

Université
numérique

FONDATION
UNIT

IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

IMT Mines Albi-Carmaux
École Mines-Télécom

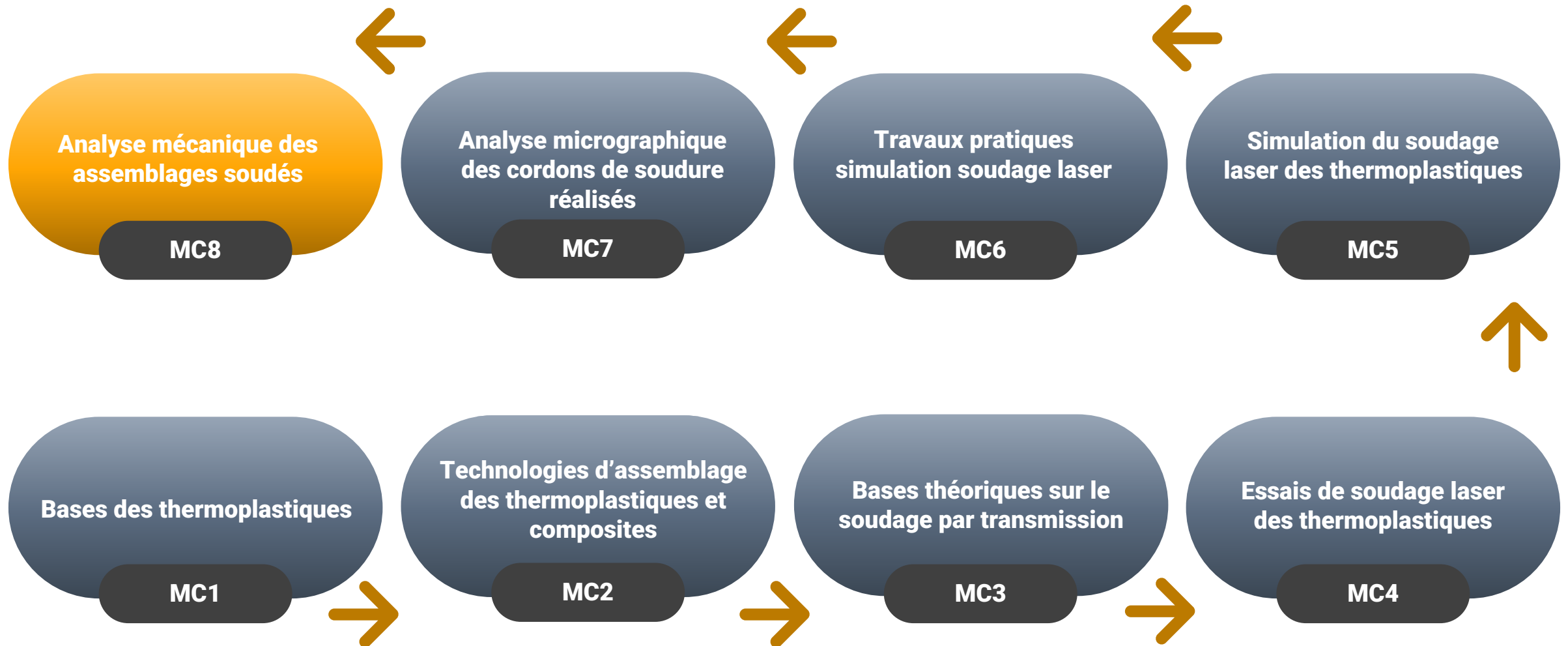
INP
TOULOUSE

ENIT
ÉCOLE
NATIONALE
D'INGÉNIEURS
DE TARBES

Technologie d'Assemblage des Thermoplastiques par laser

Micro-Contenus (MC)

Technologie d'Assemblage des Thermoplastiques par Laser



Objectif pédagogique final

MC8

**Acquérir les notions théoriques et expérimentales
sur la tenue interfaciale des assemblages soudés
des composites thermoplastiques**

Introduction générale

MC8 : Analyse mécanique des assemblages soudés

Module 6 Evaluation

Module 5 Conclusion générale

Module 4 Relation entre tenue interfaciale et paramètres-procédés

Module 3 Tenue mécanique des assemblages soudés

Module 2 Rupture des assemblages

Module 1 Introduction générale

A la fin de ce micro-contenu, vous **serez capable** de :

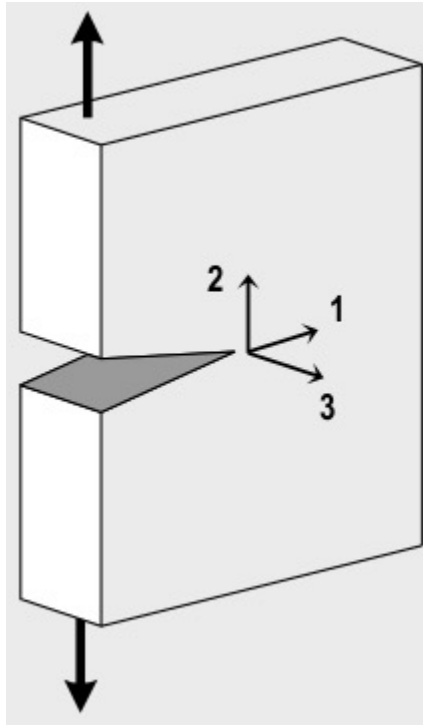
- Identifier** les différents modes de rupture
- Identifier** les types de rupture des assemblages thermoplastiques soudés
- Définir** le taux de restitution d'énergie G
- Réaliser** des essais pour l'évaluation de la tenue mécanique des assemblages thermoplastiques
- Calculer** les grandeurs relatives aux tenues mécaniques des assemblages thermoplastiques

Rupture des assemblages soudés

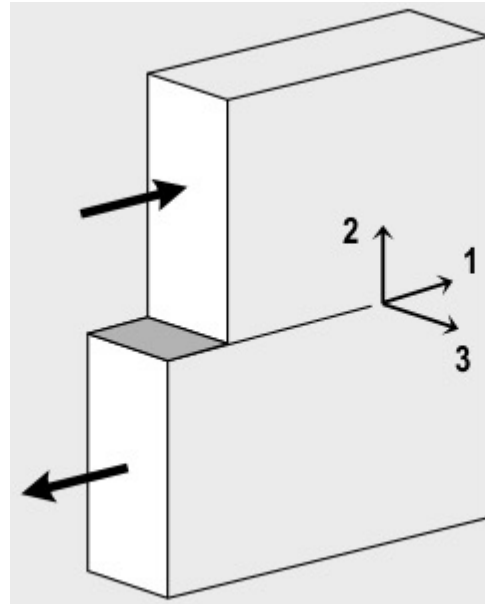
Les différents modes de ruptures

La rupture d'un assemblage est dépendante de la sollicitation qui lui est appliquée.

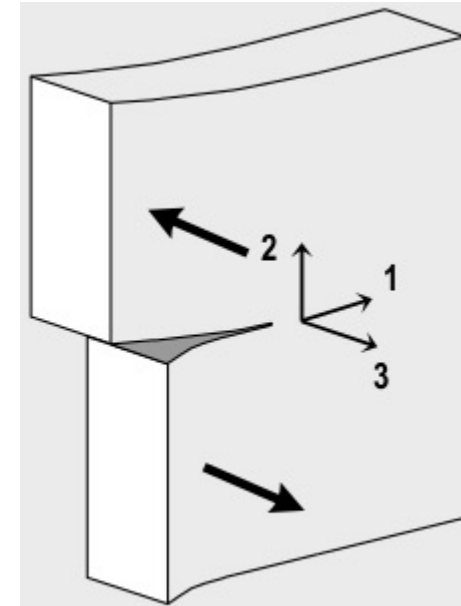
3 modes d'ouverture indépendants existent en mécanique de la rupture :



Mode I
Mode d'ouverture



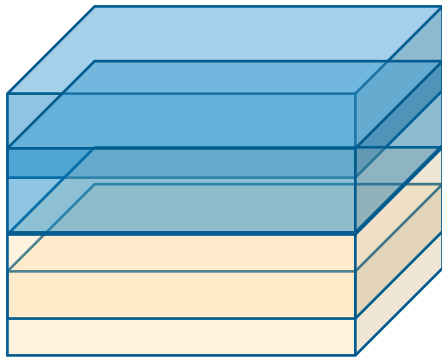
Mode II
Mode de cisaillement plan



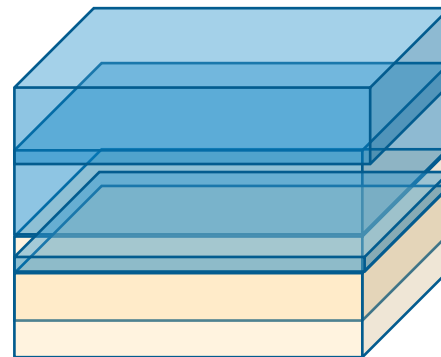
Mode III
Mode de cisaillement antiplan

La phénoménologie associée à la rupture des assemblages

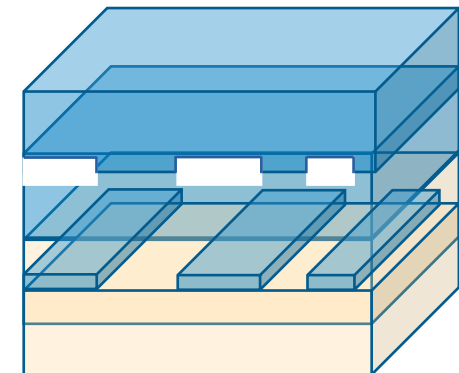
La rupture d'un assemblage thermoplastique ou composite à matrice thermoplastique peut se faire selon **3 modes** :



Rupture à l'interface
Absence du substrat
supérieur sur le faciès du
substrat inférieur

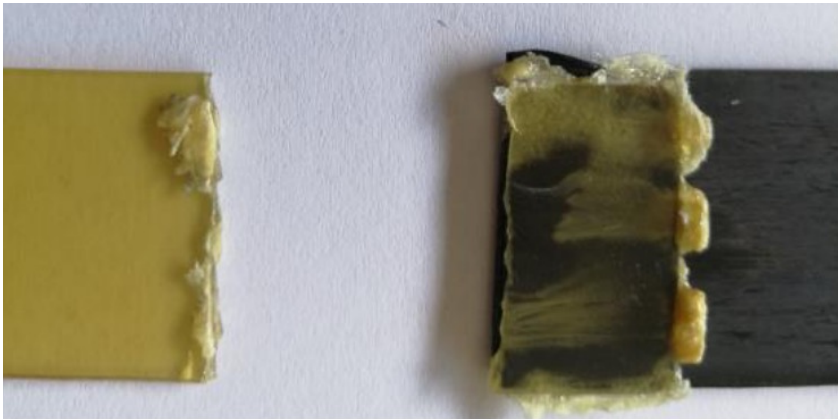
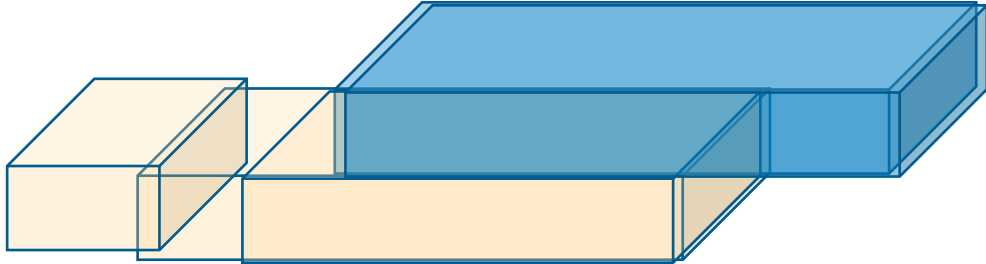


**Rupture « cohésive » dans le
substrat**
« parallèlement » à la surface
assemblée



Rupture mixte
Combinaison des 2 modes

La phénoménologie associée à la rupture des assemblages : **rupture d'un substrat**



Rupture d'un substrat **hors zone d'assemblage**

⇒ **Résistance** de la soudure > Résistance du substrat

⇒ Soudage de qualité souhaitée

⇒ Ne donne **pas de quantification** de la résistance de la soudure

Les grandeurs physiques associées à la rupture des assemblages

- **Critère de contrainte maximale** : Contrainte la plus importante obtenue lors de la rupture de l'assemblage
- **Taux de restitution d'énergie G** (Griffith 1920) : Energie nécessaire pour l'avancement d'une fissure
 - ⇒ Principe de **conservation d'énergie totale respecté** lors du processus de propagation

Taux de restitution d'énergie G

$G = -\frac{\partial P}{\partial S}$

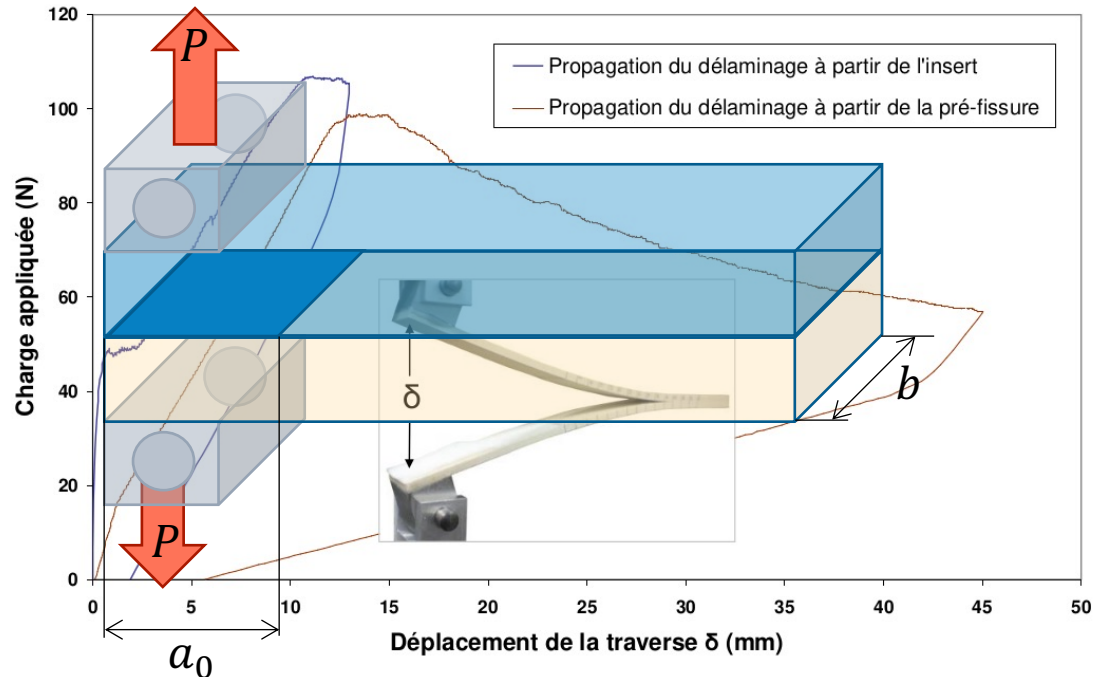
Taux de restitution d'énergie (J/m^2) →

Incrément de l'énergie potentielle stockée dans la structure ←

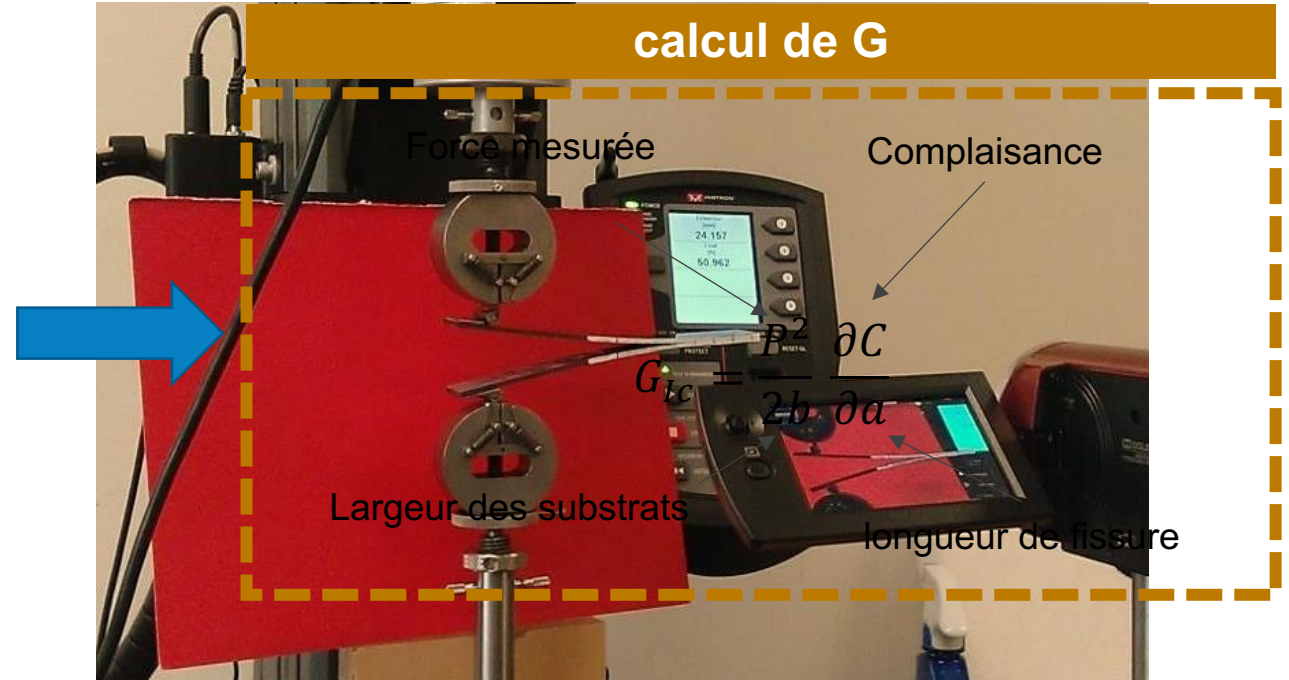
Incrément de surface due à la propagation de fissure →

Tenue mécanique des assemblages soudés

Essais mécaniques en mode I : l'essai Double Cantilever Beam ou DCB



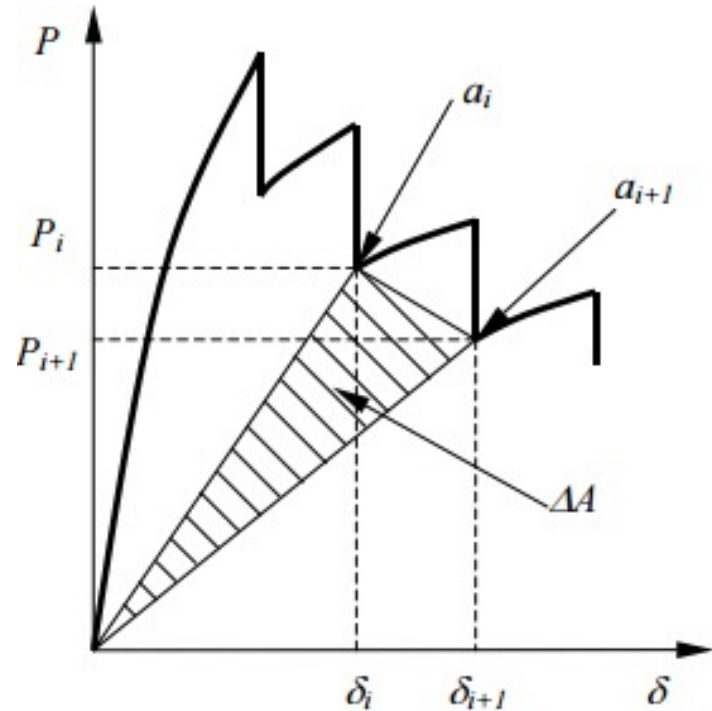
Courbe caractéristique de l'essai DCB
Représentation de l'essai DCB



Montage expérimental de l'essai DCB
[Beckelynck,2016]

- ⇒ Vérifier l'absence de plastification des renforts
- ⇒ Tracé des courbes expérimentales
- ⇒ Le calcul de G dépend des paramètres géométriques, du matériau et des mesures

Essais mécaniques en mode I : l'essai **Double Cantilever Beam** ou **DCB**



Méthode des surfaces : calcul de G

Forces relevées aux points i et i+1

Ouvertures au points i et i+1

$$G_{Ic} = \frac{(P_i \delta_{i+1} - P_{i+1} \delta_i)}{2b (a_{i+1} - a_i)}$$

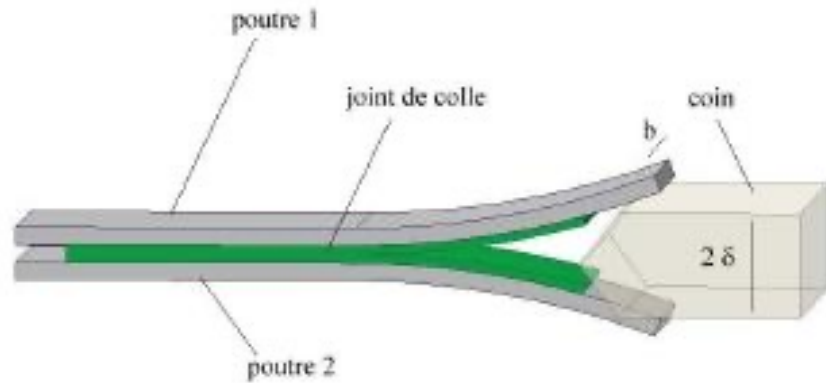
Largeur des substrats

avancée de fissure

Méthode des surfaces
[Ashemy, 1990]

- ⇒ Post-traitement relativement **rapide** des essais
- ⇒ Nécessité de **bien choisir** l'incrément $(\delta_{i+1} - \delta_i)$ pour éviter les fortes approximations sur G
- ⇒ Le calcul de G dépend des paramètres **géométriques**, du **matériau** et des **mesures**

Essais mécaniques en mode I : l'essai **Wedge test** ou **Clivage en coin**



Essai de clivage en coin
[Kheloufi]



Taux de restitution d'énergie **G**

Moment d'inertie des substrats

Module d'élasticité des substrats

Ouverture aux points de contact avec le coin

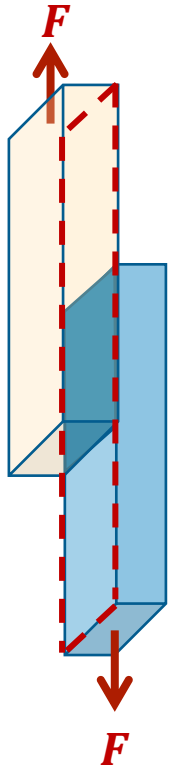
$$G = \frac{9 EI \Delta^2}{4b a^4}$$

Longueur de fissure

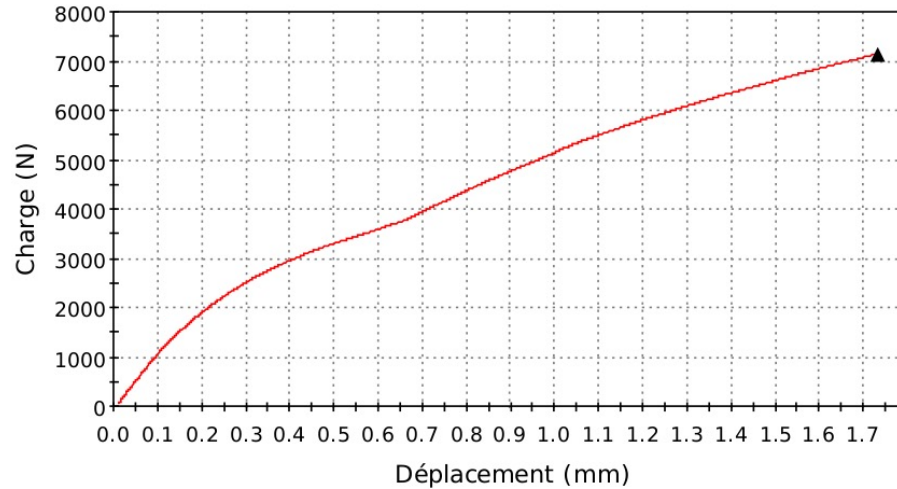
Largeur des substrats

- ⇒ Vérifier l'**absence de plastification** des renforts
- ⇒ Nécessité de **bien choisir** les paramètres **géométriques** et le **matériau** du coin
- ⇒ Le calcul de **G** dépend des paramètres **géométriques**, du **matériau** et des **mesures**

Essais mécaniques en mode II : l'essai **Single Lap Shear** ou **Cisaillement simple recouvrement**



Essai de cisaillement simple recouvrement



⇒ Détermination de F_{max}

⇒ Calcul du LSS



Lap Shear Strength

Résistance en cisaillement simple recouvrement

Force maximale appliquée

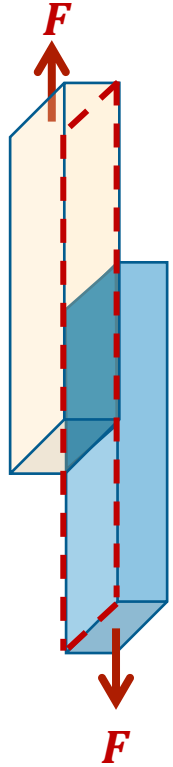
$$LSS(MPa) = \frac{F_{max}}{S_{overlap}}$$

Surface de recouvrement cisailée

⇒ **Pas de pré-fissure** : on **assimile** à un essai de rupture **mode II**

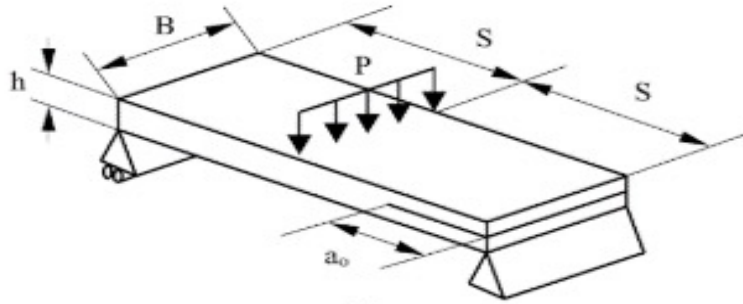
⇒ **Plan de chargement doit absolument passer par la zone de recouvrement**

Essais mécaniques en mode II



Essai de cisaillement simple recouvrement

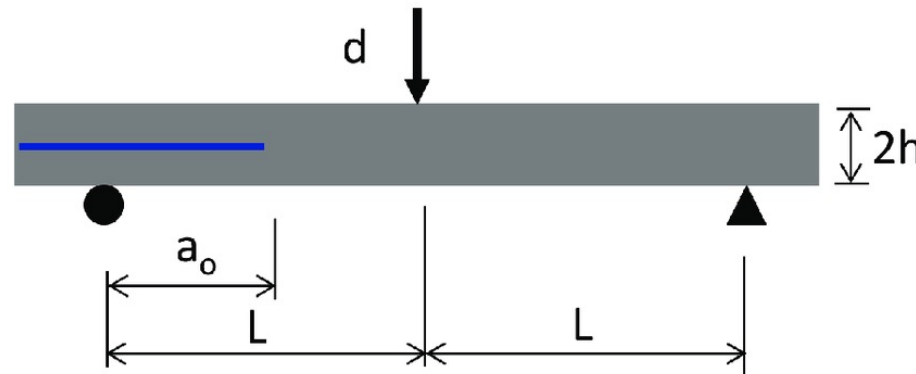
SLS
Single Lap shear



Essai ENF : pilotage en charge

⇒ **ENF** : éprouvette **fissurée**

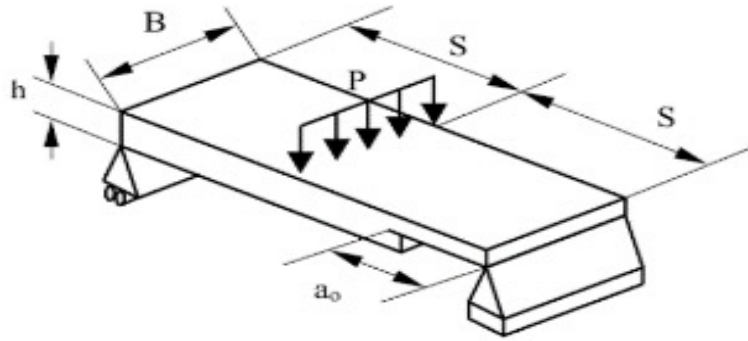
⇒ La rupture en **mode II** se fait par une sollicitation de **flexion**



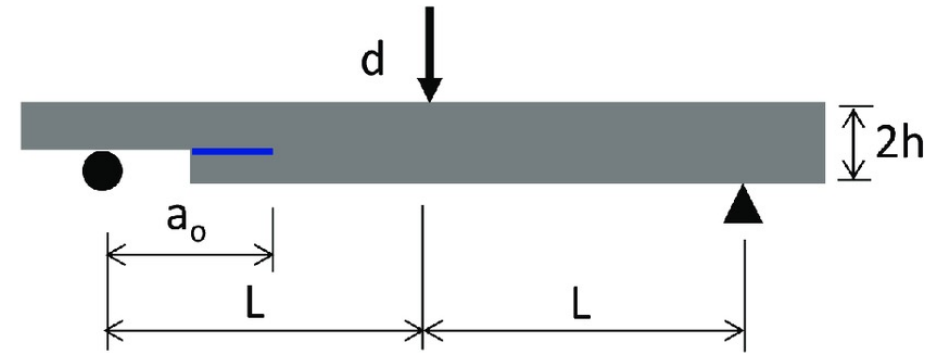
Essai ENF : pilotage en déplacement
[Johar,2017]

ENF
End Notched Flexure

Essais mécaniques en mode mixte : l'essai **Mixed Mode Flexure**



Essai MMF : pilotage en charge



Essai MMF : pilotage en déplacement
[Johar,2017]

⇒ Modes de rupture combinés : **mode I + mode II**

⇒ **Mode I** obtenu par la **flexion** combinée à la **longueur du bras n'allant pas jusqu'à l'appui**

⇒ **Mode II** : du à la sollicitation de **flexion**

Bilan sur les essais mécaniques

- ❑ Essais les plus utilisés : **LSS** pour l'ingénierie / **DCB – Clivage en coin** pour le développement et le domaine de la recherche

LSS

- ❑ Essai **rapide** et **simple** de mise en œuvre
- ❑ **Résultats facilement comparables** entre différentes configurations expérimentales de soudage
- ❑ **Notion de résistance** en cisaillement simple recouvrement facilement **compréhensible**
- ❑ Critère de **contrainte maximale** : **pas d'information** sur les aspect de **propagation** de fissure / **stabilité** de propagation

DCB / Clivage en coin

- ❑ **Critère énergétique** : traduit l'énergie potentielle totale des substrats
- ❑ Critère énergétique : **information** sur l'**initiation** et la **propagation** de fissure / **stabilité** de propagation
- ❑ Essai plus **fastidieux** à mettre en œuvre : nécessité de la **mesure d'avancée** de fissure et de l'**ouverture**
- ❑ **Besoin en matériel expérimental** + important

Relation entre tenue interfaciale et paramètres-procédés

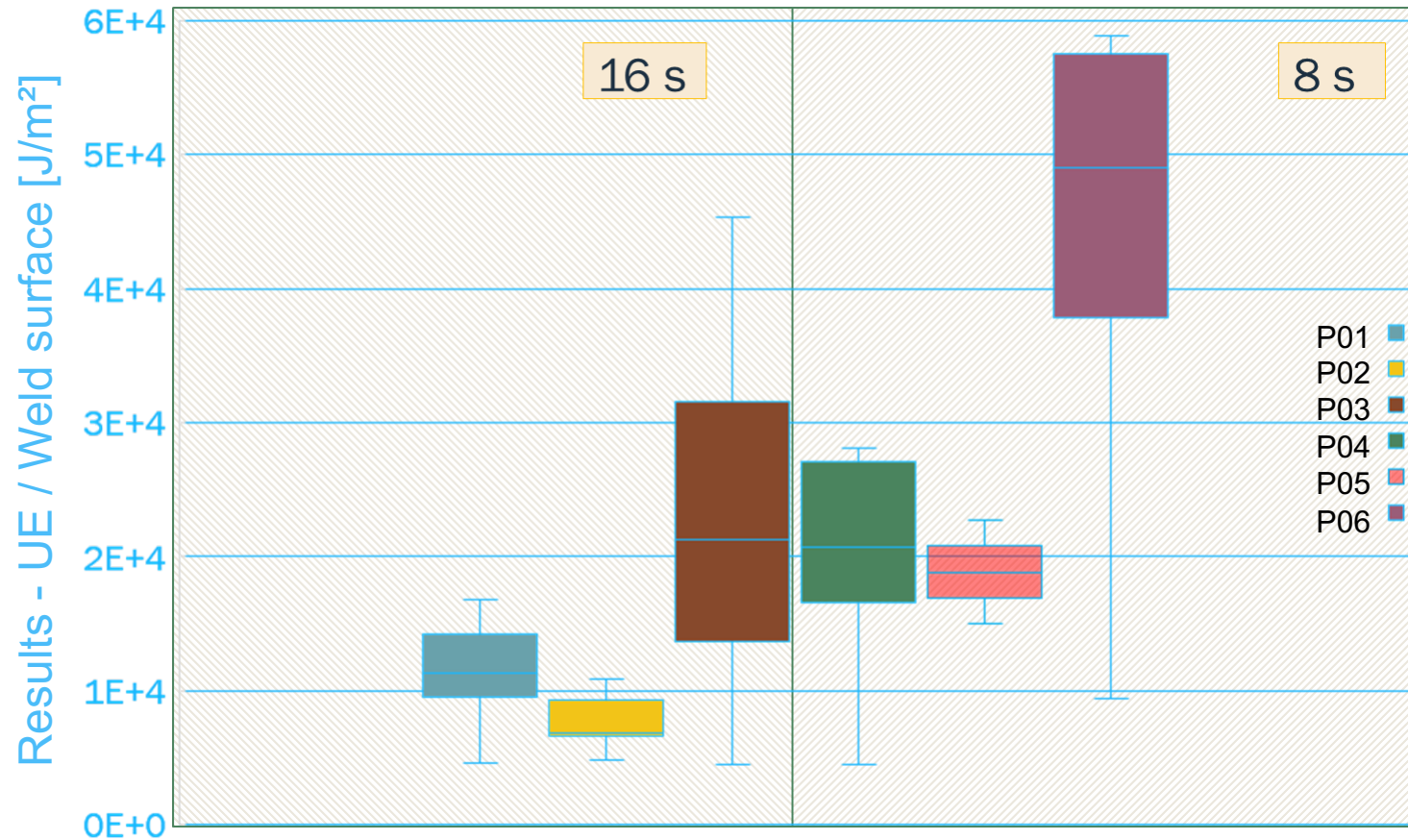
Paramètres influençant la tenue mécanique

- ❑ **Teneur en eau** des substrats : vaporisation lors de l'irradiation → **création de bulles** (défavorable)
- ❑ **Rugosité** de surfaces : contact intime → maximiser le contact intime (favorable)
- ❑ **Température** atteinte lors du procédé → augmenter l'interdiffusion (favorable)
- ❑ Paramètres **matériaux** et paramètres **procédés**
 - ❑ Longueur d'onde du laser / propriétés optiques du matériau
 - ❑ Gamme de puissance : [interaction onde-matière – dégradation du matériau]
 - ❑ Vitesse de déplacement / densité d'énergie
 - ❑ Force appliquée

Conclusion générale

- ❑ Il existe **3 modes de rupture**.
- ❑ Il existe **3 types de faciès de rupture** d'assemblage soudés.
- ❑ Pour déterminer la tenue mécanique des joints soudés, 2 grandeurs sont disponibles : i) **critère de la contrainte maximale**, ii) **taux de restitution d'énergie**.
- ❑ De **nombreux essais** existent pour calculer ces grandeurs pour les **3 modes de rupture** et leurs **couplages éventuels**
- ❑ Le **calcul** de ces grandeurs sont basés sur : i) les propriétés des **matériaux**, ii) les **géométries** des assemblages et iii) les **mesures** lors de l'essai (force / ouverture / avancée de fissure)
- ❑ Les essais les plus courants sont : i) le **single lap shear** et ii) l'essai **Double Cantilever Beam (DCB)**

Relation temps d'irradiation – tenue mécanique : exemple du soudage ligne PEKK 6002 – PEKK 6002

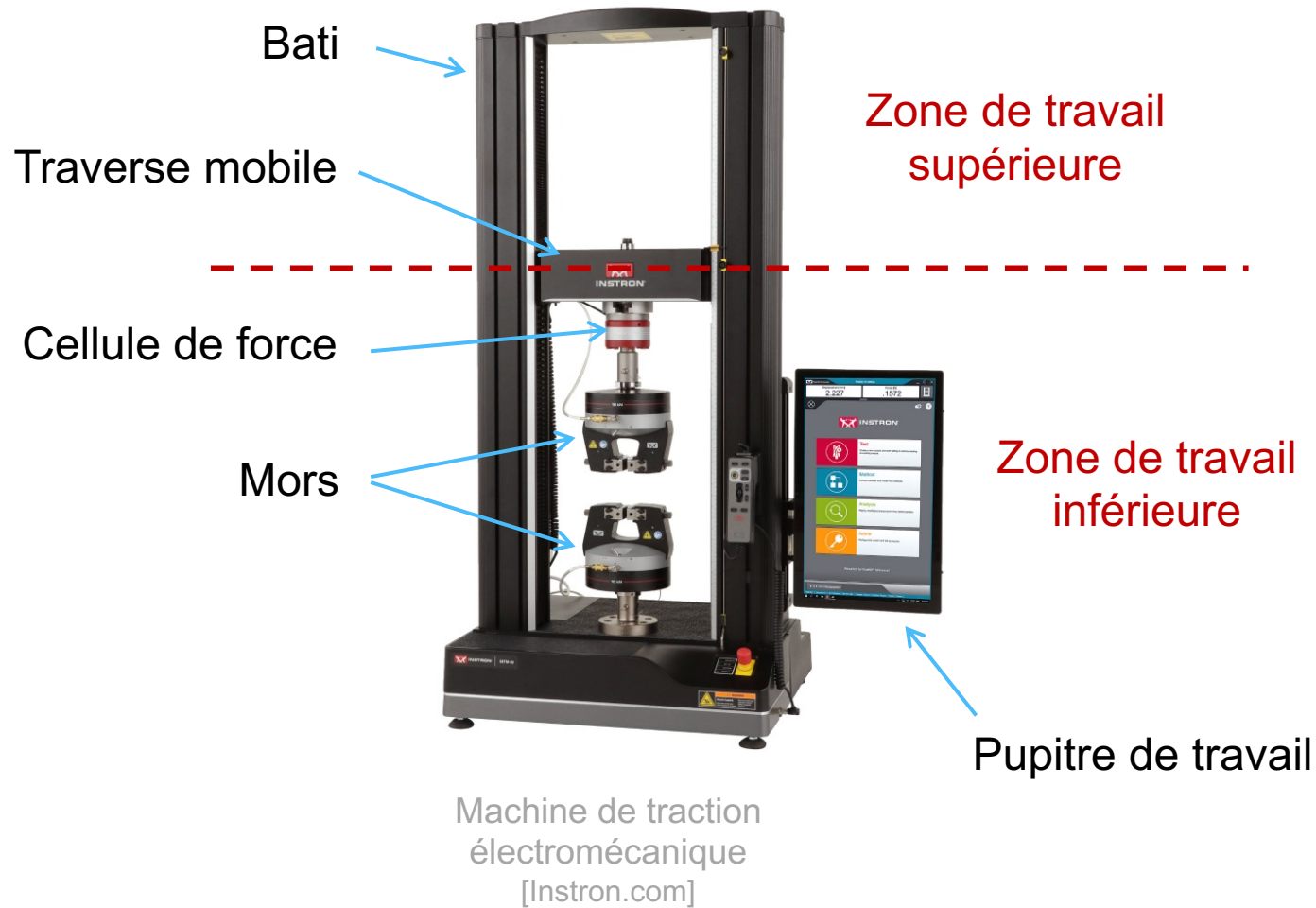


	P (W)	t (s)	E (J)
P01	17,5	16	280
P02	15	16	240
P03	13,75	16	220
P04	35	8	280
P05	30	8	240
P06	27,5	8	220

⇒ Privilégier **les temps court** permet d'augmenter G (pour un niveau énergétique équivalent)

⇒ **Dispersion importante** : renouveler les expériences

Cas de l'essai simple recouvrement : utilisation machine de traction



- ⇒ Choix de l'espace de travail
- ⇒ Choix de la cellule de charge (en fonction des forces maximales)
- ⇒ Choix des mors adaptés à l'essai
- ⇒ Création de la méthode d'essai

Cas de l'essai simple recouvrement : **Méthode d'essai / Protocole expérimental**

⇒ Pilotage en charge : **2800 N. mm^{-1}**

⇒ Cellule de charge : **10 – 50 kN**
(en fonction des cellules disponibles)

⇒ Critère d'arrêt d'essai : **chute de charge de 40 %**

⇒ Données à enregistrer : **temps, déplacement, Charge**

⇒ 1/ **Tarer** la cellule de **charge** à vide

⇒ 2/ **Bouger la traverse** mobile de façon à pouvoir positionner l'éprouvette

⇒ 3/ **Installer l'éprouvette** en serrant le mors du haut, puis le mors du bas

⇒ 4/ Bouger la traverse pour **revenir à charge nulle**

⇒ 5/ Mettre une **précharge**

⇒ 6/ **Tarer** la charge et **réinitialiser** la longueur initiale

⇒ 7/ **Lancer** l'essai

⇒ 8/ **Enregistrer** les données à la fin de l'essai