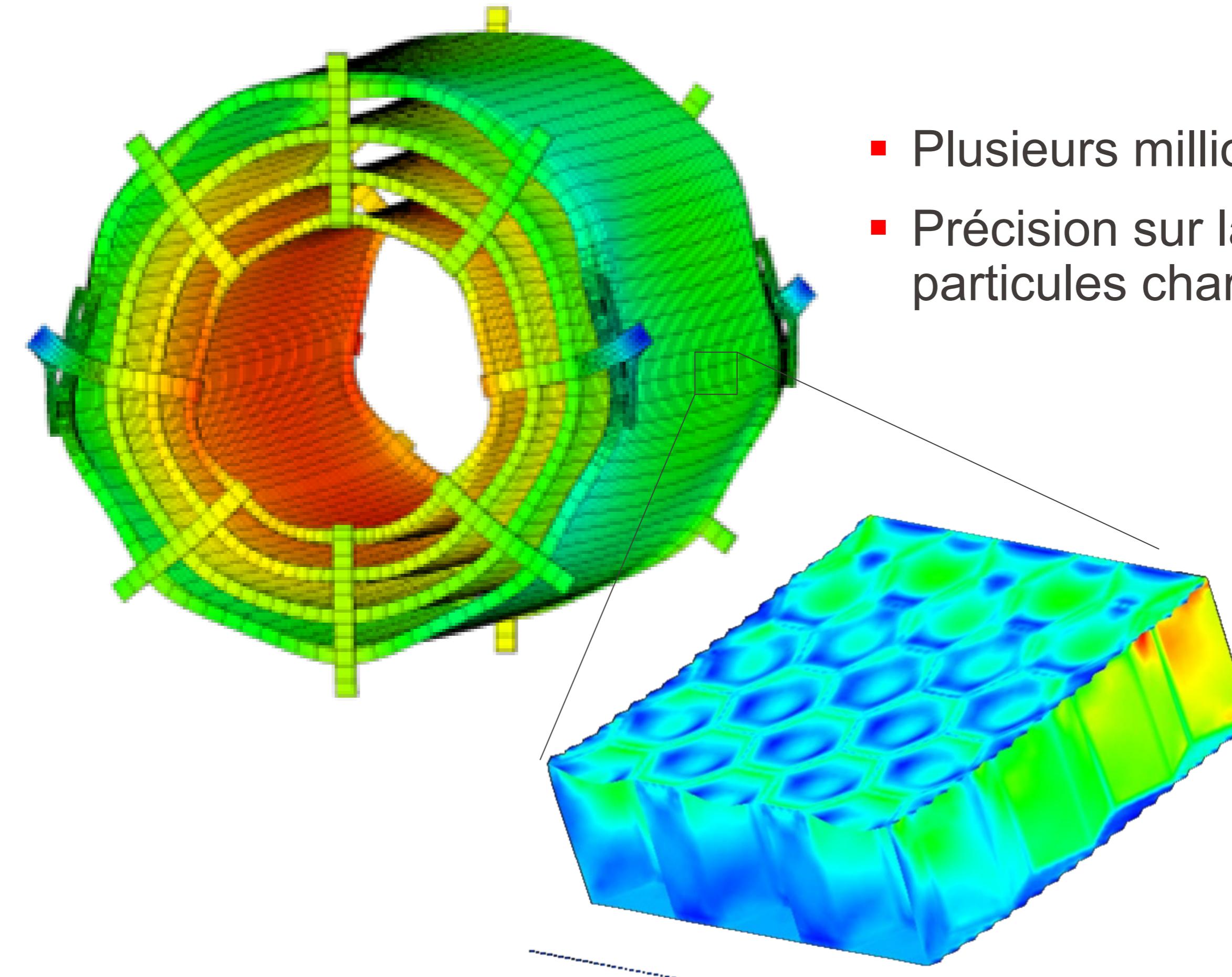
Modélisation et simulation par éléments finis



Simulations EF : exemples

- CERN, LHC, ATLAS, détecteur SCT (semi-conductor tracker)

Modélisation et simulation par éléments finis

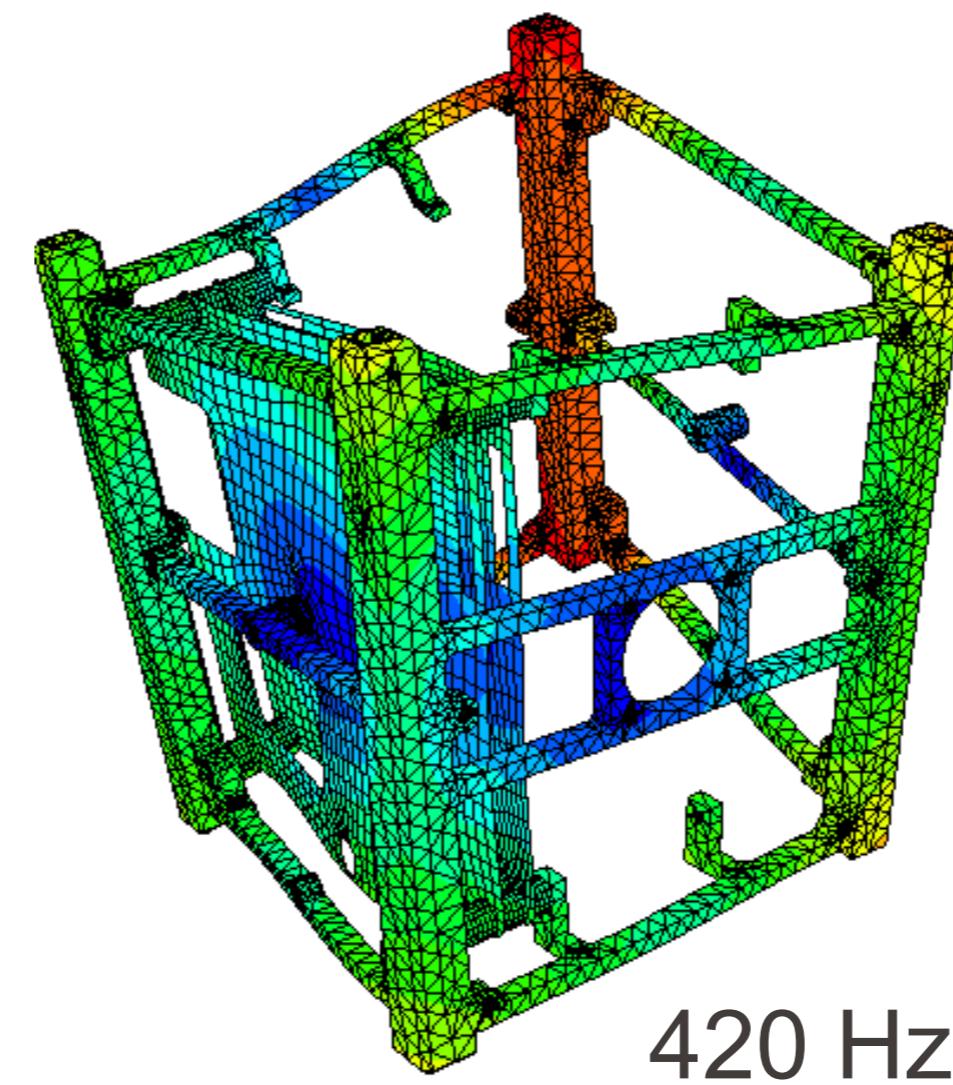
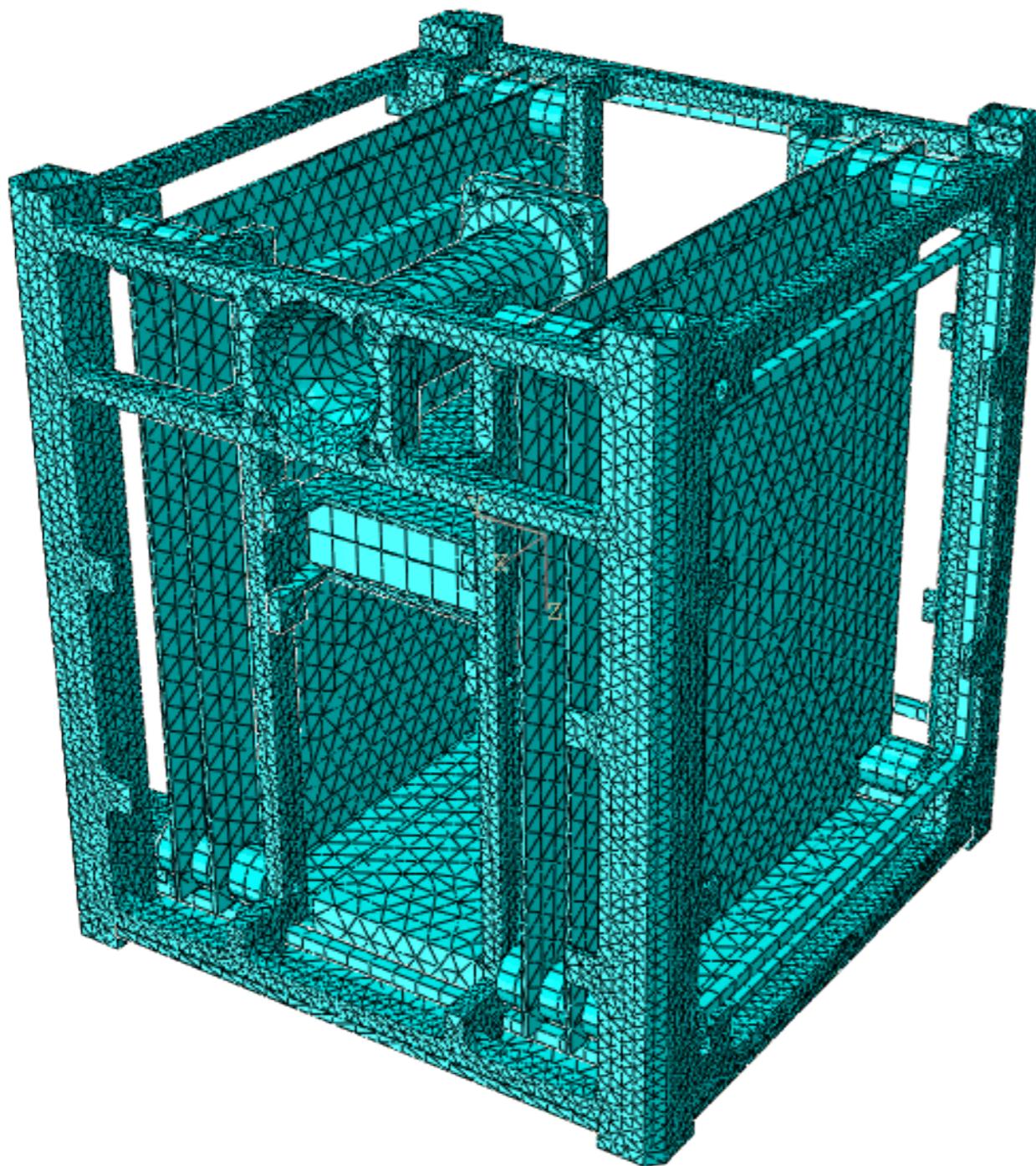


- Plusieurs millions de capteurs.
- Précision sur la position de particules chargées : $O(10 \mu\text{m})$.

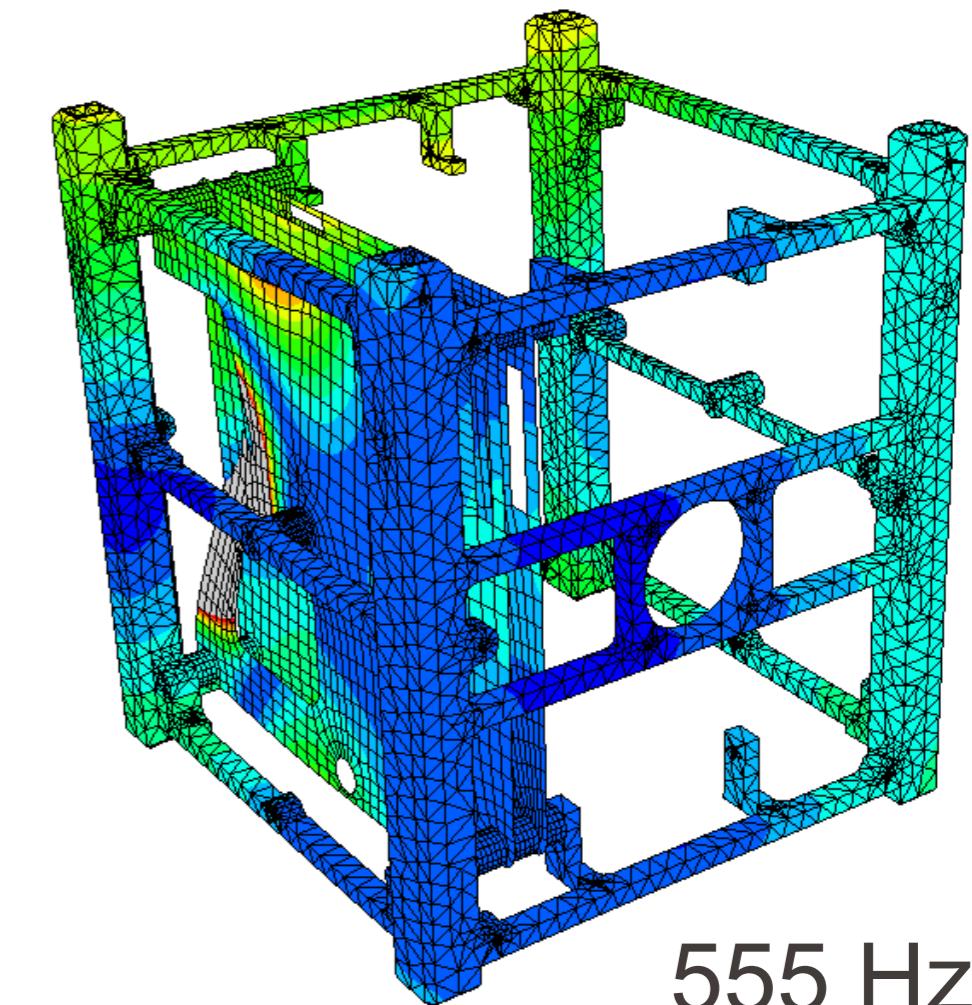
Simulations EF : exemples

- Projet SwissCube (pico satellite 1 dm³)

Modélisation et simulation par éléments finis



420 Hz

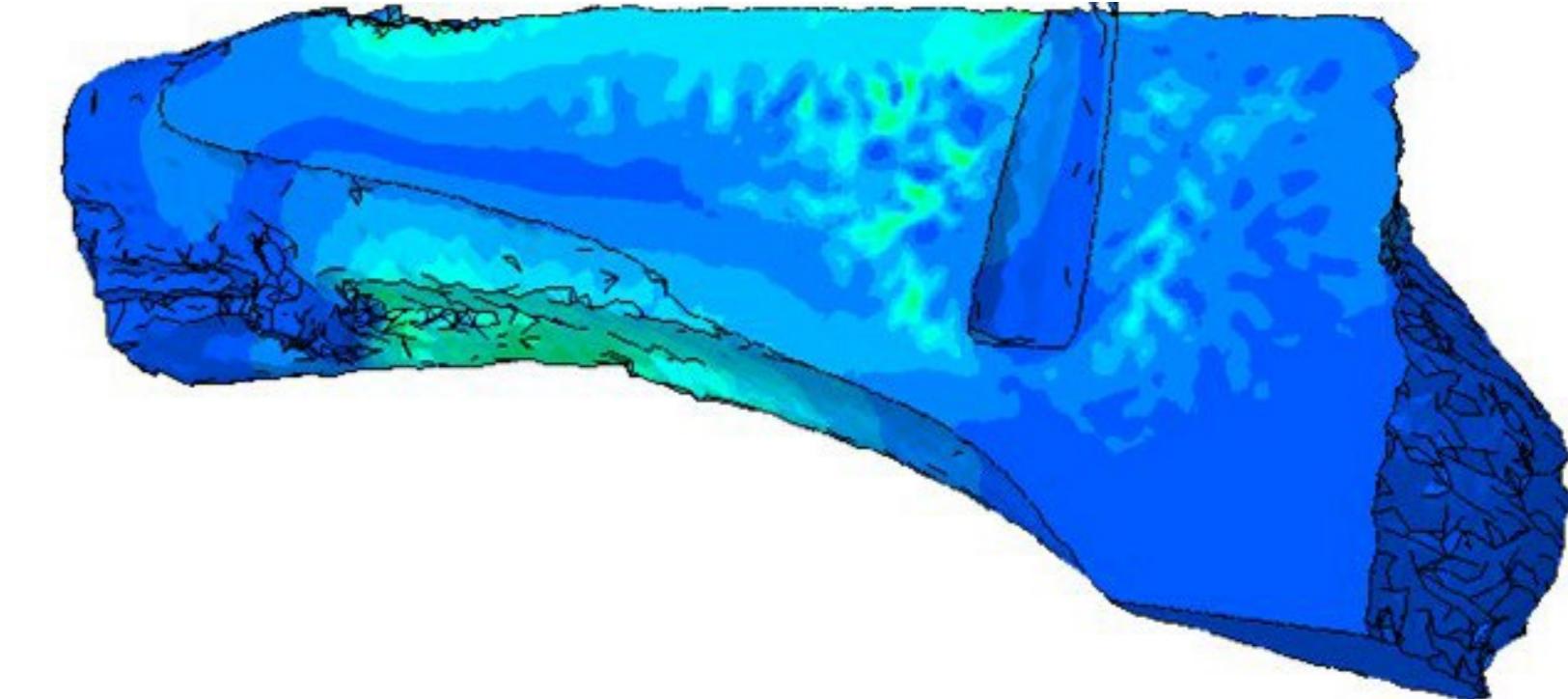
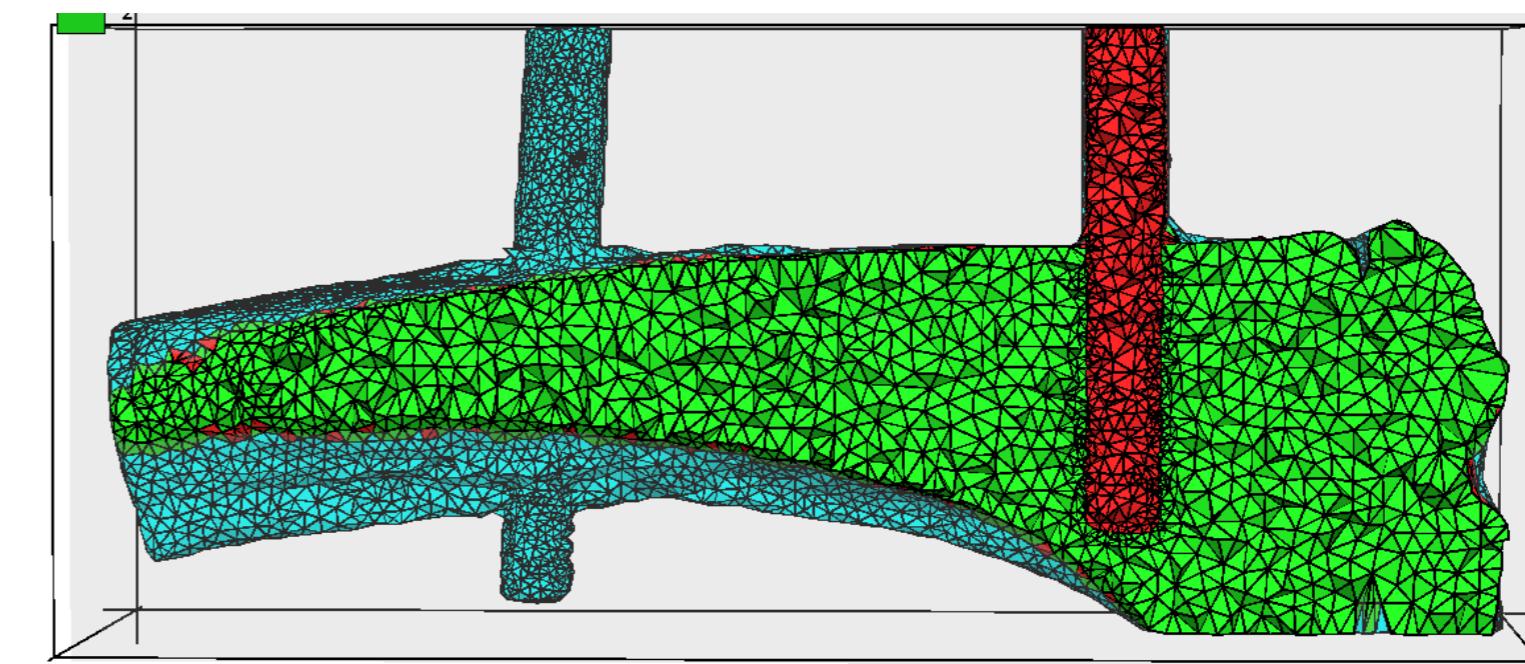
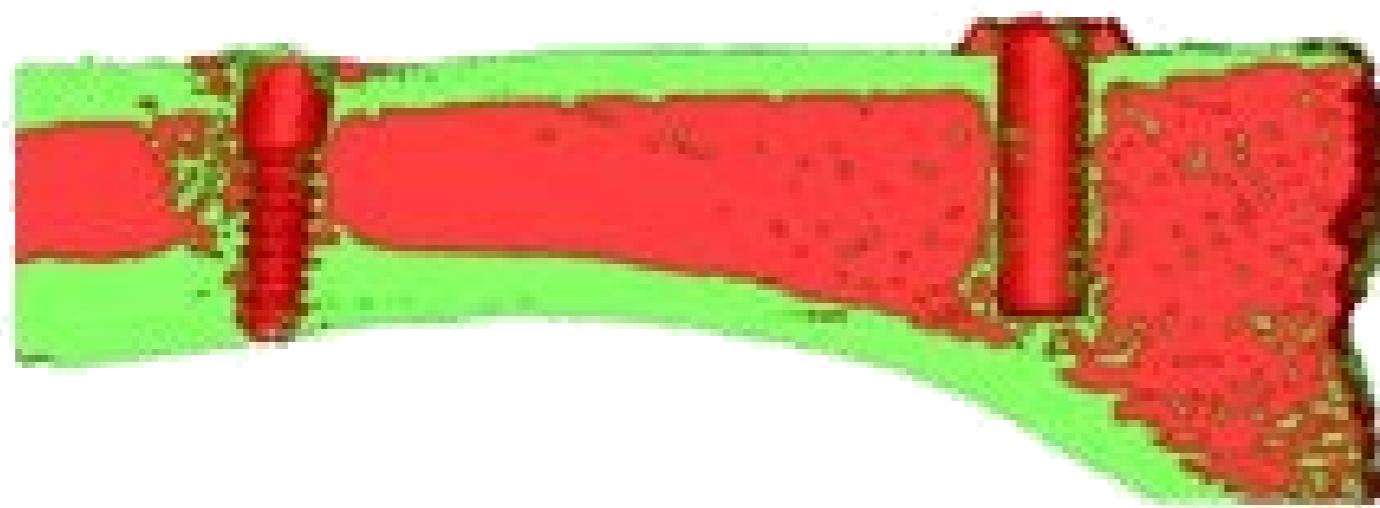
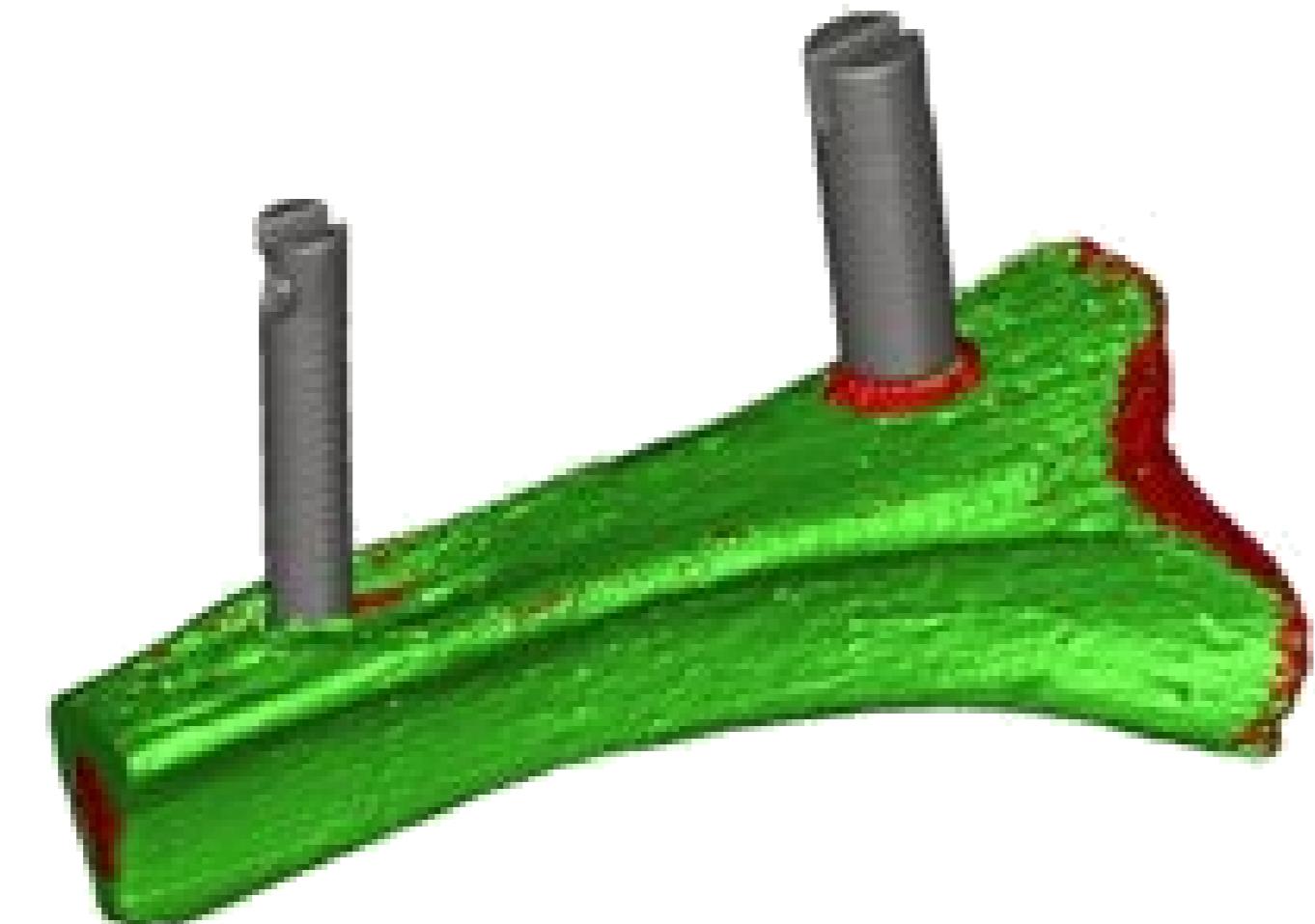


555 Hz

Simulations EF : exemples

- Biomécanique

Modélisation et simulation par éléments finis



Objectifs du cours

- Acquérir la **méthodologie** et les **bases techniques** pour réaliser des études par éléments finis de problèmes concrets de mécanique des solides / structures.
- Au travers d'exercices pratiques, développer une **vision critique** des possibilités / limitations des méthodes numériques et des logiciels existants.

Acquis d'apprentissage

A la fin du cours, vous devrez être capable de :

- Appliquer une méthodologie de modélisation rigoureuse à un problème concret, défini à partir d'un cahier des charges.
- Réaliser une analyse par EF à l'aide du logiciel Abaqus, et rédiger un rapport d'étude complet.
- Expliquer les grands principes de la modélisation par EF en élasticité linéaire, et justifier les choix de modélisation réalisés (type d'éléments, conditions limites, modèles de matériau, critères, etc).

Evaluation

- Evaluation sur la base du rapport de mini-projet portant sur la réalisation d'une étude EF complète, rigoureuse et critique d'un problème choisi.

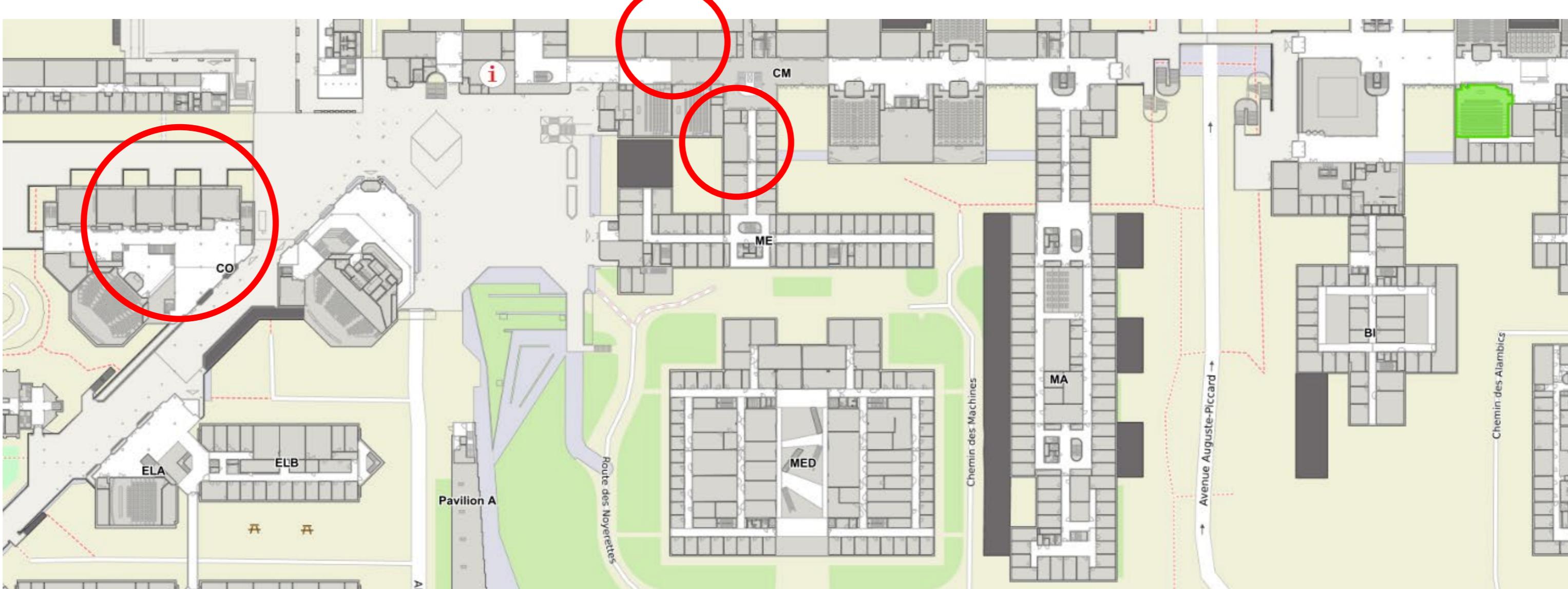
Organisation

- Prérequis : connaissance des méthodes de discréétisation, par ex. ME-372 Méthode des Eléments Finis (F. Gallaire)
- Approche du cours :
 - Théorie et exercices entremêlés
 - Apprendre à utiliser un logiciel EF : Abaqus
 - Application à des cas « concrets »
 - Préparation aux projets / études industrielles : méthode & sens critique
- Support de cours / exos / tutoriels etc : Moodle
<http://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=13949>

Organisation

- Cours (11h15-...) en CE 1 2
- Exercices et mini-projet (...-14h) en salles info :
 - CO 260 (40 postes)
 - CM 1 110 (21 postes)
 - CM 1 112 (36 postes)

Modélisation et simulation par éléments finis



Organisation

- Logiciel : Abaqus (90 licences)
- Possibilité d'utiliser Abaqus à distance via VDI (Virtual Desktop Infrastructure), machine virtuelle "STI-Windows 10" (cf Moodle).
- Assistants : Arthur Simon, Gaïane Fromage, Thibault Andriot, Thomas Lepère, Thomas Roulet.
- Enseignement partagé avec Stefano Burzio (SGM).

Planning indicatif 2025

Légende

1 Introduction théorique

2 Techniques de modélisation

3 Etudes de cas

Semaine	Date	Phase	Cours	Exercice / tutoriel
1	19.02.25	1	Plan du cours + intro théorique EF élasticité lin. statique (forme forte / faible, Galerkin, discrétisation, localisation, fcts de forme, intégr. num., matrices élém. et assemblage, conditions limites)	Introduction à Abaqus : tutoriel
2	26.02.25	1	+ Méthodologie de modélisation EF (check list / rapport)	Introduction à Abaqus : Exo 1 poutre
3	05.03.25	1		Introduction à Abaqus : Exo 2 piston / unités
4	12.03.25	2	Modélisation / famille d'éléments finis / ordre / convergence...	Exo 3 : un problème, plusieurs modélisations
5	19.03.25	2		Exo 4 : analyse de convergence (nb elem, ordre, integration)
6	26.03.25	2	Modélisation géométrique : CAD & techniques de maillage	Exo 5 : mailler plusieurs types de geom (struct, sweep, free, bias)
7	02.04.25	2	Modélisation physique : CL "simples", symétries	Exo 6 : symétries et conditions limites
8	09.04.25	2	Modélisation physique : CL "complexes", couplages cinématiques, post-traitement et analyse	Tutoriels assemblages et post-traitement
9	16.04.25	3	Composites	Exo 7 : composite multicouche
-	23.04.25	-	Vacances	-
10	30.04.25	3	Méthodologie Critères de rupture	Exo 8 : réalisation d'une étude complète
11	07.05.25	3	Analyse modale et flambage	Tutoriel analyse modale
12	14.05.25	3	Correction Exo 8, questions / réponses	Exo 9 : étude de cas
13	21.05.25	3	Thermo-mécanique	Finir Exo 9
14	28.05.25	-	Questions / réponses, finir le projet	Questions / réponse, finir le projet

Mini-projet

- Objectif : **mettre en pratique** le contenu du cours de manière autonome.
- Organisation :
 - **Déroulement en parallèle du cours.**
 - Travail par **groupes de 3** personnes.
 - **Liste étudiants et inscription des groupes** sur Moodle.
- Démarche :
 - **Identifier un problème** à étudier et le documenter.
 - Rédiger un **cahier des charges** d'étude → feedback (pas noté).
 - **Modélisation et simulation** par EF.
 - Analyse, discussion, rédaction du **rapport** d'étude → évaluation finale.

Mini-projet : règles

- Le projet doit représenter **environ 30 heures de travail effectif par personne**, hors heures de contact.
- **Evaluation** sur la base du **rappor**t de projet.
- **Travail réparti équitablement** dans le groupe, **évaluation commune**.
- Documentation : utilisation possible de toutes les ressources documentaires, y compris web, mais les sources doivent être citées. Pas de plagiat !
- Sujet peut être en relation avec un loisir ou un autre cours / projet.
- « Heure de projet » : contact pour questions / réponses, reste du travail en dehors des heures de cours.

Mini-projet : planning indicatif

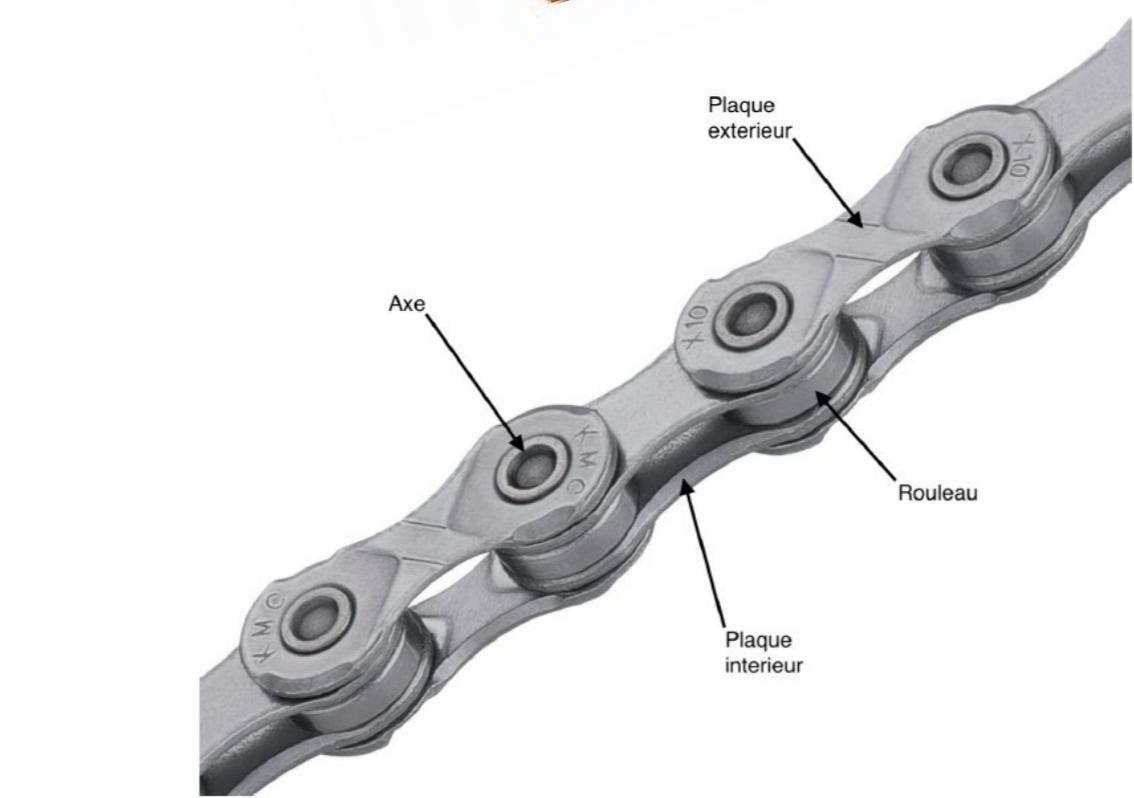
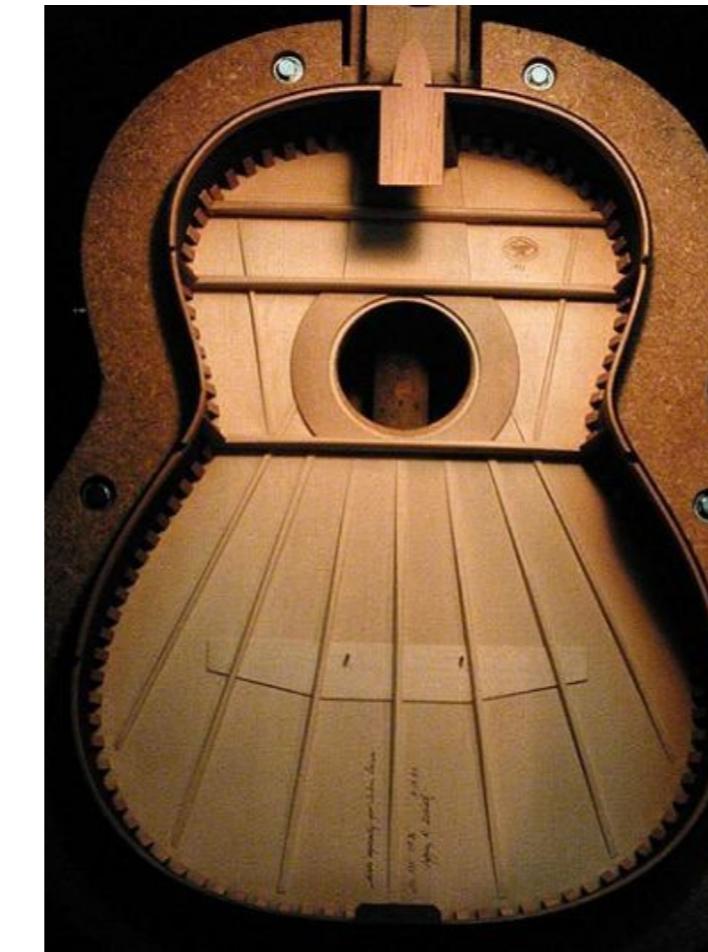
Semaine	Date	Phase	Mini-projet
1	19.02.25	1	Définition des objectifs & règles
2	26.02.25	1	Choix sujet / création des groupes / documentation
3	05.03.25	1	Rédaction d'un cahier des charges d'étude
4	12.03.25	2	Rendu du cahier des charges (2-3 slides)
5	19.03.25	2	Modélisation géométrique (Catia ou Abaqus)
6	26.03.25	2	
7	02.04.25	2	
8	09.04.25	2	
9	16.04.25	3	Modélisation éléments finis
-	23.04.25	-	
10	30.04.25	3	
11	07.05.25	3	Post-traitement et analyse
12	14.05.25	3	Analyse et discussion / conclusion
13	21.05.25	3	Rédaction du rapport d'étude
14	28.05.25	-	Rendu du rapport d'étude mini-projet

Légende

Mini-projet : travail
Mini-projet : rendu

Mini-projet : exemples passés

Modélisation et simulation par éléments finis



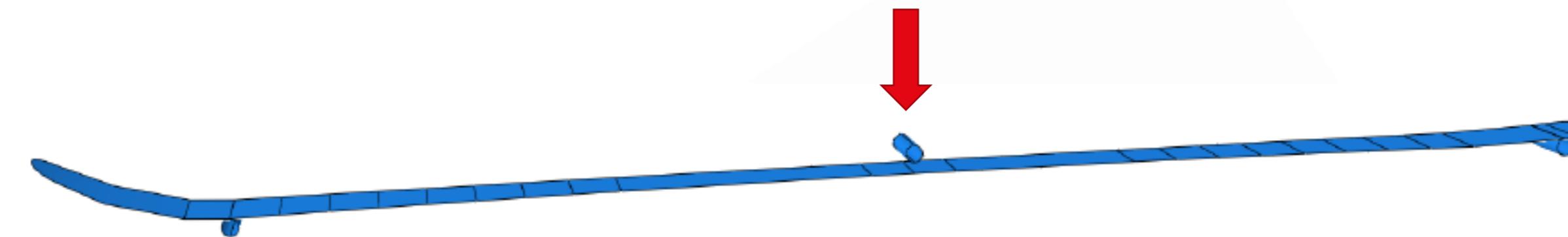
Mini-projet : critères de sélection du sujet

- Réaliser une étude complète d'un système mécanique **de votre choix**.
- Doit correspondre à une analyse en **statique linéaire (élastique, c.à.d. petites déformations)**.
- Pas de **dynamique**, pas de **choc**, pas de **contact glissant / unilatéral**, pas de **grandes déformations**, pas de **plasticité** !

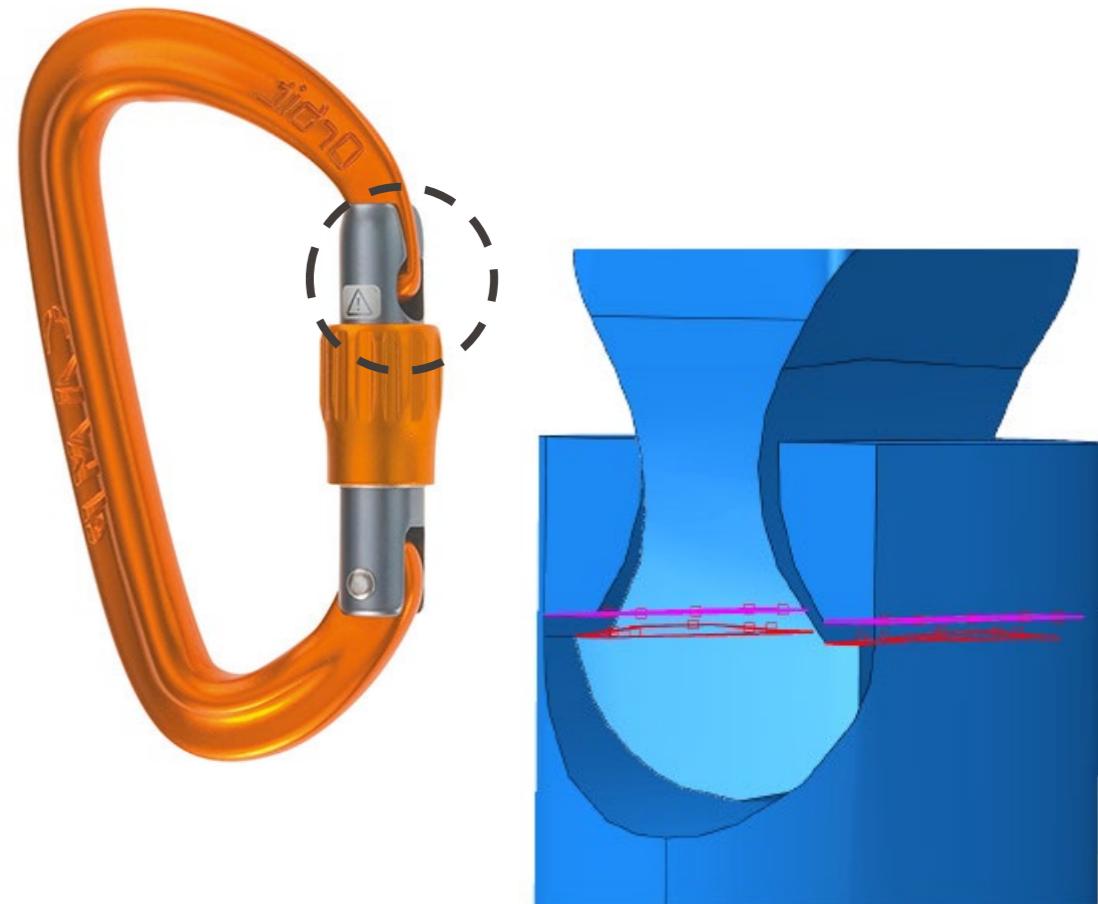
Modélisation et simulation par éléments finis



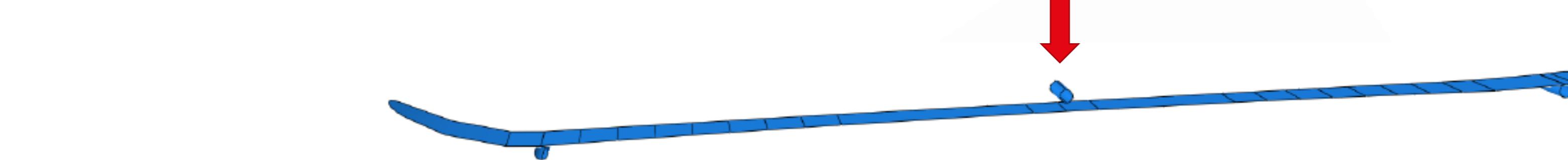
Crash test : dynamique



Test de flexion :
glissement ski/vérin
et ski/rouleaux



Test de traction
mousqueton : contact
unilatéral doigt/corps



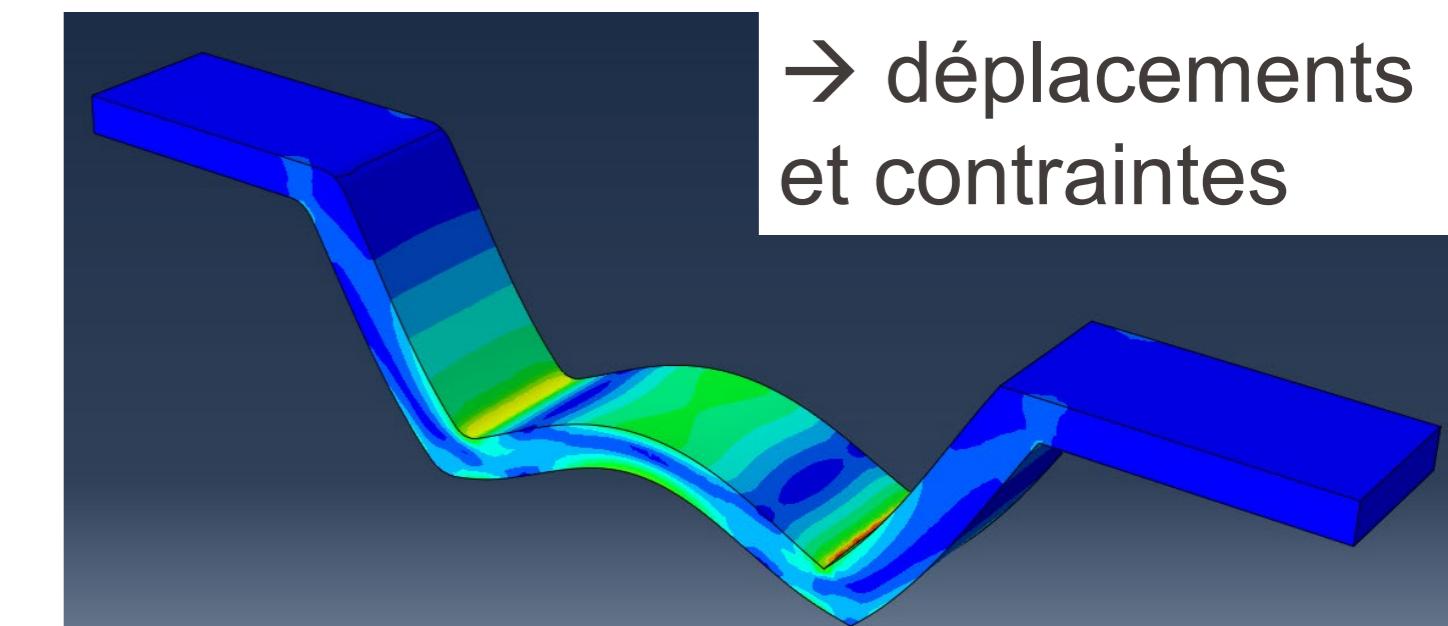
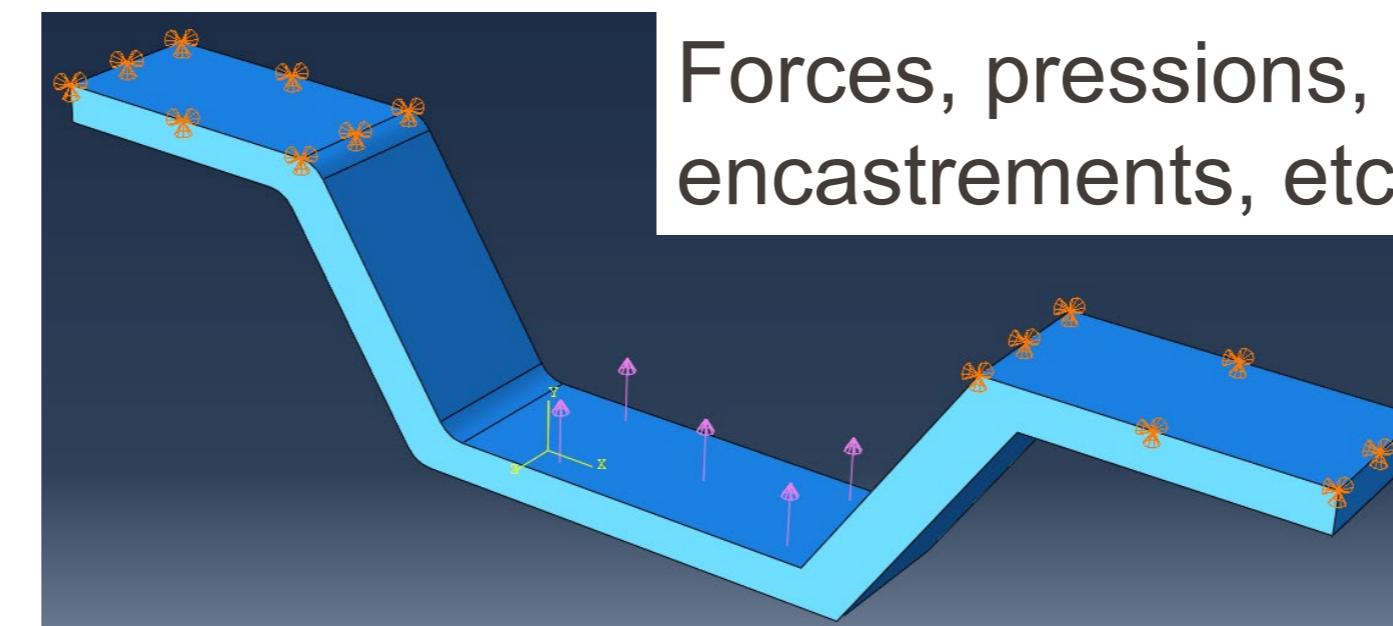
Mini-projet : critères de sélection du sujet

- Analyse d'une **pièce unique** ou d'un **assemblage de 3-4 pièces max.**
- Il faut connaître ou pouvoir estimer :
 - les données techniques (matériaux, spécifications),
 - les grandes lignes de la géométrie (plans, esquisses, dimensions générales),
 - les chargements (directions / amplitudes des forces ? zones encastrées ?...).
- **1 cas d'étude par membre** du groupe. Par exemple :
 - chargements suffisamment différents,
 - géométries suffisamment différentes,
 - différents types d'analyse (statique pure, analyse modale ou flambage, analyse thermo-mécanique).

Différents types d'analyse

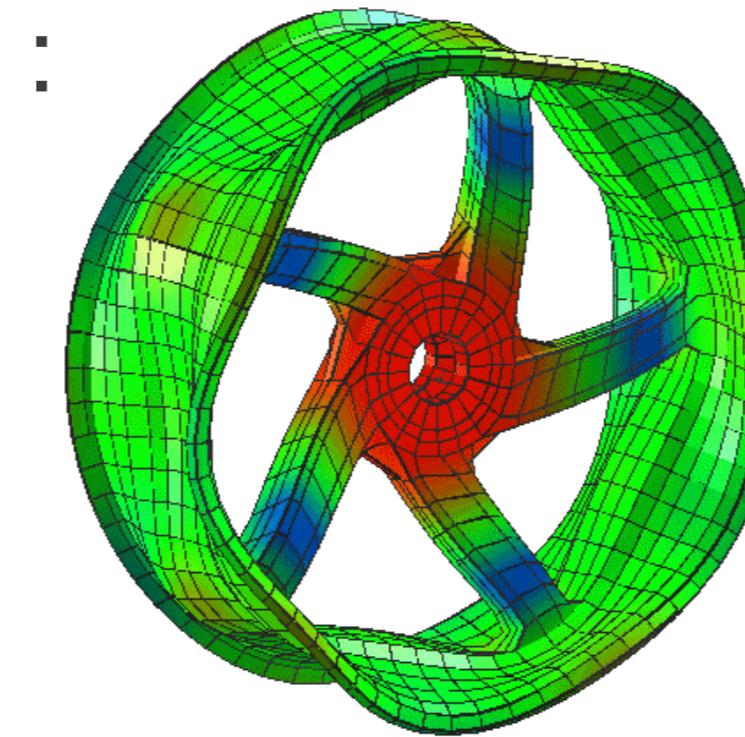
Modélisation et simulation par éléments finis

- Mécanique
 - Statique



- Analyse modale :
« vibrations libres »,
sans forçage

→ modes propres
(forme + fréquence)



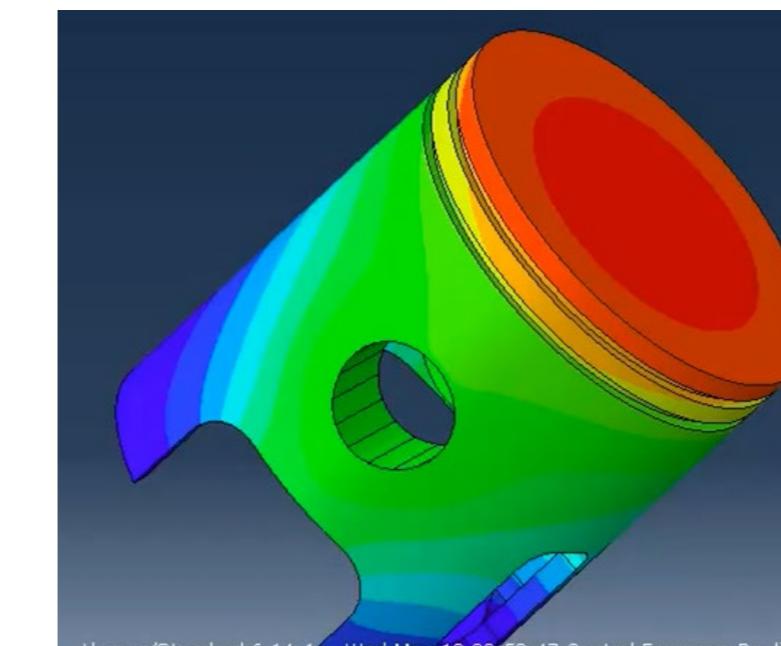
- Flambage :
instabilité élastique

→ amplitude critique
+ forme du mode



- Thermique ou
thermo-mécanique

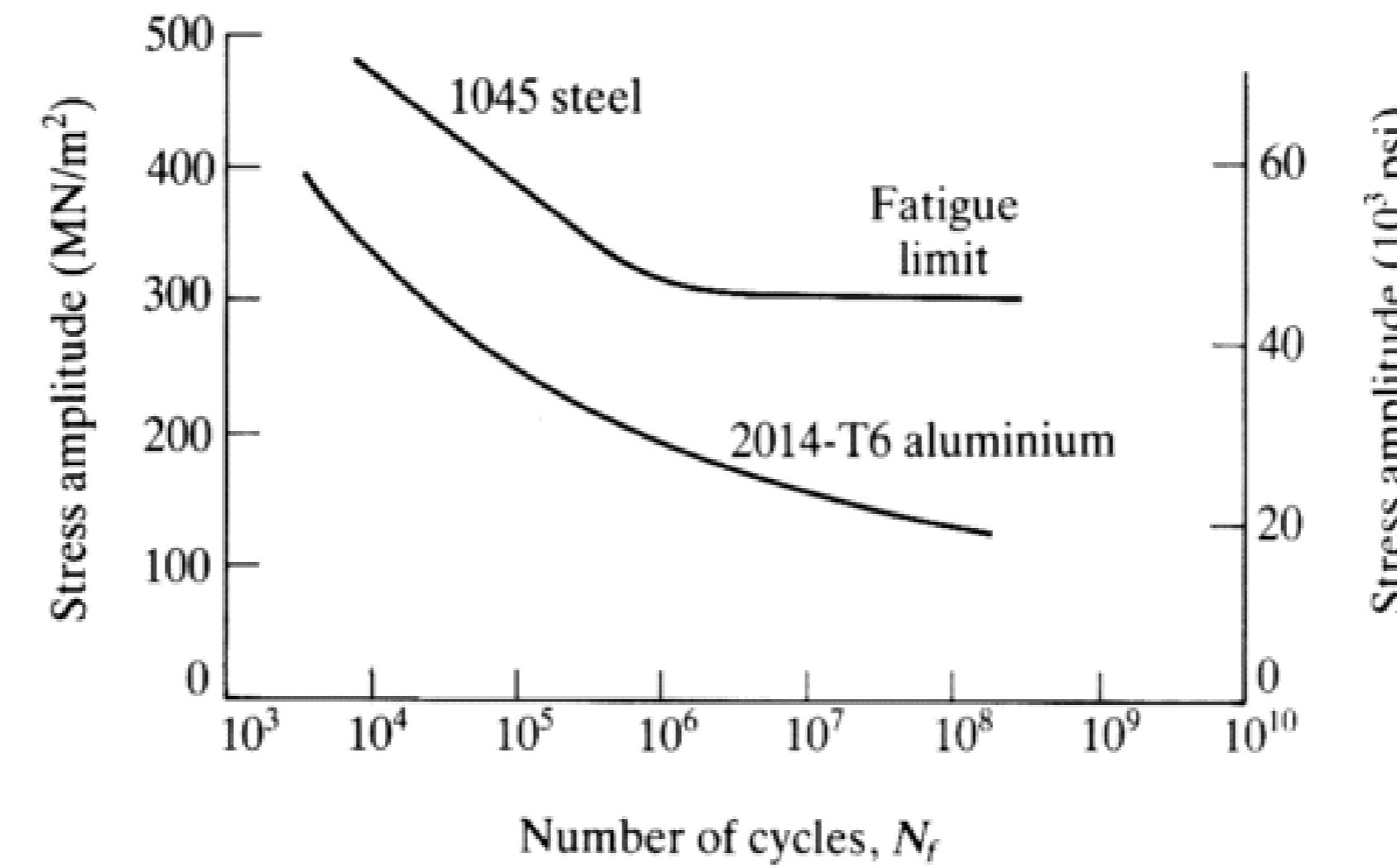
Chargement
mécanique
+ thermique



→ déplacements et
contraintes + température
et flux de chaleur

Différents types d'analyse

- Remarque : l'analyse en **fatigue** peut-être faite à partir des résultats d'une **unique simulation statique** (courbe S-N) → ce n'est pas un cas d'étude à part entière.



Références

- Matériel du cours : Moodle
- Documentation Abaqus
- Livres :
 - *Méthode des éléments finis en mécanique des structures*, T. Gmür, PPUR, collection enseignement
 - *Dynamique des structures : Analyse modale numérique des systèmes mécaniques*, T. Gmür, PPUR, collection enseignement
 - *Finite Element Method: A Practical Course*, G.R. Liu, livre online sur <http://library.epfl.ch> (*)
 - *Finite Element Method*, vol. 1–3, Zienkiewicz, Taylor, livre online sur <http://library.epfl.ch> (*)