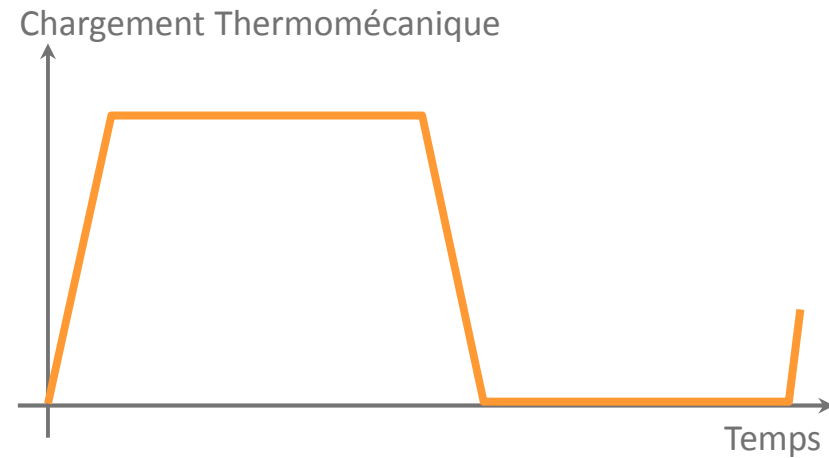
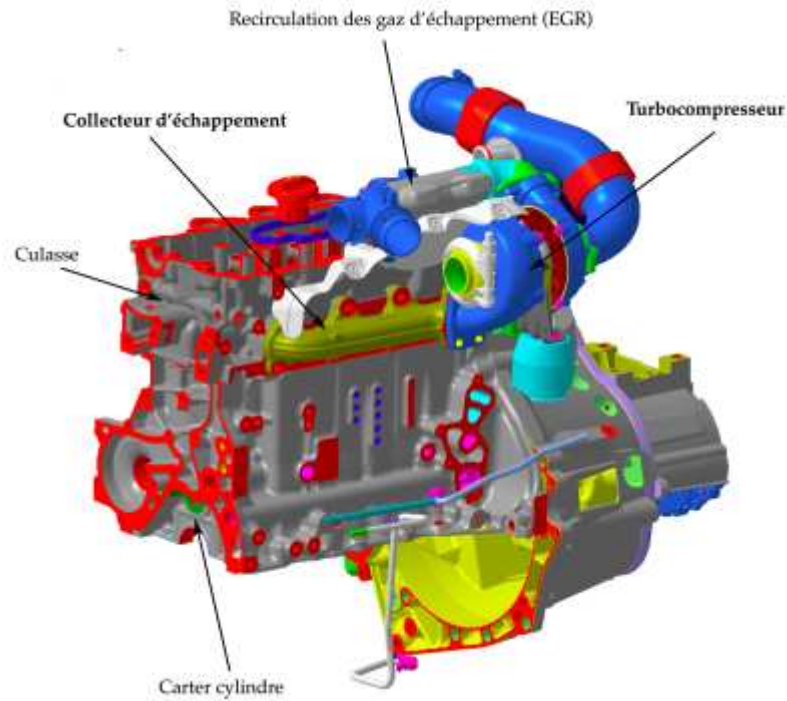


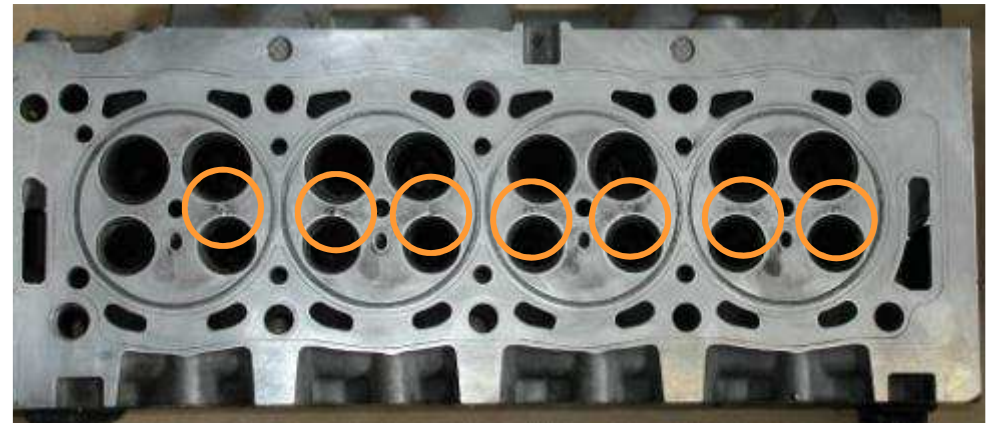
Mesure de l'endommagement par fatigue thermomécanique des culasses Diesel soumises à des chargements aléatoires

Etat de l'art et perspectives

Fatigue thermomécanique pour les composants moteur

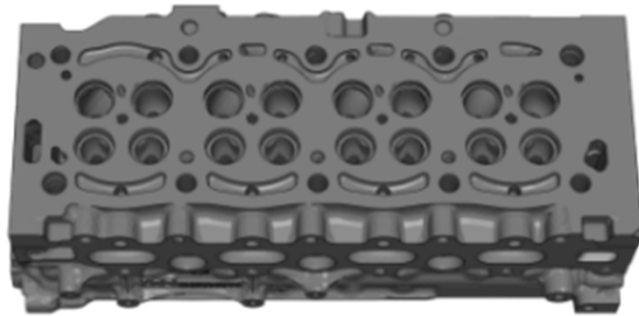


- Chargements thermiques sévères
- Structure contrainte mécaniquement : Conditions limites mécaniques très sévères
- Conception numérique et validation expérimentale sur les mêmes cycles de chargement
 - Cycles sévères de chauffage et refroidissement de la structure



Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Principes généraux



Bonne connaissances des chargements thermiques et mécaniques

- ✓ Flux de combustion (
- ✓ Echange thermique avec les autres pièces (carter, collecteur, soupapes)
- ✓ Echanges avec le glycol et l'huile
- ✓ Thermométries précises

Représentation robuste et prédictive du comportement du matériau constitutif de la culasse

- ✓ Base expérimentale adaptée (température, niveaux de déformation)
- ✓ Loi de comportement élasto-viscoplastique
- ✓ Physique des lois (alliages d'aluminium)

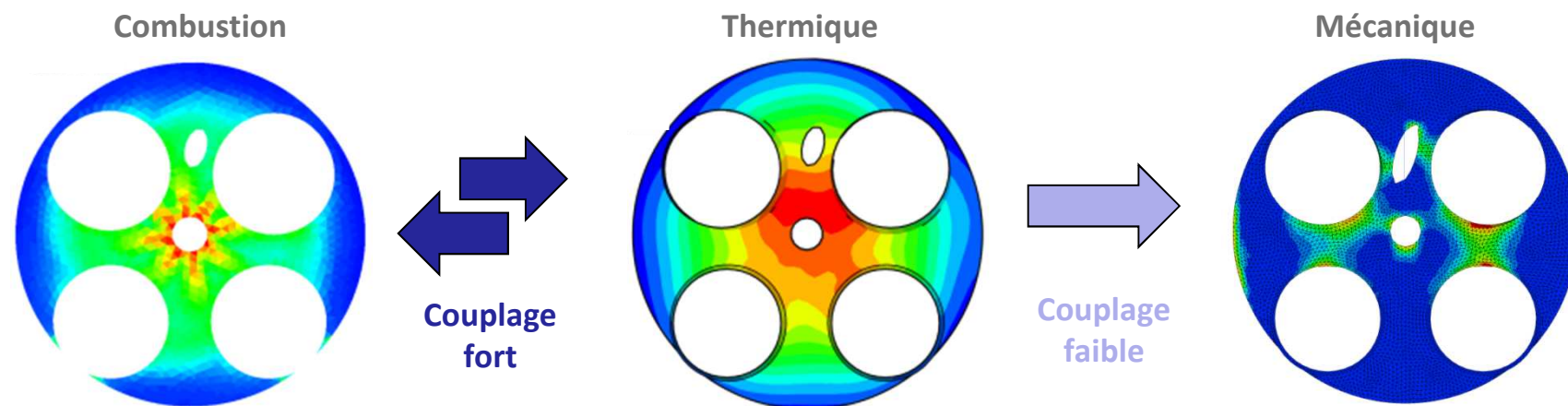
Définition d'un critère de ruine à l'échelle de l'ingénieur

- ✓ Base expérimentale adaptée (niveau de déformation, contrainte moyenne, etc.)
- ✓ Simplicité et dispersion limitée du critère
- ✓ Corrélation calculs essais

Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Principes généraux

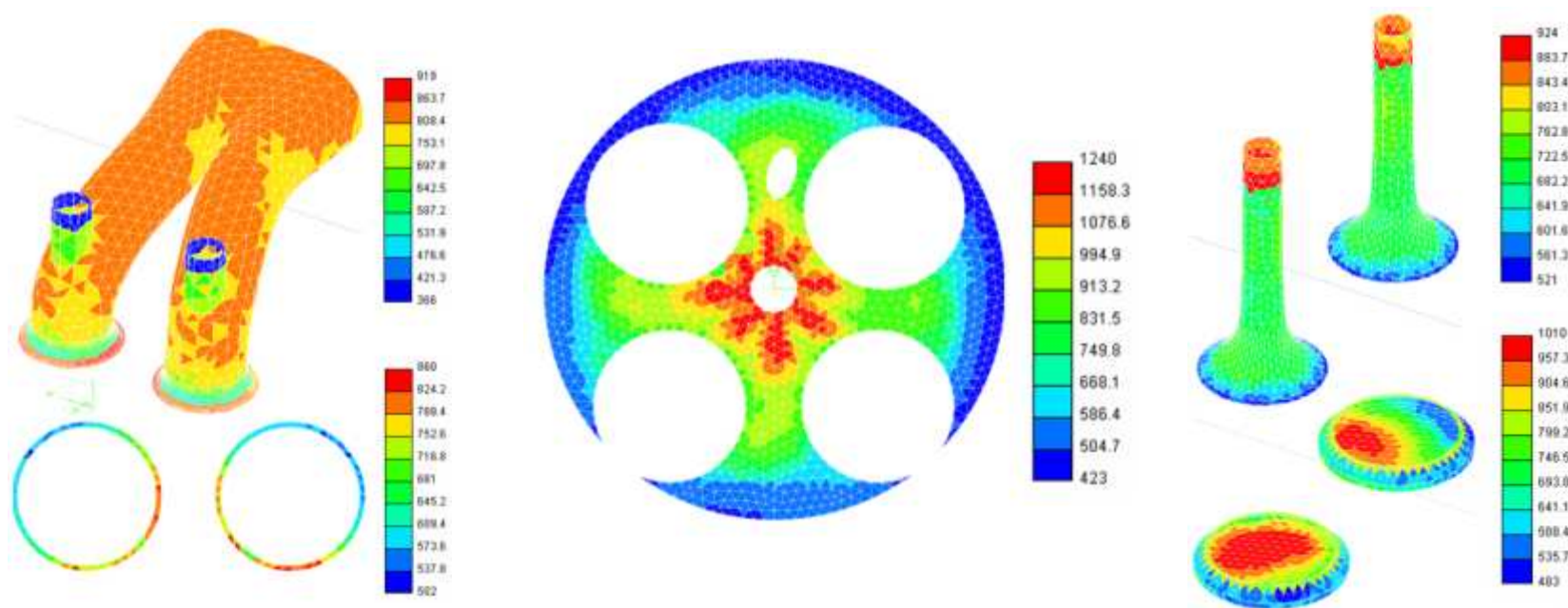
- Ce principe de dimensionnement souligne l'importance des données expérimentales.
- On considère la ruine de la structure à l'amorçage de la première fissure macroscopique (environ 2mm et donc observable à l'œil nu)
- Deux hypothèses fortes sont posées :
 - On considère une accommodation locale de la structure, notamment dans les zones critiques pour la fatigue thermomécanique
 - Comportement et endommagement sont découplés
- Prise en compte des couplages



Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Etape #1 : évaluation du chargement principal : le flux de combustion

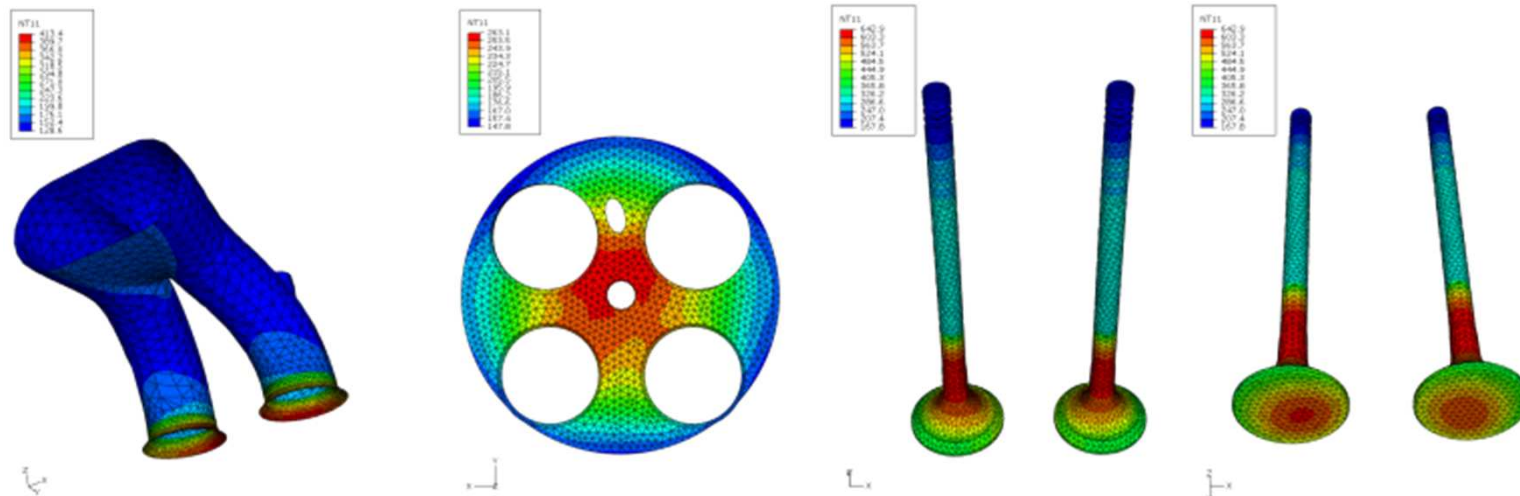
- Le calcul de combustion est effectué sur les 4 temps du moteur et permet, pour un cycle de chargement donné d'évaluer les flux thermiques entre les gaz issus de la combustion et la culasses, les soupapes et les guides de soupapes
 - ◆ On obtient des températures et des coefficients d'échange moyennés temporellement sur un cycle de combustion



Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Etape #2 : détermination des champs thermiques

- Le calcul thermique prend en compte l'ensemble des échanges entre la culasse et les pièces et fluides environnants
 - Convection forcée avec les gaz d'échappement et le glycol
 - Convection libre avec l'air ambiant
 - Rayonnement
 - Conduction avec les guides et sièges de soupapes, les soupapes, le collecteur et le carter cylindre

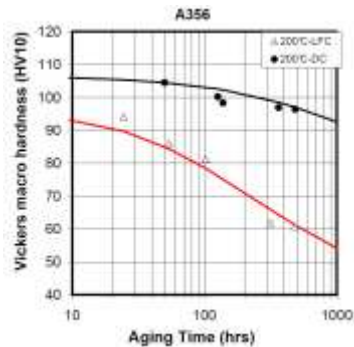


- Importance fondamentale des données matériaux
- Couplage entre les calculs thermiques et de combustion jusqu'à convergence des $T_{\text{matière}}$

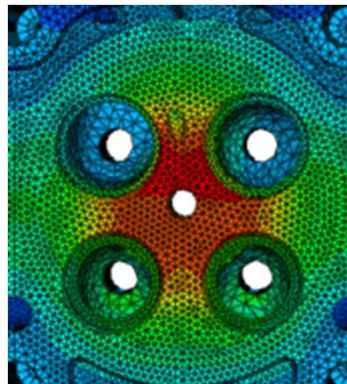
Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Etape #3 : Régime de vieillissement stabilisé

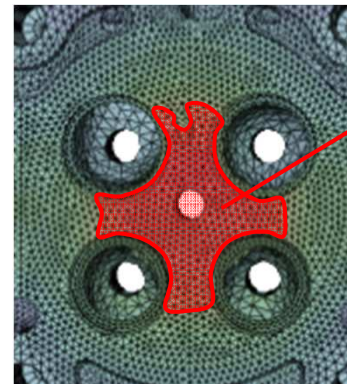
- On considère généralement que le temps de vieillissement sur des alliages classiques (aluminium silicium magnésium avec traitement thermique T7) est court par rapport à la durée de vie totale de la structure
 - ◆ En fonction de la température maximale qu'est susceptible de « voir » un élément de structure et donc une maille du modèle éléments finis, on considère sont état comme définitivement vieilli ou pas



Essai de vieillissement
 Identification d'une température T_0 en dessous de laquelle le matériau ne vieillit pas



Calcul thermique stationnaire
 Champ de température maximal durant l'essai de validation



Identification d'une zone vieilli
 Tous éléments dont la température dépasse T_0 est considéré comme ayant un comportement vieilli (importance du maillage)

Loi de comportement spécifique

1 loi de comportement pour chacune des zones identifiées : même modèle mais paramètres différents

Calcul éléments finis

On procède à un étape supplémentaire de vieillissement en appliquant le champ de température maximale avec les conditions limites mécaniques et en établissant ainsi un équilibrage des contraintes.

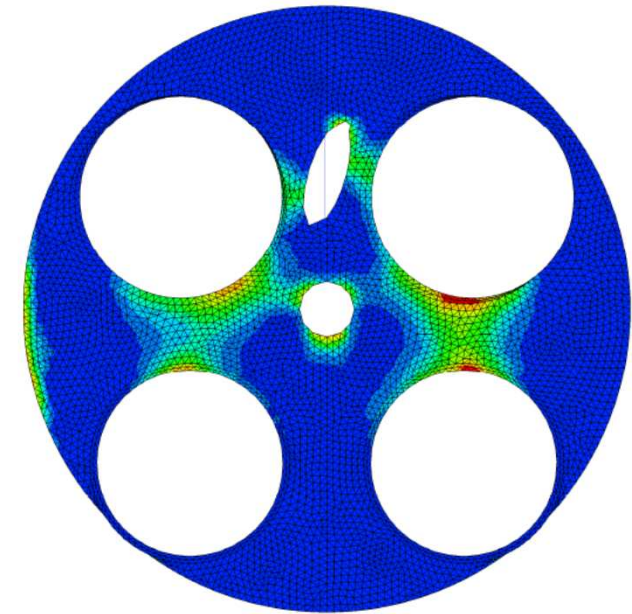
Conception déterministe d'une culasse pour la fatigue TM

Etape #4 : Calcul mécanique et évaluation de la durée de vie

- Les conditions limites mécaniques sont diverses
 - Serrage de la culasse sur le carter cylindre
 - Frettage des guides et sièges de soupapes

- Les lois de comportement utilisées sont élasto-viscoplastiques
 - Loi classique de type Chaboche (1989) avec potentiel visqueux de type Norton et un écrouissage cinématique de type Armstrong-Frederick
 - Identification isotherme sur des bases d'essais de type écrouissage cyclique (traction-compression avec temps de maintien et augmentation progressive de l'amplitude de déformation)

- Le critère de fatigue est exprimé à partir d'une densité d'énergie inélastique dissipée par cycle accommodé
 - Efficace sur les culasses (Constantinescu et al., 2004)
 - Identifié à partir d'essais LCF
 - Validé sur des essais TMF
 - L'élément le plus critique pour le chargement de dimensionnement donne la durée de vie de la structure



Un problème toutefois très aléatoire



Des clients aux comportements variés

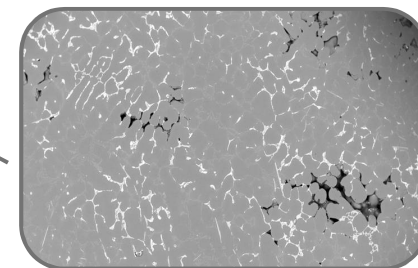


Des conditions de roulages diverses

Des dispersions de production



Des dispersions intrinsèques au matériau



Des conséquences sur le dimensionnement

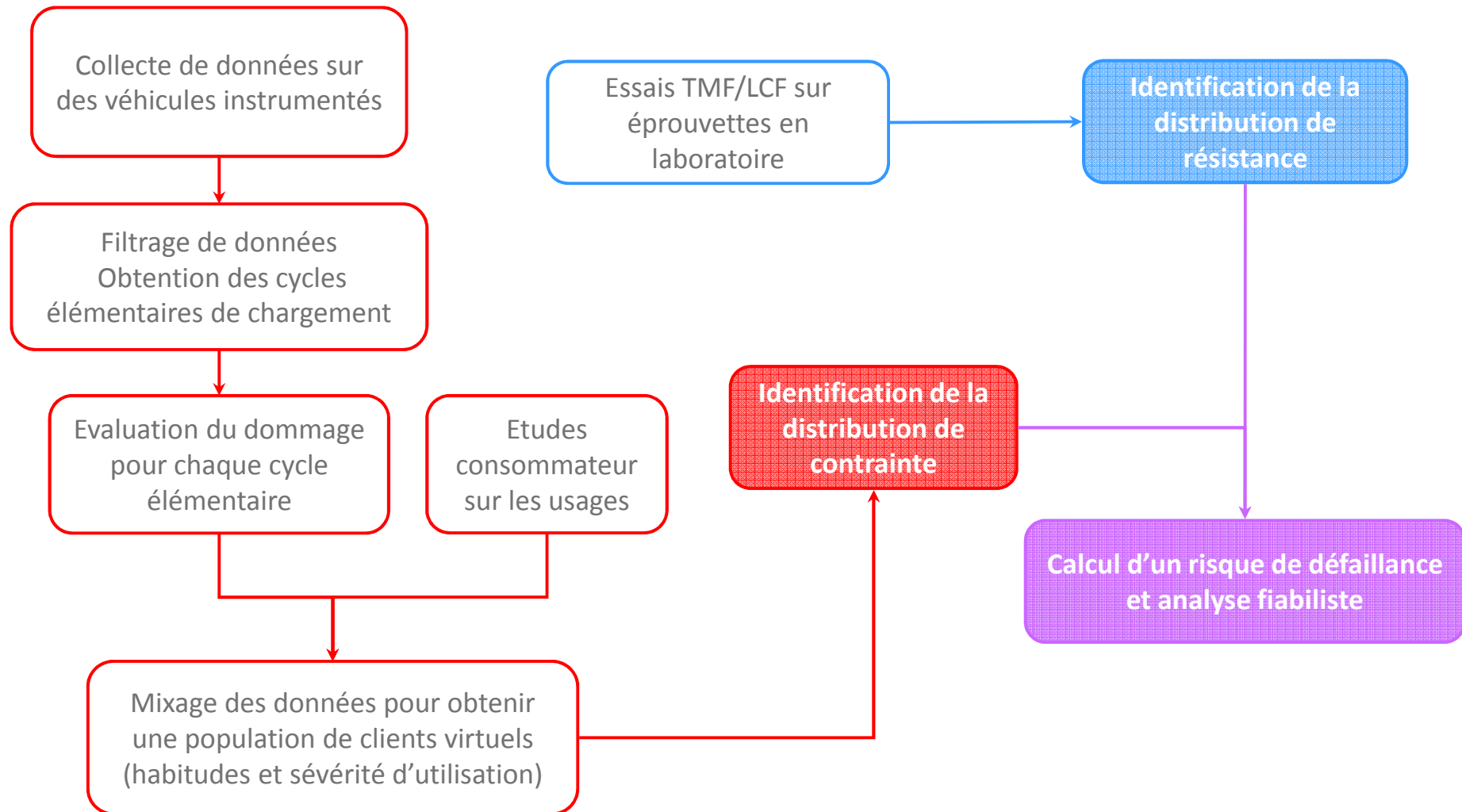
- Le problème est ainsi **plus complexe** et empreint de **fortes variabilités**
 - La conception déterministe, si elle est efficace, conduit souvent à surdimensionner les structures

- On passe sur un **dimensionnement fiabiliste**
 - Prise en compte de la variabilité de la sévérité d'utilisation : chaque client est unique et son utilisation du véhicule lui est propre (type de conduite, route emprunté, conditions de circulation)
 - Estimation de la dispersion de production en termes de santé matière, tolérance géométrique, résistance intrinsèque des pièces à la fatigue

- On se base sur **la méthode contrainte résistance**
 - Calcul d'un risque de défaillance en clientèle
 - Possibilité qu'une culasse de faible résistance soit confié à un client sévère

- Nécessité de repenser le protocole de dimensionnement
 - Remise en cause des hypothèses ?
 - **Quelle variable pour mesurer l'endommagement ?**
 - Comment cumuler cet endommagement

Le principe du dimensionnement fiabiliste



Quelques réflexions sur l'acquis et le recherché

- **Le flux thermique** sur la face flamme culasse est considéré comme étant la variable d'endommagement macroscopique

- On dispose de **données parcellaires**
 - Des enregistrements obtenus sur véhicules instrumentés pour différents types de condition de roulage et pour des kilométrages limités
 - Des enquêtes statistiques sur l'utilisation des véhicules par les clients.

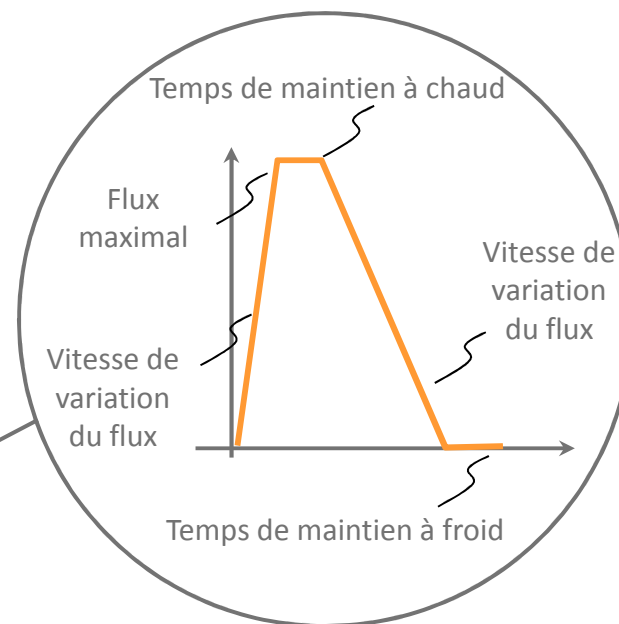
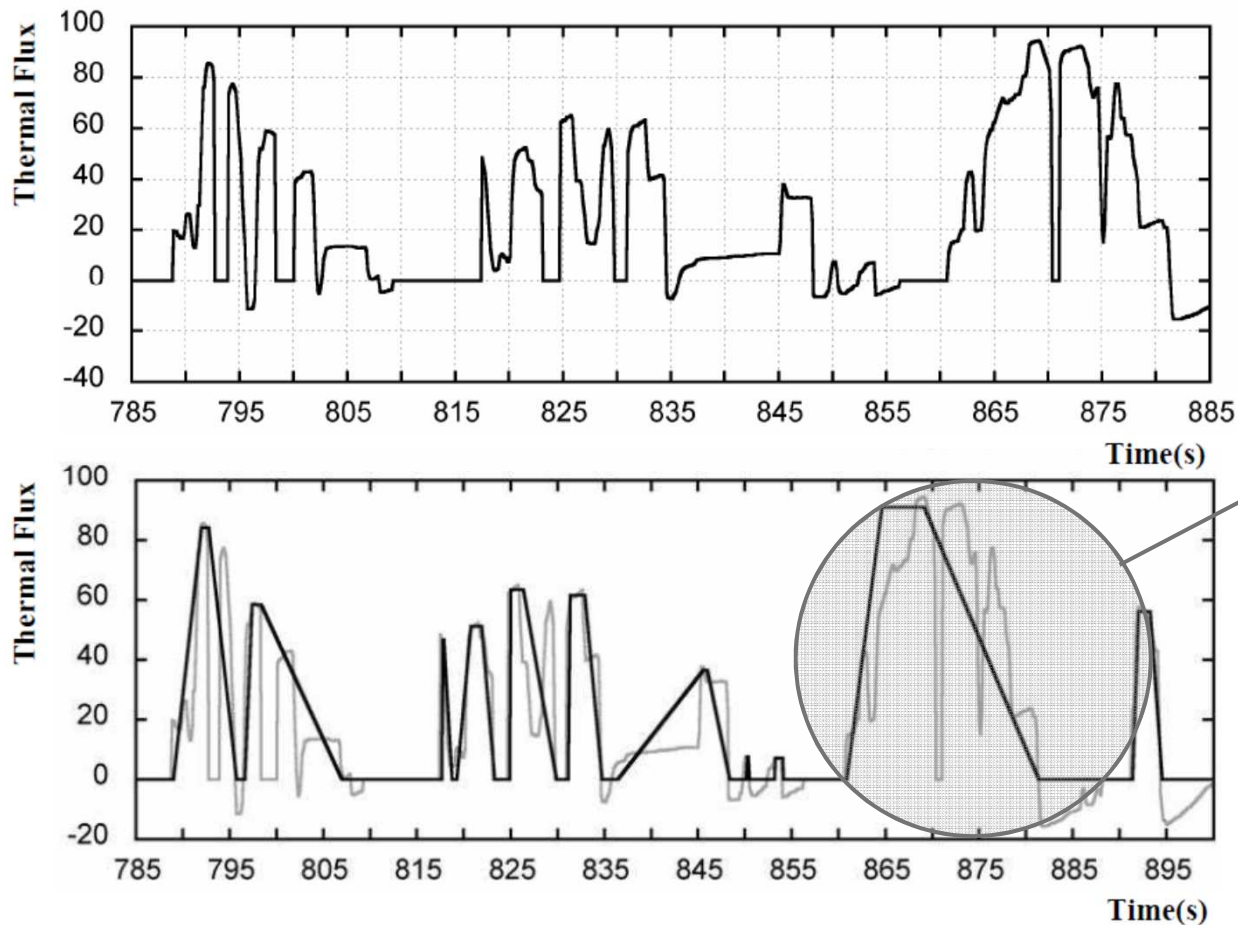
- On réalise un **mixage** de ces données
 - Obtention d'une vaste population de clients virtuels à l'utilisation représentative
 - Découpage et recombinaison des cycles de chargements disponibles

- On doit alors être capable de **mesurer l'endommagement** généré par une utilisation aléatoire du véhicule
 - On n'est plus dans un cas où tous les cycles qui s'enchaînent sont identiques et maîtrisés

- On conserve toutefois l'hypothèse **qu'endommagement et comportement sont découplés**

Filtrage et obtention des cycles élémentaires de chargement

- Les cycles de chargement élémentaire sont calqués sur la physique de la fatigue thermomécanique grâce à un traitement du signal approprié

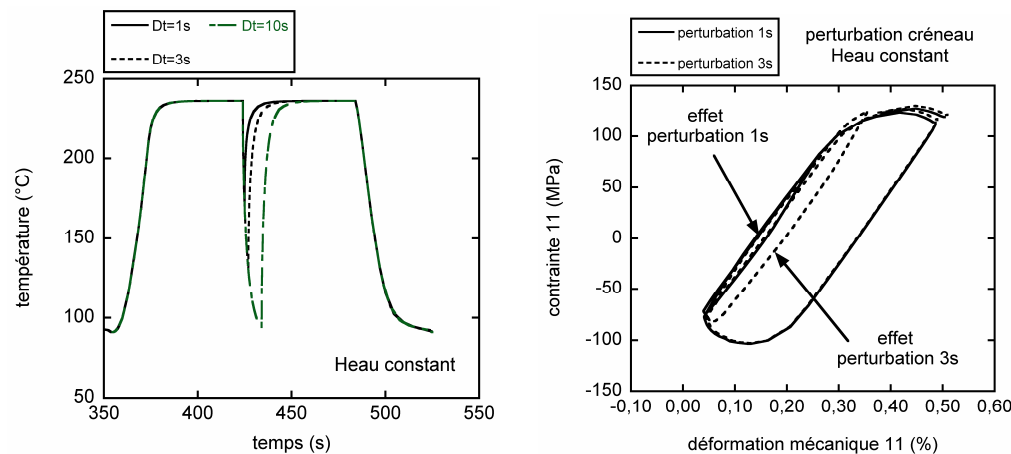


Une succession de cycles endommageants

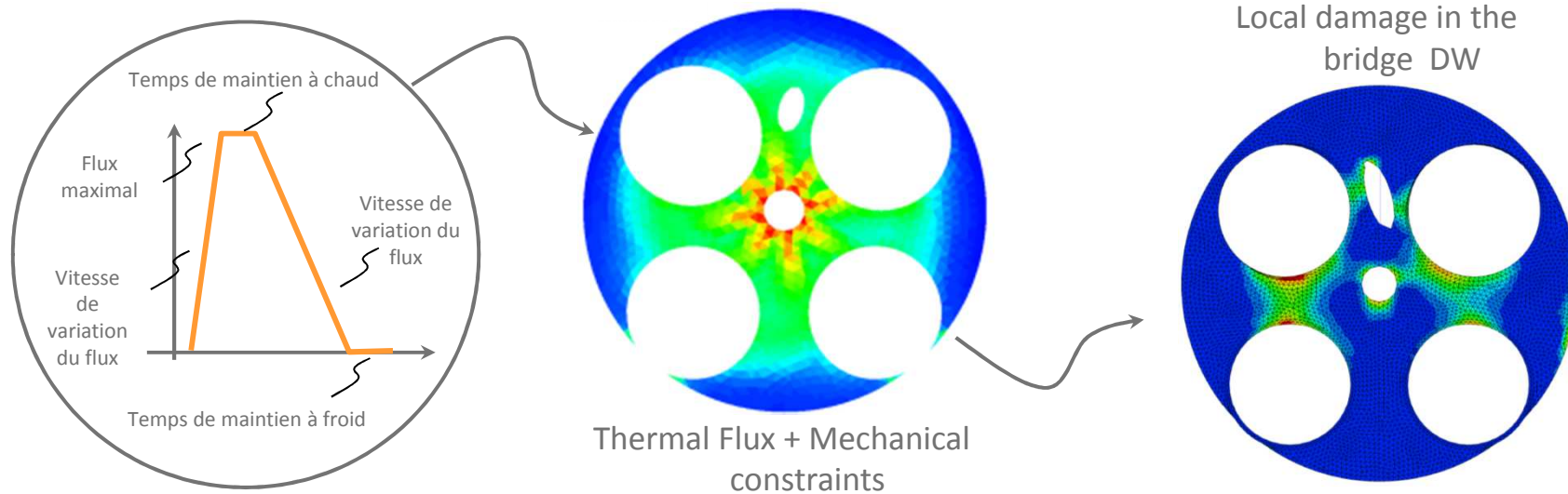
- Quelles solutions pour mesurer l'endommagement provoqué par une suite de cycle différents?
 - Comment relier un chargement global à un endommagement local?

- Comment relier une succession aléatoire de chargements macroscopiques à un cumul d'endommagement local ?
 - Réaliser un cumul de type Miner est-il possible? (conformité avec la conception déterministe)

- Importance de la physique
 - Tous les cycles ne sont pas forcément endommageant
 - Gérer l'inertie thermique



Une méthode pour évaluer l'endommagement unitaire



- Une base d'au moins 30 calculs éléments finis doit être réalisée pour évaluer la sensibilité des paramètres de chargement macroscopique sur l'endommagement local
- Une loi d'endommagement global/local empirique est identifiée à partir de ces calculs

$$\Delta W = A_{structure,nom} \left[1 - B \exp \left(- \left(\frac{t_{hold}}{t_0} \right)^m \right) \ln \left(\frac{\dot{\rho}}{\dot{\rho}_0} \right) \right] \Delta \rho^n$$

Le paramètre structure est le seul qui dépende uniquement de la géométrie de la structure

Comment gérer le cumul?

- Suppression des cycles non endommageant en termes de fatigue thermomécanique.
 - Si la fonction critère associée à une densité d'énergie donnée un nombre de cycle supérieur à 100000, on considère que le cycle est non endommageant du point de vue de la fatigue thermomécanique

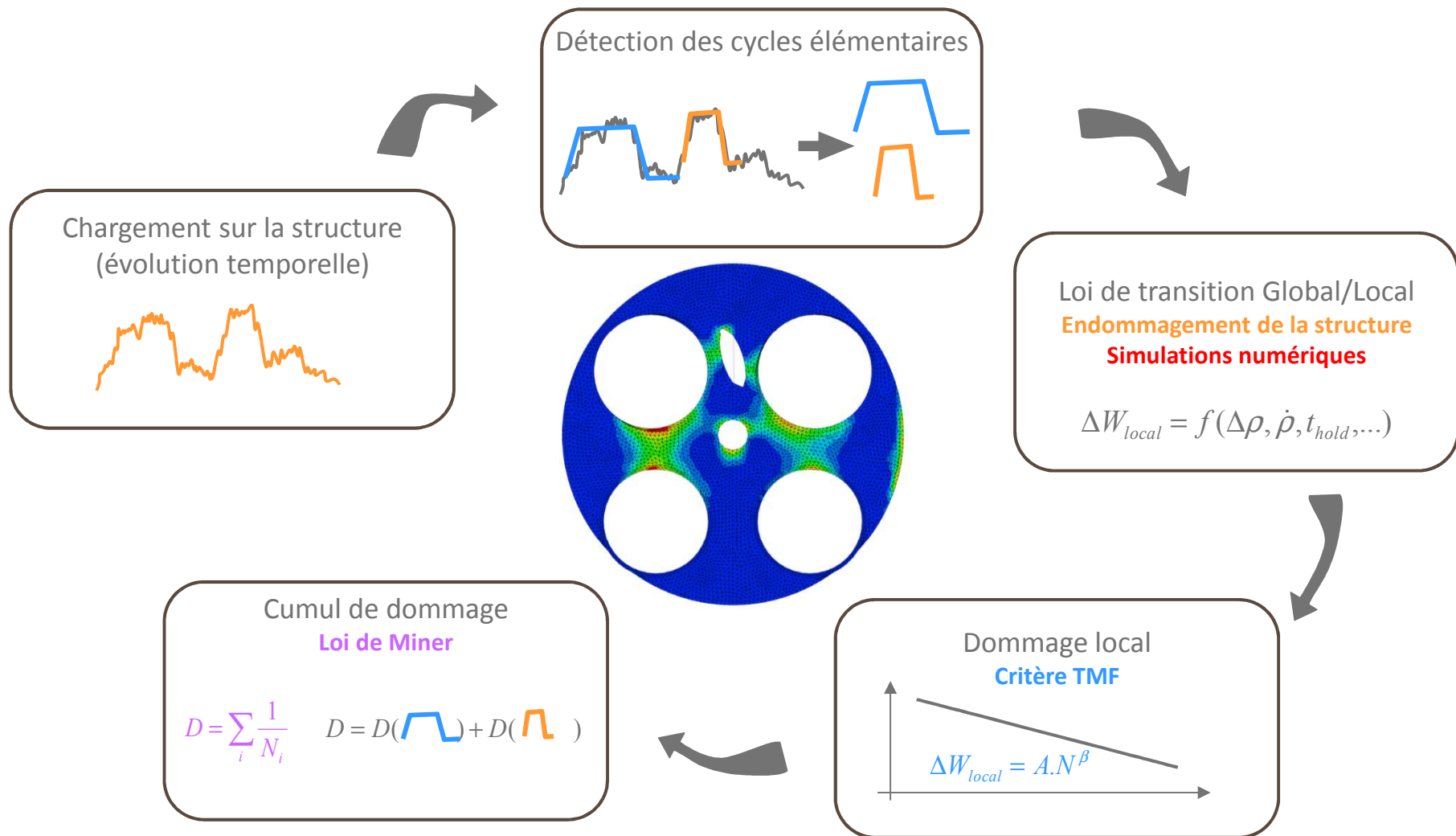
- Utilisation d'un **cumul de Miner**
 - Facilité par la bonne conductivité des alliages d'aluminium et la simplicité de la zone critique
 - Grandement facilité par la variabilité limitée des cycles de chargement

- Le retour à zéro en termes de flux thermique est un grand avantage : les boucles contraintes déformation correspondantes sont généralement closes

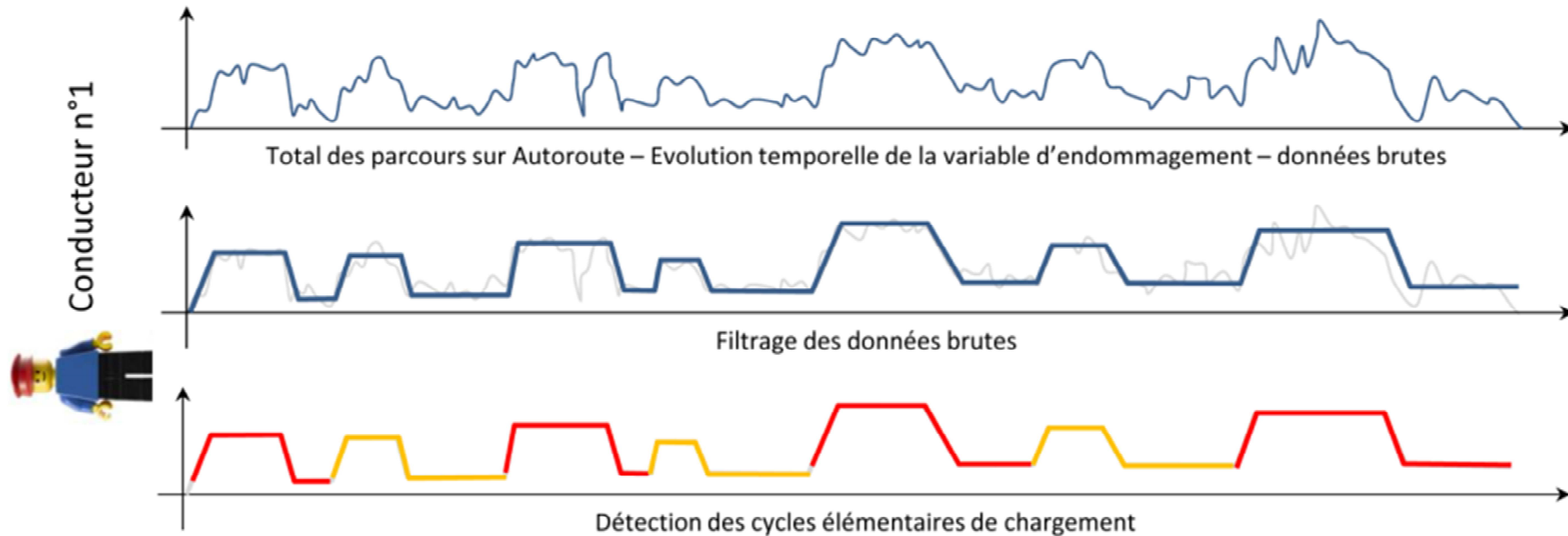
- **L'ordre des cycles n'a pas d'influence sur le cumul** avec les hypothèses proposées
 - Succession aléatoire de 10 à 20 cycles de sollicitation sur un modèle éléments finis
 - Calcul de l'endommagement généré (sans traitement du signal) à l'issue de l'enchaînement
 - Un maximum de 2% d'erreur

- Le vieillissement est toujours considéré comme un phénomène « rapide » et « décorrélié » du calcul d'endommagement (la zone critique est dans un état « vieillie »)

Cumul de dommage pour un parcours donné



Traitement unitaire de l'endommagement



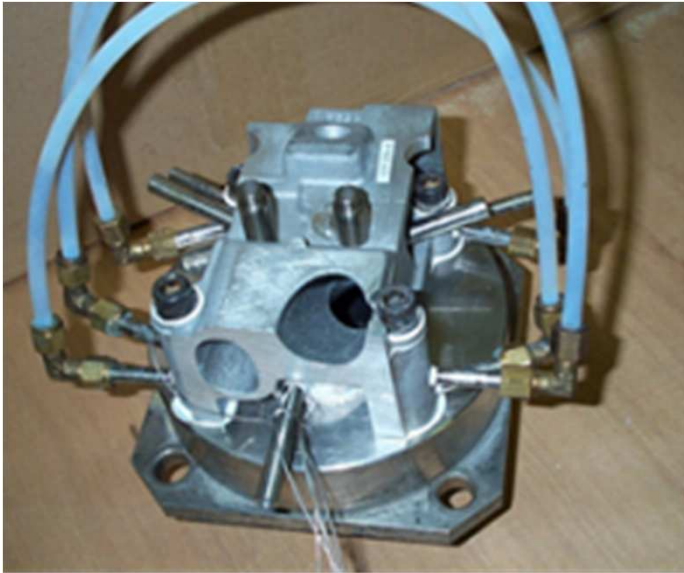
$$\begin{aligned}
 & \text{[Red stepped line]} \Rightarrow \Delta W = f(A_{structure}^*, \Delta C, C_{up}, C_{down}, t_{min}, t_{max}, C_{max}, C_{min}, \kappa_{i=1..n}) \\
 & \Rightarrow D_{cycle\ élémentaire} = \frac{1}{N_{cycle\ élémentaire}} = \frac{(\Delta W_{cycle\ élémentaire})^{1/\beta}}{A_0^{1/\beta}}
 \end{aligned}$$

Identification d'un endommagement cyclique via la règle de Miner et calcul d'un endommagement pour le parcours Autoroute

Bilan

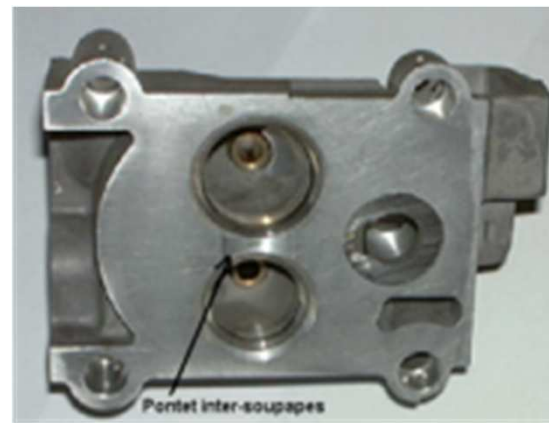
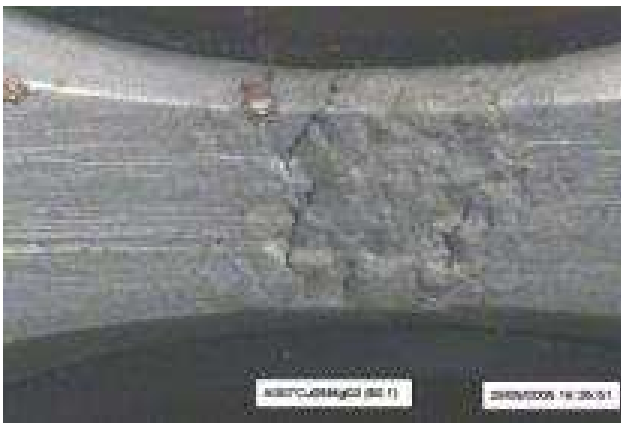
- Le cumul de Miner est une solution efficace pour calculer un endommagement cumulé pour une série de cycle de chargement
- Il permet d'évaluer la sévérité d'un conducteur sur un type de parcours donné
- Il est bien adapté au cas de la culasse car la zone critique subit un chargement quasi uniaxial et presque parfaitement hors phase (déformation/température) et dont la variabilité est limitée lors de l'utilisation du véhicule
- L'évaluation est démontrée efficace car elle permet de calculer des risques de défaillance réaliste et corrélés avec les retours en garantie (*Szmytka et Oudin, 2011*)
- Il est efficace car le vieillissement des alliages usuels est très rapide et donc pas influencé par la séquence de chargement

Essais sur éprouvettes « monocylindre »



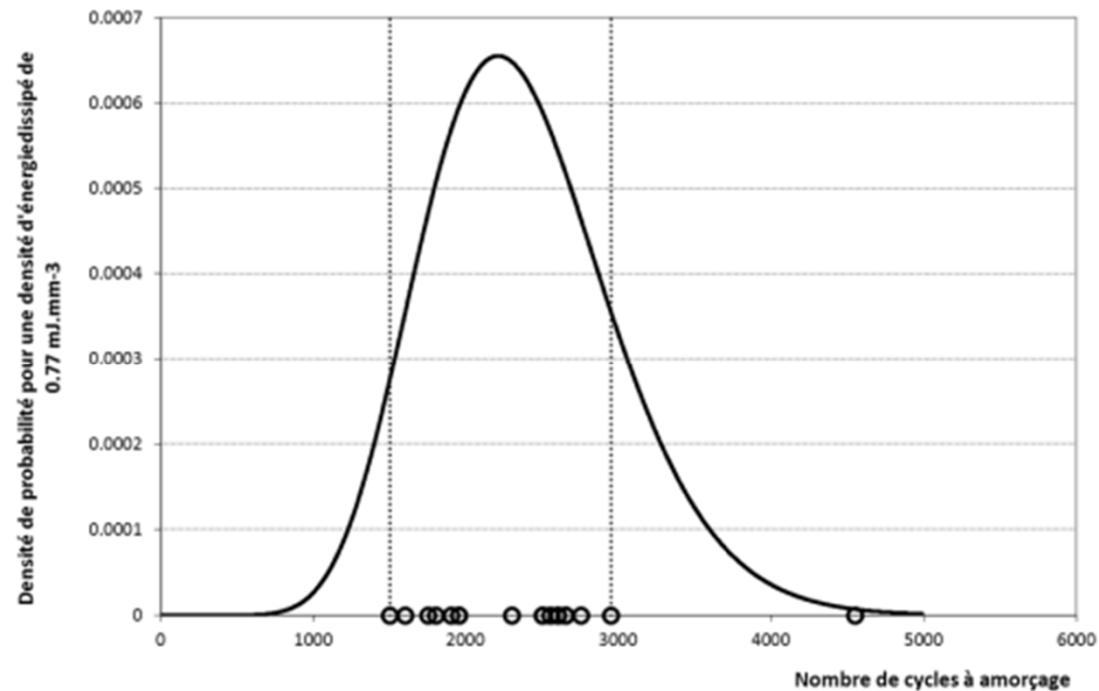
■ Essais représentatifs d'un fonctionnement culasse mais sévérés pour tester de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés

- Chauffage par chalumeau (de 100 à 250°C en quelques secondes)
- Refroidissement par air pulsé
- Mesure de l'endommagement par caméra et détection d'amorçage de fissure



Essais « monocylindre » sur un alliage « standard »

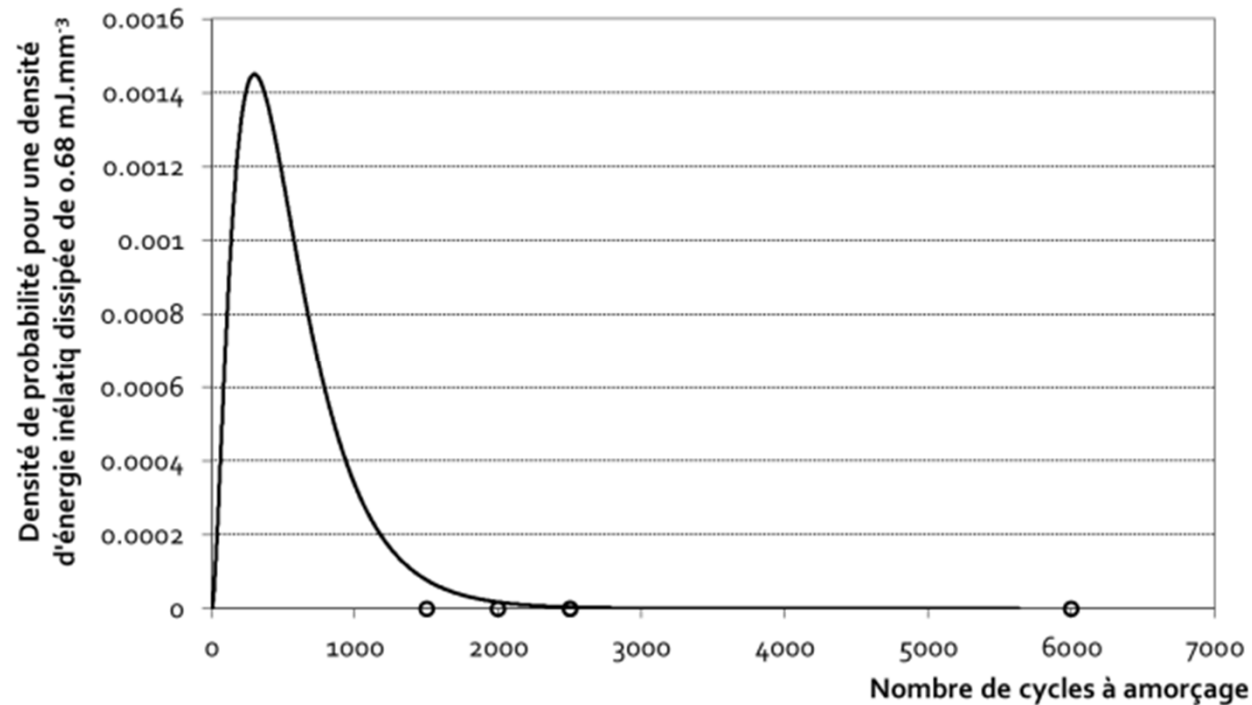
- Essais monocylindres (18 avec le même chargement) sur un AlSi7Mg03Cu05 T7 et obtenue par fonderie de type gravité coquille



- L'analyse statistique du nombre de cycles à amorçage pour ce chargement spécifique donne une durée de vie moyenne de 2377 cycles avec un écart type de 616 cycles pour une durée de vie moyenne de 2392 cycles avec 694 cycles d'écart type.

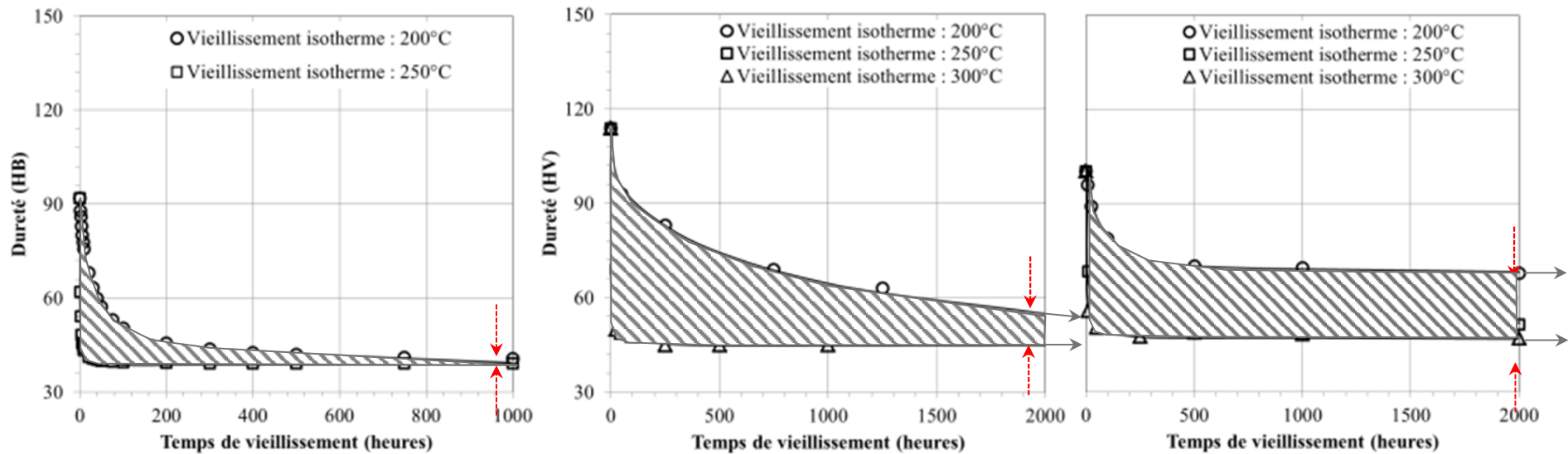
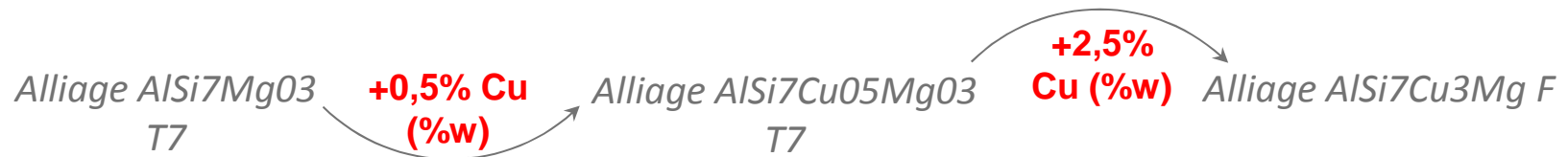
Essais « monocylindre » sur un alliage contenant plus de Cu

- Essais monocylindres (4 avec le même chargement) sur un AlSi7Cu3Mg sans traitement thermique et obtenu par fonderie PMP



- Sur cette alliage, comme sur d'autres, la prise en compte du vieillissement ne peut plus être réalisé selon les hypothèses simples posées précédemment

Composition chimique et vieillissement



■ L'évolution, avec le taux de cuivre, du comportement de vieillissement pousse vers une *remise en cause de la méthode de prise en compte du vieillissement*

Comment s'y prendre ?

■ Dimensionnement déterministe

- Disposer d'une **loi de comportement EVP prenant en compte le vieillissement**
 - Description des comportements transitoires et de la sensibilité des comportements asymptotiques aux températures max.
- Disposer d'un « outil métallurgique » permettant **une prise en compte de l'effet de la composition chimique** sur le vieillissement

- Disposer d'un critère de fatigue adapté à la **description de l'endommagement** dans le cas de **cycles non stabilisés**

■ Dimensionnement fiabiliste

- Comment gérer le cumul dans un cas où le **comportement n'est pas stabilisé ??**
- Quelle démarche adoptée pour construire une loi d'endommagement global/local avec prise en compte du vieillissement?

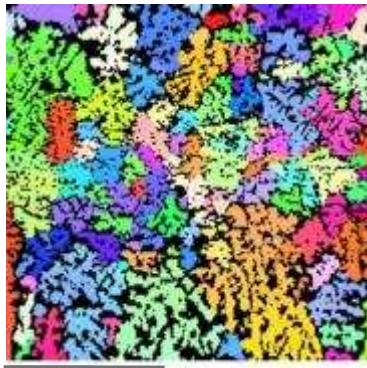
$$??? \Delta W = f(A_{structure}, \Delta \rho, \dot{\rho}, \Delta t, t_0, t_{hold} \dots \text{Vieillissement}) ???$$

Vers un modèle EVP avec prise en compte du vieillissement

- Quelle solution pour rendre compte du vieillissement et retranscrire l'effet de la composition chimique ?
 - S'intéresser au lien entre microstructure et comportement mécanique

Macrostructure

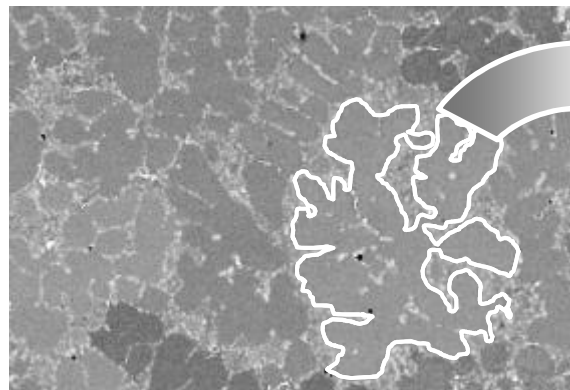
mm



1 mm

Grains

μm



200 μm

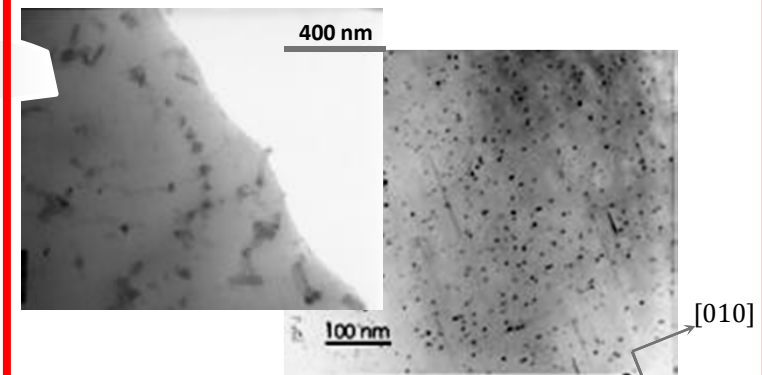
Dendrites

Aggrégats eutectiques :

- Composés intermétalliques
- Particules interdendritiques de silicium

Microstructure

nm



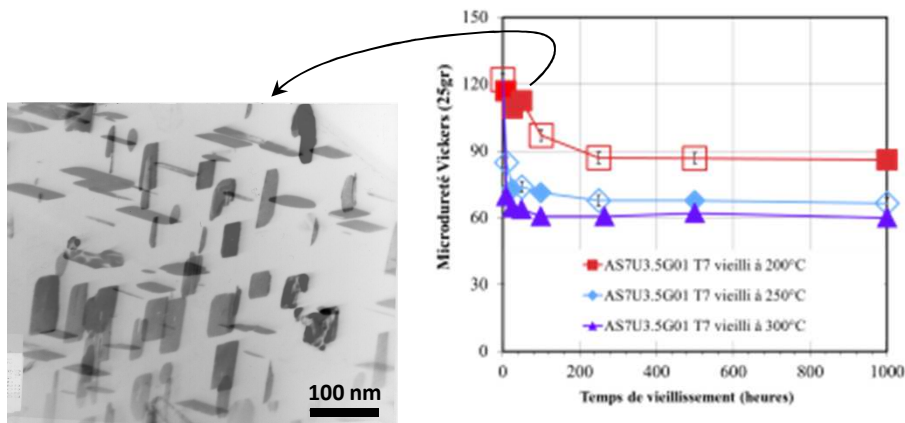
Précipitation durcissante

Vers un modèle EVP avec prise en compte du vieillissement

■ Quelques éléments de relations entre composition chimique et vieillissement

AlSi7Cu3,5Mg T7

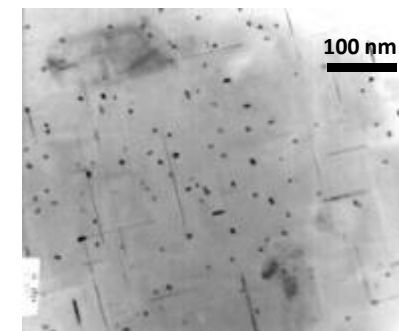
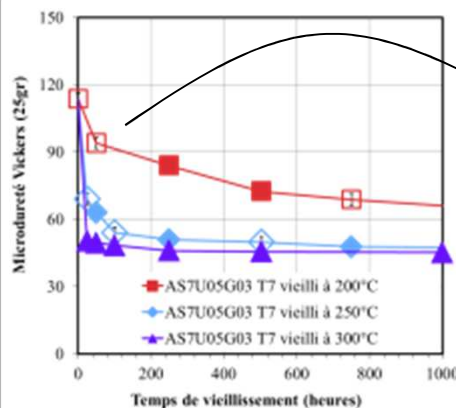
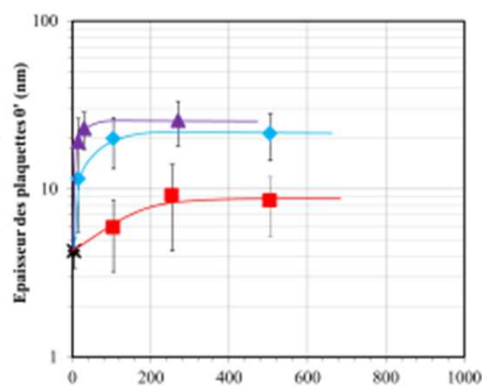
AlSi7Cu05Mg03 T7



MET. Champ sombre, faisceau faible

[001]
[010]
[100]

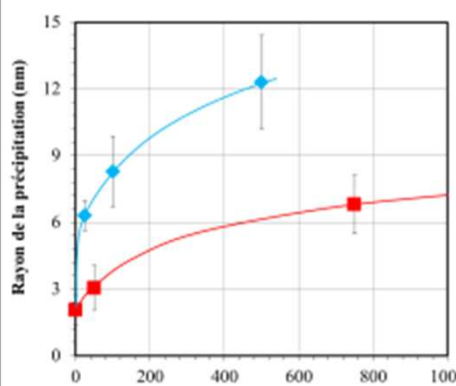
Cinétique de précipitation



MET. Champ sombre

[010]
[100]

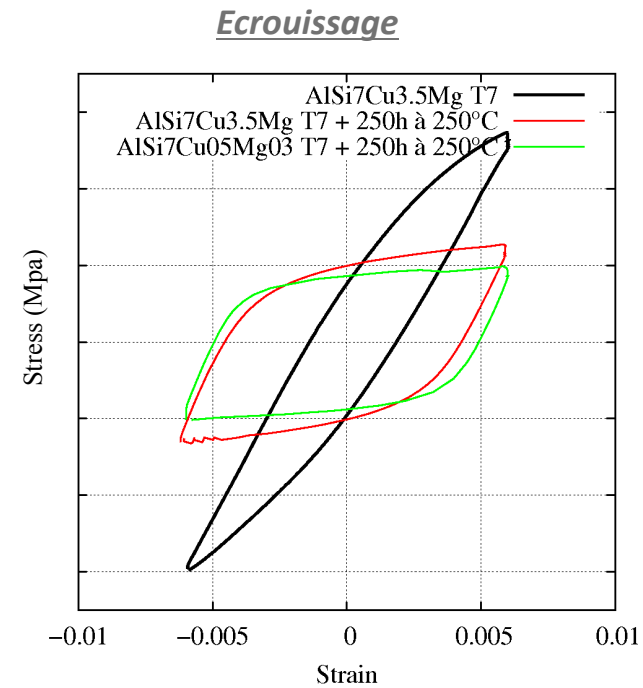
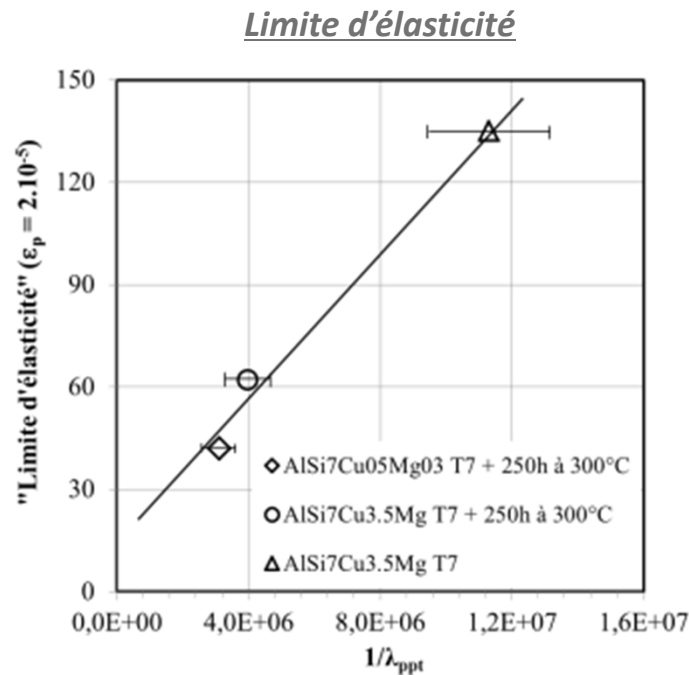
Cinétique de précipitation



Vers un modèle EVP avec prise en compte du vieillissement

■ Quelques éléments de relations entre microstructure de précipitation et comportement mécanique

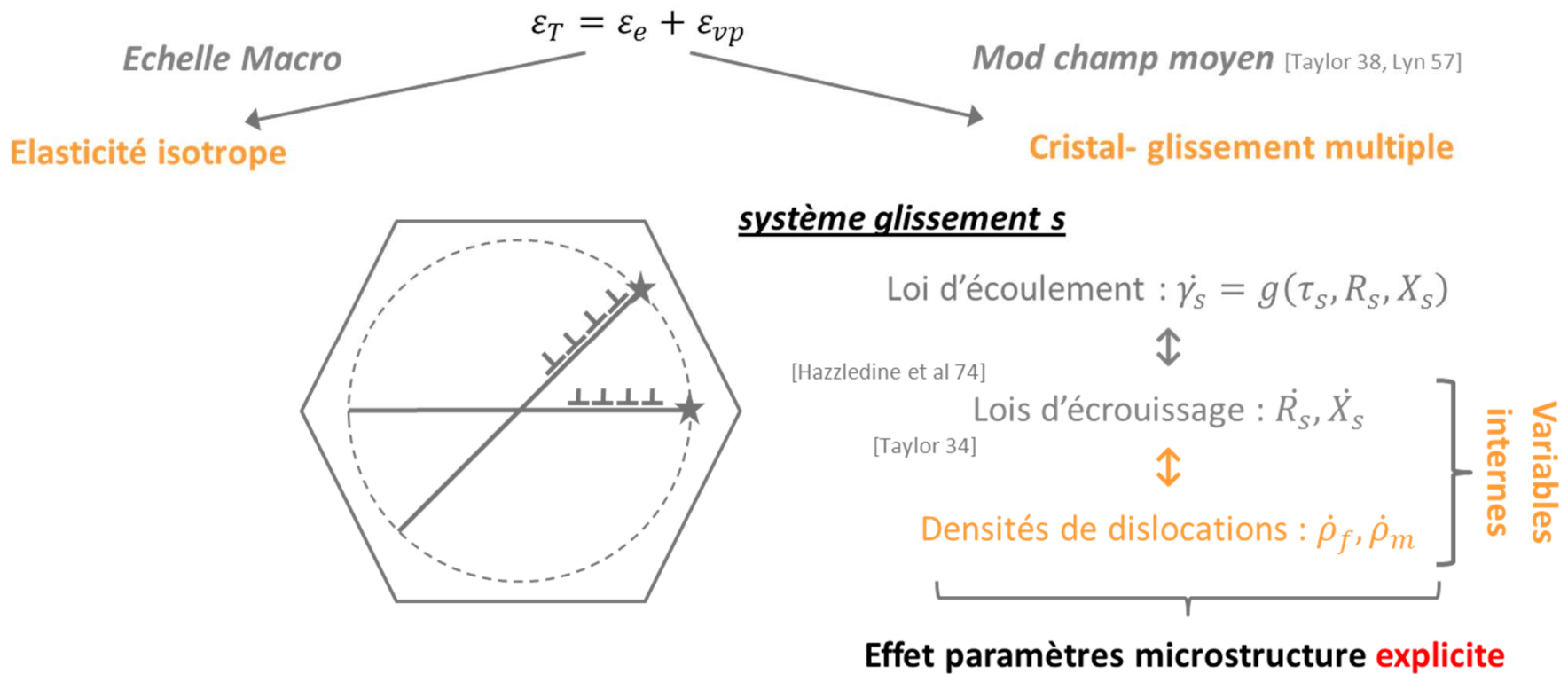
- Domaine largement documenté dans la littérature scientifique : [Brown et al 71], [[Hazzledine et al 74], [Moam et al 79]... [Proudhon et al 08], [Fribourg et al, 11]... :
- Paramètres microstructuraux clés : Distances interprécipités λ_{ppt} , Fraction volumique de précipités f_v , Rayon de la précipitation r_{ppt}



Vers un modèle EVP avec prise en compte du vieillissement

- Quelques ingrédients d'un modèle EVP avec prise en compte de vieillissement :
 - Nécessité d'introduire des grandeurs métallurgiques dans les équations pilotant le comportement

Démarche proposée



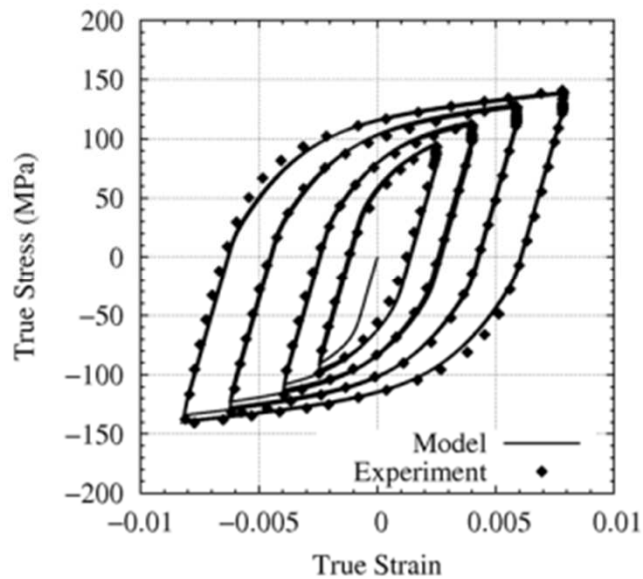
Vers un modèle EVP avec prise en compte du vieillissement

■ Quelques précisions :

- 10 constantes connues ($N, b, k_B, \mu \dots$)
- 12 paramètres ajustables
- 4 paramètres microstructuraux : $\lambda_{ppt}, f^v, r_{ppt}$ et l_{ppt}

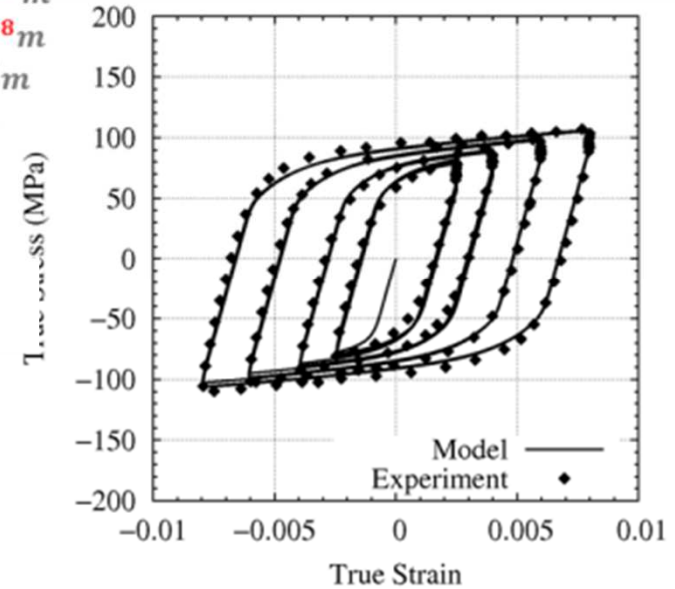
■ ... et résultats :

AlSi7Cu3,5Mg T7 état vieilli stabilisé



$\lambda_{ppt} : 2,9 \cdot 10^{-7} m$
 $r_{ppt} : 5,2 \cdot 10^{-8} m$
 $l_{ppt} : 1,2 \cdot 10^{-7} m$
 $f^v : 0,047$

AlSi7Cu05Mg03 T7 état vieilli stabilisé



$\lambda_{ppt} : 3,2 \cdot 10^{-7} m$
 $r_{ppt} : 3,9 \cdot 10^{-8} m$
 $l_{ppt} : 9 \cdot 10^{-8} m$
 $f^v : 0,045$

Essais d'écrouissage cyclique à 25°C

Et l'évolution de la microstructure de précipitation ?

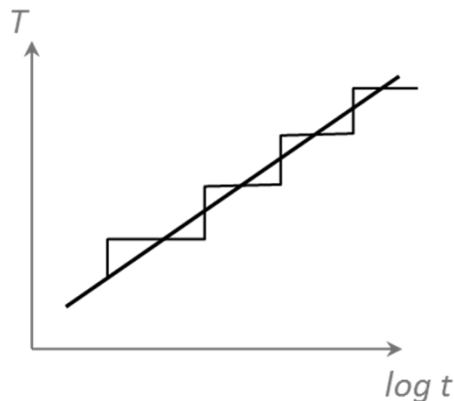
- Dernièrement, de nombreux travaux traitant de la modélisation de la cinétique de précipitation, notamment pour la simulation de procédés industriels (ex : **Friction Stir Welding**) ont vu le jour :
 - ◆ [Deschamps et al, 99], [Myhr et al 00], [Grong et al 02] ... [Martinez et al, 12]

■ Deux approches pour modéliser l'évolution de la précipitation :

Approche en rayon moyen

$$(\bar{r}_{ppt}, \bar{f}_v, \bar{l}_{ppt}) = g(T, t, C_1, C_2 \dots)$$

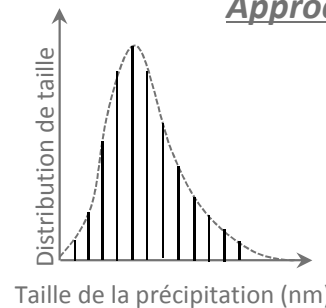
C_1, C_2 : variables d'état



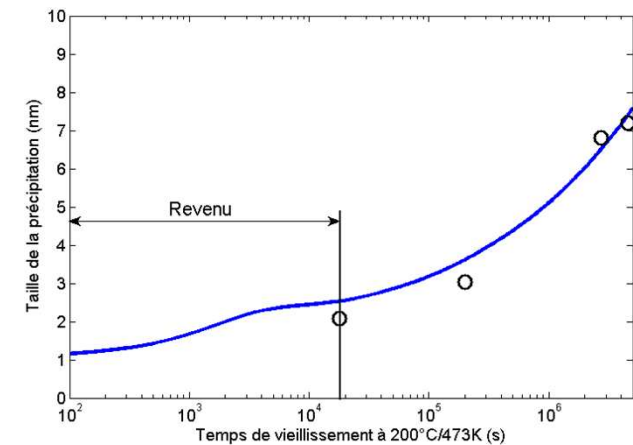
Ne permet la description que d'**u** chaque

Sensibilité aux transitoires thermiques moteurs ??

Approche en classe de taille



Permet une **description simultanée de la croissance et de la dissolution**
 Mais + lourde en temps de calcul



Quelques pistes pour l'endommagement et le cumul

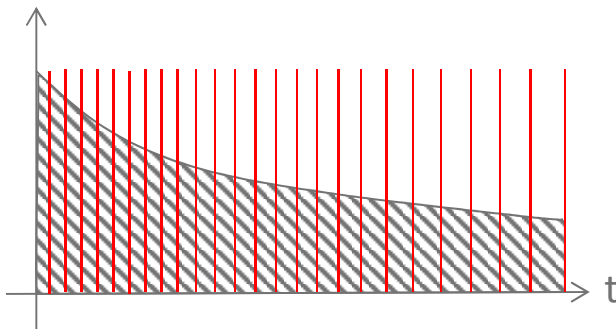
- Le critère de fatigue est exprimé à partir d'une densité d'énergie inélastique dissipée par cycle accommodé
 - ◆ L'état de vieillissement influence-t-il sur les mécanismes d'endommagement ?

$$N_{Cycle} = \left(\frac{\Delta W_{Cycle}}{A_0} \right)^\beta \quad \forall \lambda_{ppt}, f^v, r_{ppt} \text{ et } l_{ppt}$$

- Quelques idées de cumul, en conservant l'hypothèse d'un endommagement et d'un comportement découplés

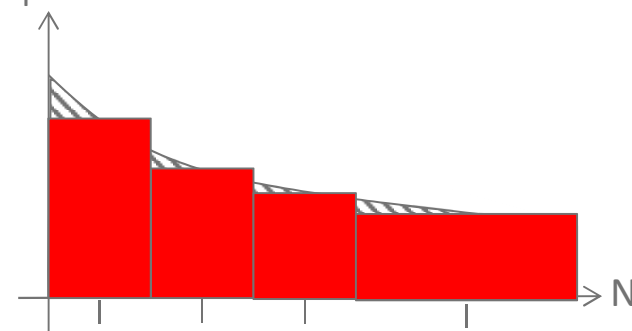
Calcul temporel

- ◆ Calcul avec couplage fort microstructure – comportement et cumul en « micro-bloc »



Calcul incrémental en vieillissement

- ◆ Calcul avec couplage faible microstructure – comportement et cumul en « macro-bloc »



Conclusions

... la perspective est belle :

- Outil permettant une compréhension fine du comportement et de l'endommagement nécessaire dans le cadre du développement d'alliages d'aluminium de plus en plus « stable » à haute température.
- Outil d'étude statistique affinée de la sévérité client par contrôle du vieillissement matériau (microdureté)
- Et si nous pensions un peu au procédé ...

... mais la route vers une prise en compte du vieillissement dans le dimensionnement fiabiliste à la fatigue thermomécanique est encore longue ...

- Endommagement vs vieillissement ?
- Existence d'un couplage vieillissement-plasticité ?
- Comment gérer le cumul en comportement transitoire ?
- Et l'ordre des cycles dans tous ça ?
- Et la loi d'endommagement global / local ?

Thèse en cours

Merci de votre attention