



**LaMCoS**

Laboratoire de Mécanique  
des Contacts et des Structures  
**UMR 5259**

A. Duval<sup>1</sup>, J. Teixeira  
Alves<sup>2</sup>, J.P. de Vaujany<sup>1</sup>, M.  
Guinand<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>LaMCoS, <sup>2</sup>Mecalam

---

# Modélisation du comportement sous charge des engrenages faces *via* une approche iso-géométrique

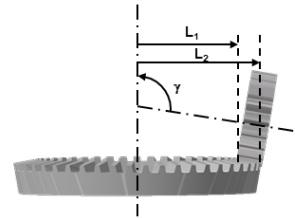
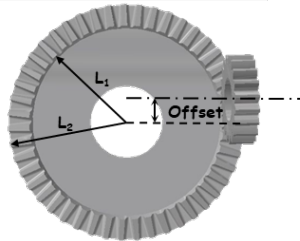
---

# ENGRENAGES FACES

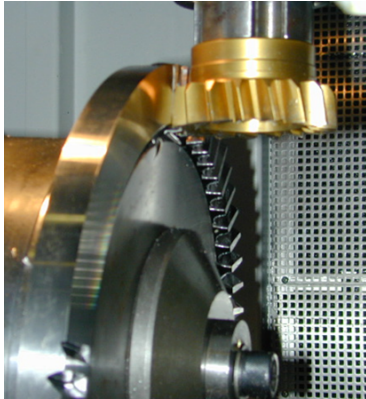
- 1 Engrenages faces
- 2 GANDALF
- 3 FaceLAM
- 4 Conclusion

# Les engrenages faces - Description

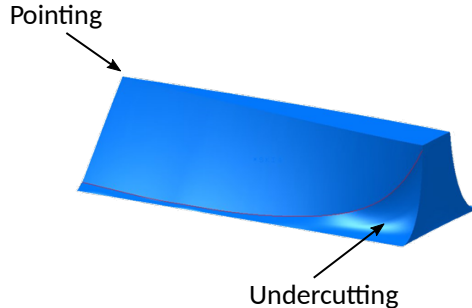
- Roue plate ou conique, caractérisée par ses rayons intérieur et extérieur
- Pignon cylindrique en développante
- Assemblage défini par un angle en tête et un offset



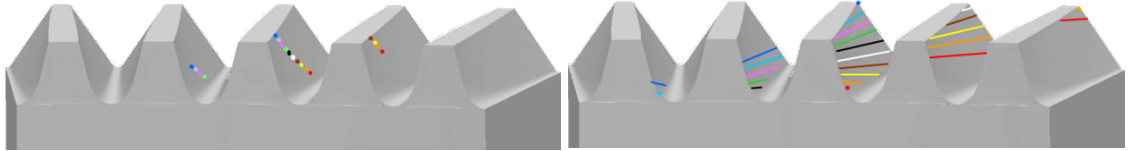
# Les engrenages face - Fabrication



- Taillage à l'outil pignon (= ou  $\neq$  pignon fonctionnement)
- Roue face
  - Pointing au rayon extérieur
  - Undercutting au rayon intérieur



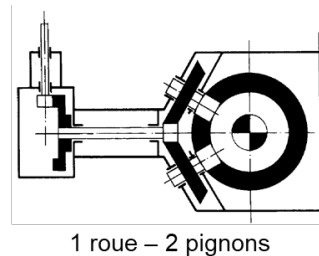
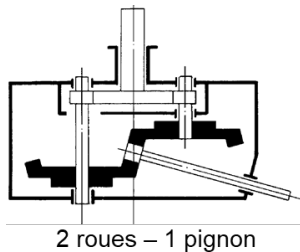
# Les engrenages faces - Fabrication



**Contact ponctuel** : outil et pignon avec nombre de dents différent

**Contact linéaire** : outil et pignon avec même nombre de dents

# Les engrenages faces - Avantages



Division de couple

Liberté de choix de l'angle de tête  
Liberté axiale du pignon

# GANDALF

- 1 Engrenages faces
- 2 GANDALF**
- 3 FaceLAM
- 4 Conclusion

# Programme Européen Brite Euram FACET

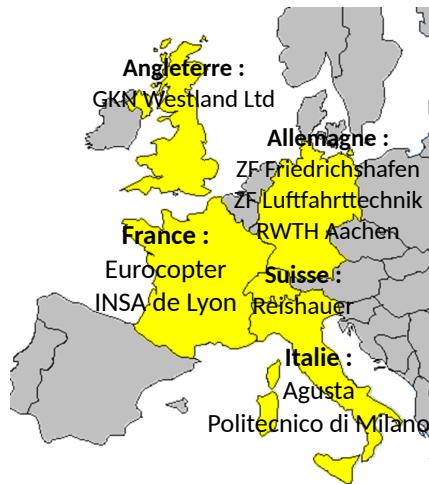
(années 2000)

9 partenaires : 6 industriels, 3 universitaires

## INSA

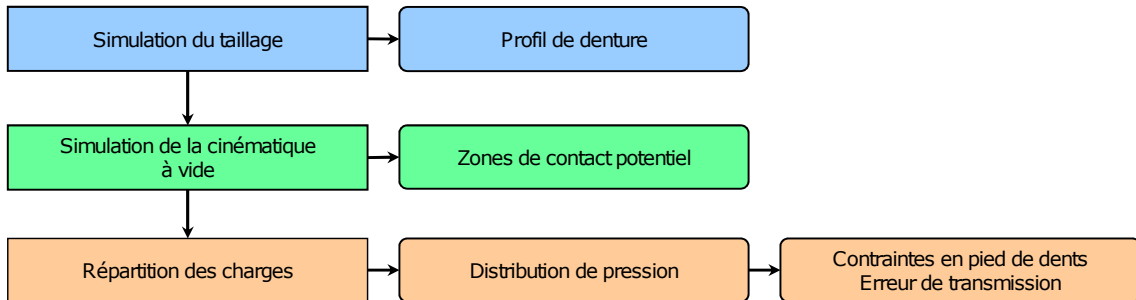
Études théoriques

- Formalisation de la définition des engrenages faces
- Étude et optimisation du comportement sous charge
- Développement d'un logiciel de simulation : **GANDALF**  
Generation, **AN**alysis and **D**esign **Aid** for **L**oaded **F**ace gears

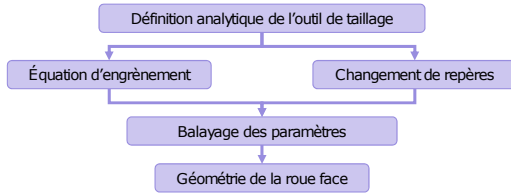




## Modélisation en 3 étapes



# Géométrie : méthode de Litvin améliorée



## Roue face

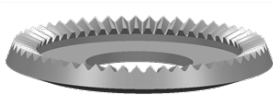
- Outil hélicoïdal, déporté, à tête pointue ou arrondie
- Erreurs de taillage
- Localisation maîtrisée des points de définition de la roue
- Précision de la définition des extrémités des dents
- Prise en compte des interférences de taillage et de pointe

## Pignon

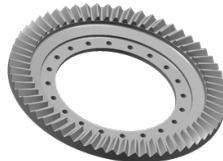
- Prise en compte des corrections de profil et de bombé



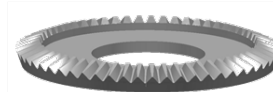
Roue à 70°



Roue hélicoïdale



Roue à 110°

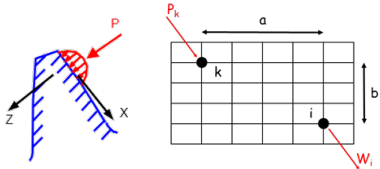


# Répartition des charges

## Objectifs

- Partage des charges entre les dents
- Distribution de pression instantanée
- Erreur de transmission sous charge
- Contraintes en pied de dent

## Contact

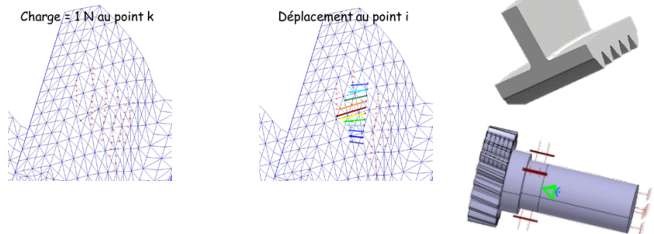


Théorie de Boussinesq

## Résolution de l'équation de compatibilité des déplacements

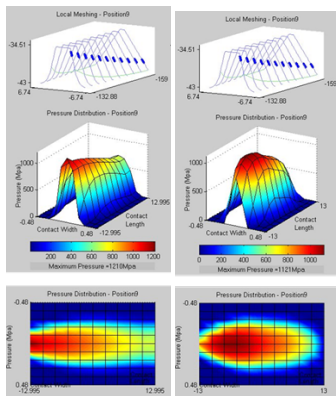
- Méthode semi-analytique
- Séparation des effets de flexion et de contact
- Utilisation de coefficients d'influence
- Résolution sur 5 dents en contact simultanément

## Flexion

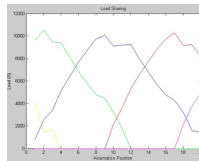


Calculs EF, pour chaque position cinématique et chaque dent  
 Solide généré automatiquement dans CATIA  
 Calculs orchestrés par des macro-commandes  
 A. Duval *et al.* (\*LaM\*)

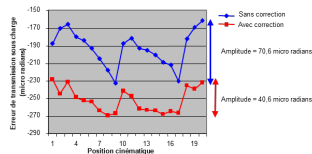
# GANDALF - Résultats



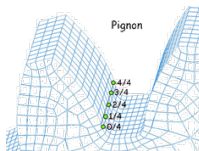
Pression avec pignon bombé en présence de désalignement



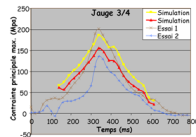
Répartition des charges, pignon optimisé



Réduction de l'erreur de transmission sous charge

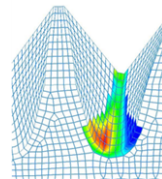


Validation expérimentale avec jauges de déformation



## Guide pour la conception

- Formule rayons extérieur et intérieur
- Abaques et recommandations : rapport de conduite, largeur de denture, déports, nb de dents, ...



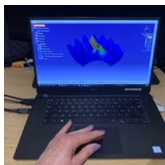
- 1 Engrenages faces
- 2 GANDALF
- 3 FaceLAM**
- 4 Conclusion

# GANDALF → FaceLAM

- Sources en Fortran 77 (années 2000)
- Migrations via procédures Matlab



2001 : CATIA V4  
Station UNIX



2010 : CATIA V5  
PC



2023 : ABAQUS et/ou IGA  
PC

## FaceLAM

Ré-écriture complète en Python

- Amélioration : les calculs de flexion en particulier et la géométrie

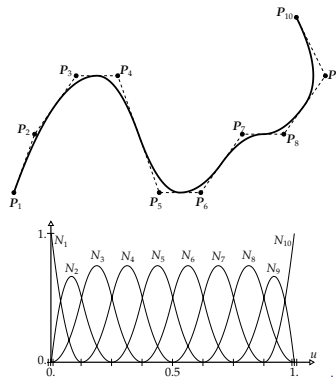
# Analyse isogéométrique

- Renforcer le lien CAO/calcul → Utilisation des B-Splines et des NURBS dans la méthode des éléments finis
- Géométrie représentée de façon paramétrique
- ex : courbe, 1 paramètre

$$C(u) = (x(u), y(u)) \quad \forall u \in \mathcal{U}$$

$$C(u) = \sum_{i=1}^n N_i(u) P_i \quad \forall u \in \mathcal{U}$$

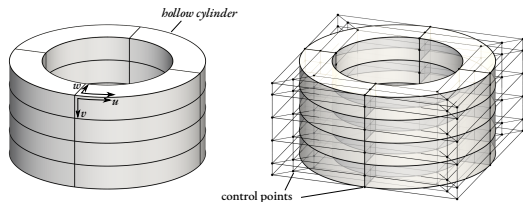
- B-Splines :  $N_i$  polynômes
- NURBS :  $N_i$  fractions rationnelles



# Analyse isogéométrique

## ■ Description d'un volume

- 3 paramètres
- Structure en produit tensoriel
- ⚠ CAO : représentation des frontières uniquement (B-rep)



$$V(u, v, w) = \sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} \sum_{k=1}^{n_w} L_i(u) M_j(v) N_k(w) P_{ijk}$$

- IGA : même fonctions pour décrire la géométrie et l'espace d'approximation  $\nu$

$$S = \sum_{A=1}^n R_A P_A$$

$$u = \sum_{A=1}^n R_A u_A$$

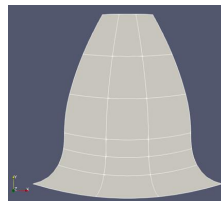
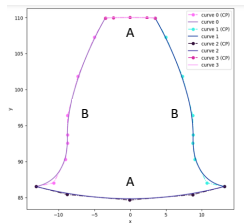
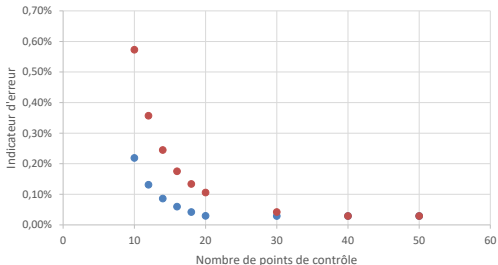
$$\Rightarrow Ku = F$$



# Application à un pignon cylindrique en développante

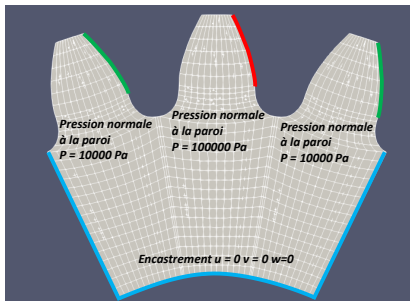
- 2D : construction des courbes limites par approximation
- Erreur maîtrisée (choix du degré et de la discrétisation)


Erreur en fonction du nombre de points de contrôle



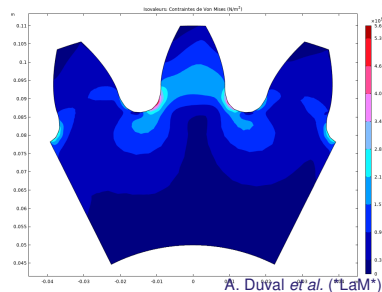
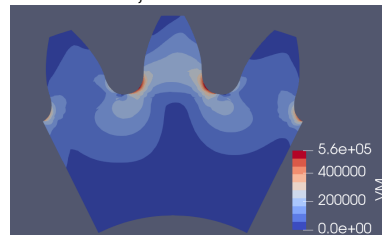
- Construction des points de contrôle intérieurs : Coons

# Validation : analyse statique

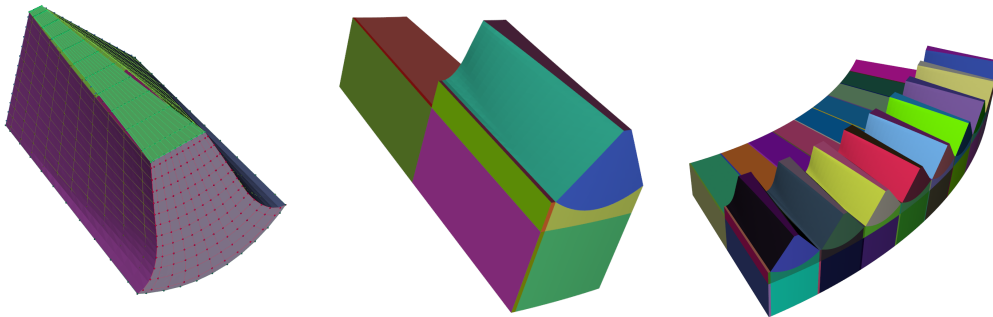


- Construction jante + dents adjacentes : maillage conforme
- Analyse : code maison (YETI) 

$\sigma^{VM}$ , IGA .vs. FEM



# Géométrie : génération d'une roue face

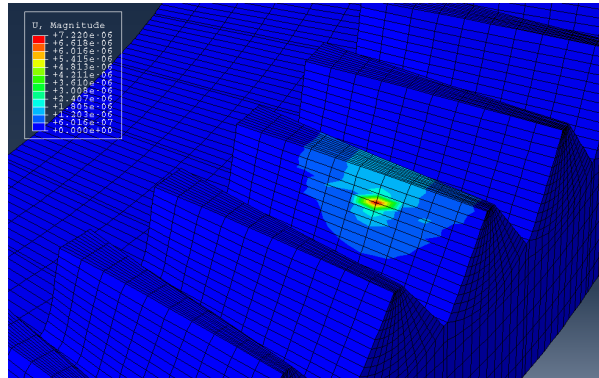
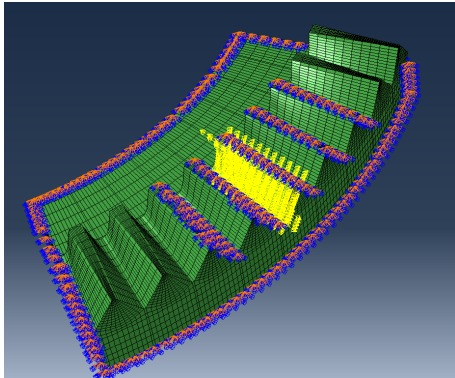


- Flanc de dent : génération d'une nuage de points (méthode Litvin)
- Approximation de la surface du flanc de dent
- Construction de volumes B-Splines compatibles (Coons + extrusions + répétitions circulaires)



# Calcul des coefficients d'influence de structure

- Volumes B-Splines → interpolants (extraction de Bezier)
- 1 cellule B-Spline = 1 élément fini hexahédral
- Calcul des coefficients d'influence de structure : Abaqus



## CONCLUSION

- 1 Engrenages faces
- 2 GANDALF
- 3 FaceLAM
- 4 Conclusion**

# Fonctionnalités de FaceLAM

- Développements achevés
  - Module de géométrie validé pour les montages à  $90^\circ$  et dentures droites
  - Cinématique à vide dans le cas linéaire et ponctuel
  - Corrections du pignon (profil + bombé)
- Partage de charges en cours de validation
- Évolutions pour être au niveau de GANDALF
  - Dentures hélicoïdales + montage  $\neq 90^\circ$
  - Prise en compte des erreurs de taillage et de montage

# Poursuite des développements

- Interpolation des coefficients d'influence de structure en tout point
  - Diminution du temps de calcul global
  - Utilisation d'une base polynomiale (cf J. Teixeira)
  - Utilisation des fonctions B-Splines de la géométrie
- Utilisation du code maison YETI (IGA) pour le calcul des coefficients de structure
  - Raccords de maillage non conformes
  - Décomposition de domaine avec/sans recouvrement
  - Ouverture vers l'optimisation de forme de la structure



# Merci de votre attention !