

Réduction du bruit de crissement de freins à disques ferroviaires Projet **AcouFren**

Olivier Chiello

08/06/2011 – JTAV – Aix-en-Provence



IFSTTAR

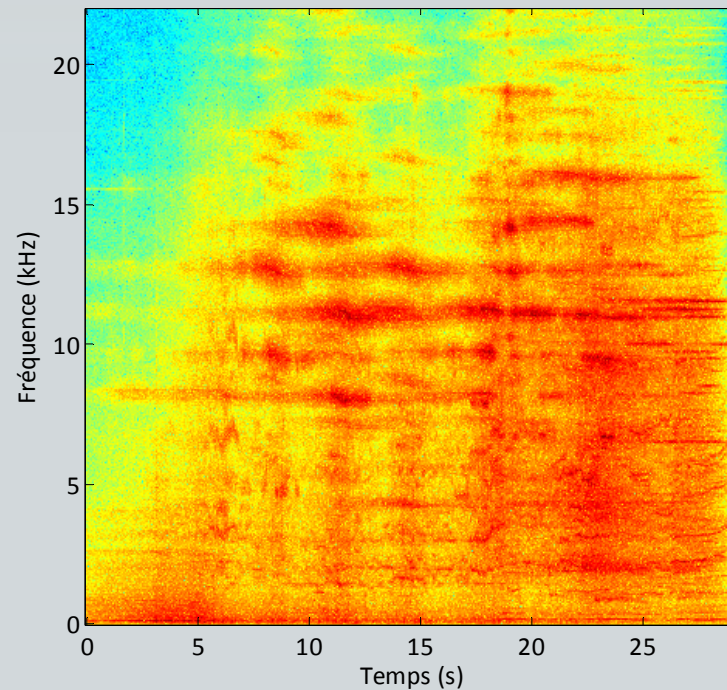
Plan de l'exposé

- Problématique générale
- Problématique scientifique – Etat de l'art
 - Littérature
 - Projet CRISFIS
- **Projet AcouFren**
 - Objectifs – Programme de travail
 - Premiers résultats
- Conclusion



Ça crisse !

□ Arrivée des TGV en gare



- Systématique
- Jusqu'à 106 dB(A) à 1 m du bord du quai
- Spectres de raies de 1 à 15 kHz
- Evolution en cours de freinage



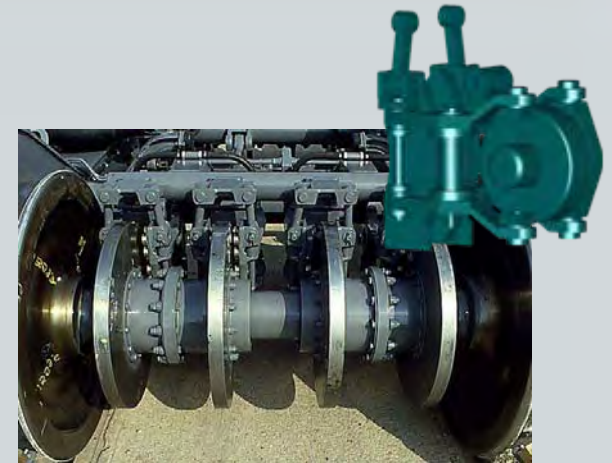
Réduire le bruit au freinage des trains

□ Pourquoi ?

- Gêne des usagers et des riverains
- Masquage des messages audio/urgences
- Limitation prévue dans la réglementation européenne (STI)

□ Ou agir ?

- sur les systèmes de freinage
 - Coûteux
 - Perspective à moyen terme
- sur les garnitures (consommable)
 - Coût maîtrisable
 - Envisageable à court terme
 - ▶ Inclusion de critères acoustiques dans la spécification ?



Ce que l'on connaît

□ Dans la littérature

- Dynamique des structures en contact frottant
 - Modélisation du contact frottant
 - Méthodes de calcul en dynamique non linéaire
- Mécanismes de génération du crissement

□ Résultats du projet CRISFIS 2005/2008

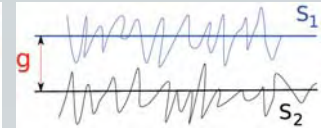
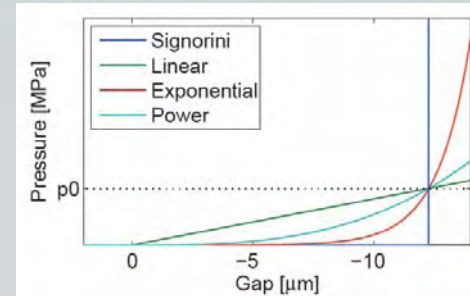
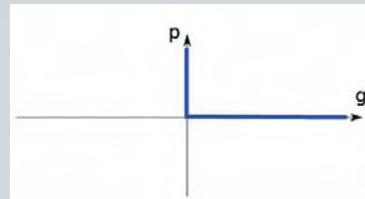
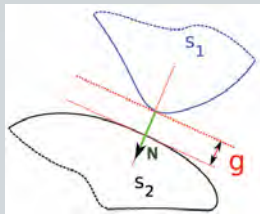
- ▶ Système TGV / 2 types de garniture
- Caractérisation du crissement
 - En gare / embarquées / au banc
- Modélisation du crissement
 - Avancées générales
 - Validation partielle d'un modèle simplifié en HF pour une garniture



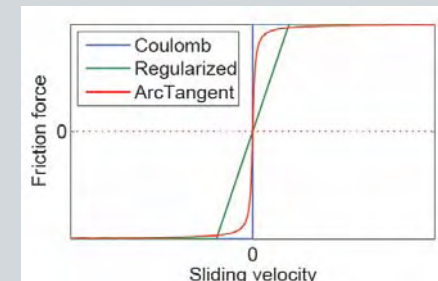
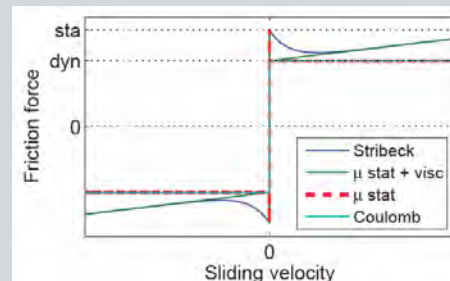
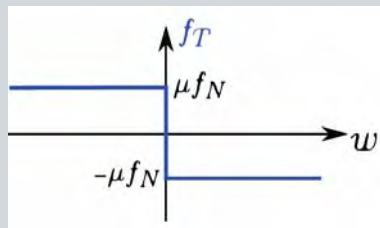
Modélisation du contact frottant

□ Lois locales en MMC : approche « structures »

■ Contact



■ Frottement



G. Vermot des Roches, Thèse 2011

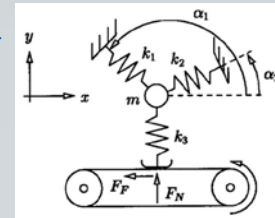
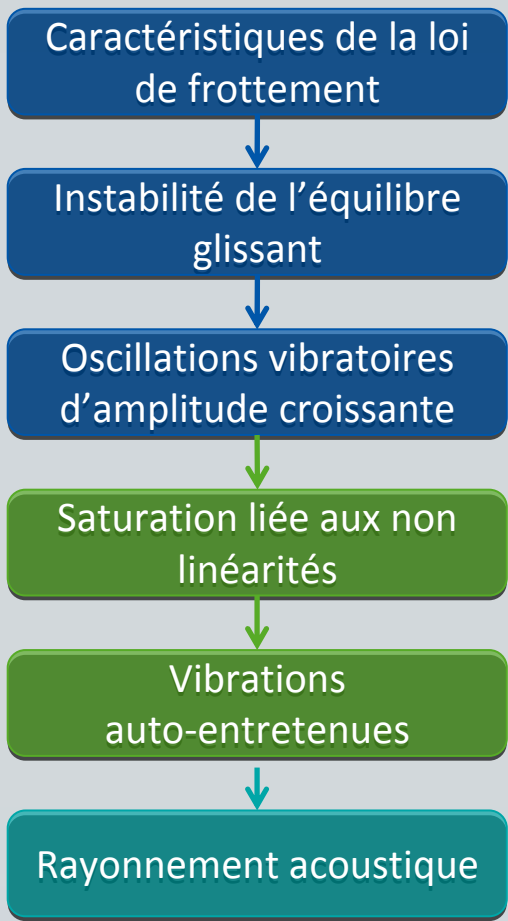
□ Approches « tribologiques »

- Zoom sur le contact : rugosité aux petites échelles
- Comportement mécanique limite des aspérités
- Usure et 3^{ème} corps : dégradations, films, débris compactés

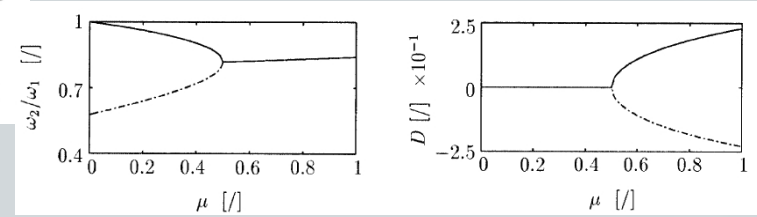


Mécanisme de génération du crissement

- Variation du coefficient de frottement
- Non symétrie



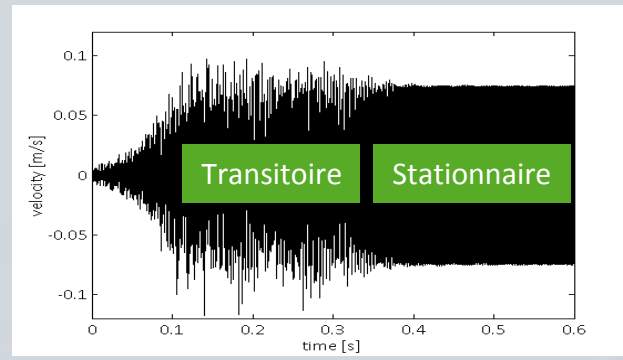
N. Hoffmann et al., JSV 2002



Vibration linéaires
Non conservatif
Glissement

- Modes complexes**
- Déformées propres
 - Fréquences propres
 - Taux de divergence

Vibrations non-linéaires
Glissement, adhérence et/ou décollements locaux



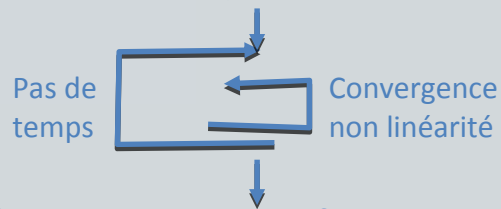
Méthodes en dynamique non linéaire

Discrétisation spatiale (MEF, ...)

$$\ddot{M}u + \dot{C}u + Ku = F + R_N + R_T \quad \text{avec} \quad (R_N, R_T) = f(u, \dot{u})$$

Calcul transitoire par intégration numérique

- Schéma d'intégration (implicite / explicite, 1^{er} / 2^{ème} ordre, ...)
- Résolution des équations non linéaires



- ▶ Fenêtre de simulation finie
- ▶ Solution liée aux conditions initiales

Calcul direct de la solution stationnaire

- Méthodes basées sur le DL des termes non linéaires (variété centrale, forme normale)
- Méthode de la balance harmonique (HBM)
- Méthodes basées sur le concept de modes non linéaires

- ▶ Cycles limites d'une forme donnée
- ▶ Pas de lien avec les conditions initiales

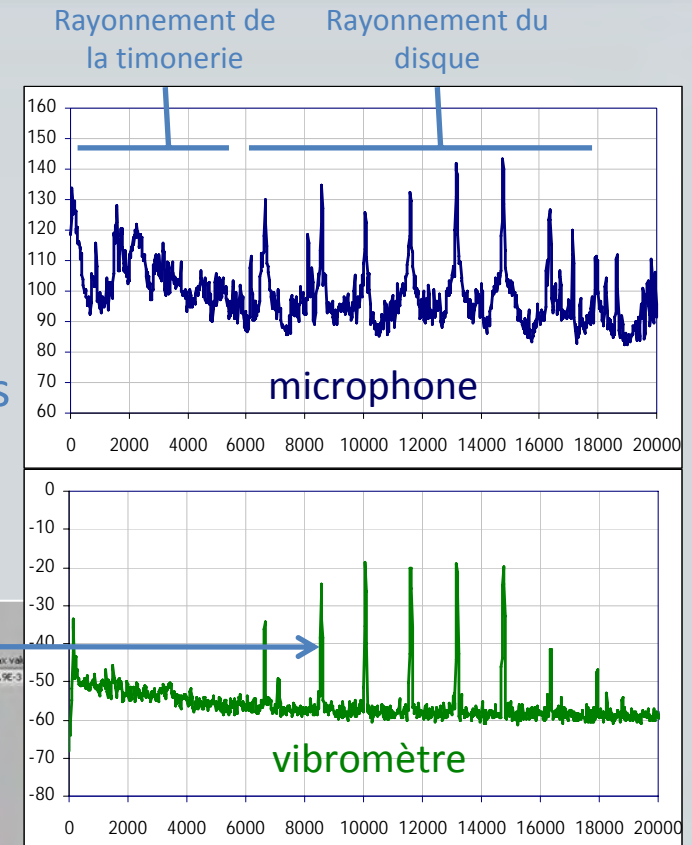
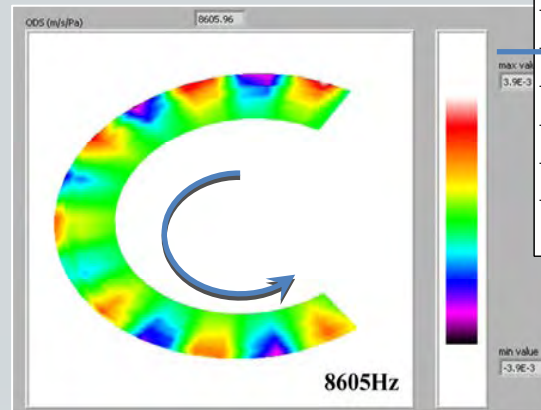


Non linéarités fortes + nombre élevé de degrés de liberté



CRISFIS : caractérisation du crissement TGV

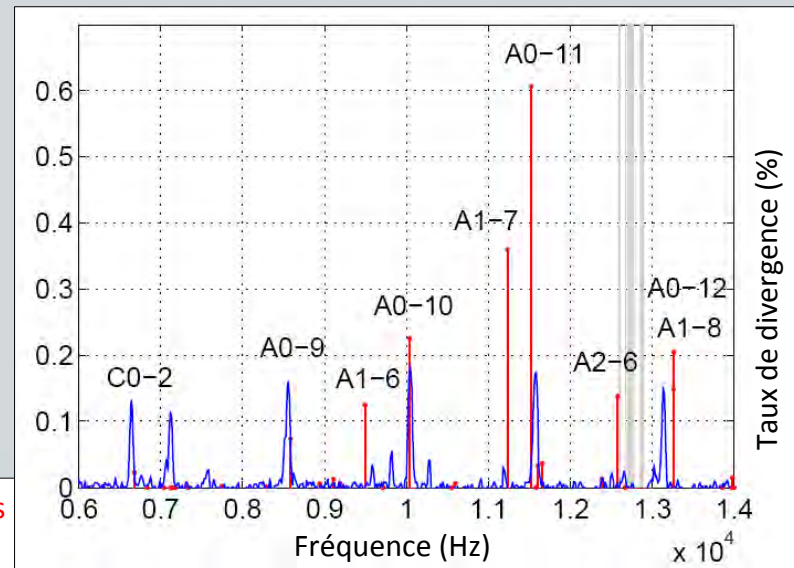
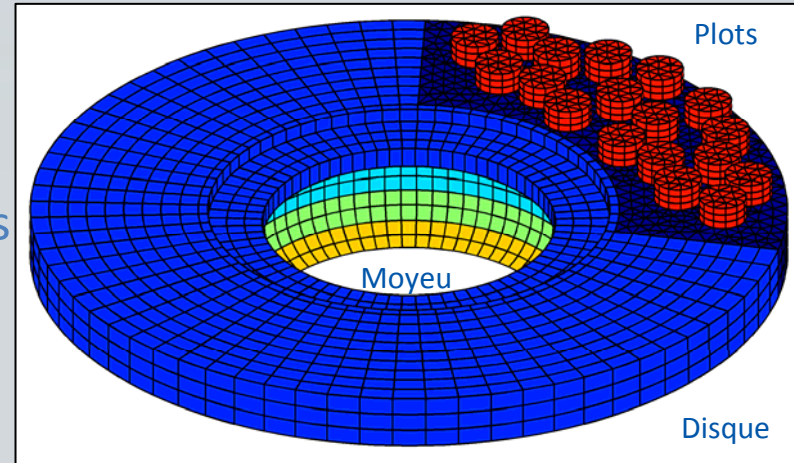
- En gare
 - Analyse statistique du crissement
- Embarquées
 - Zoom sur 2 garnitures
 - Identification des structures rayonnantes
- Au banc
 - Déformées spatiales



CRISFIS : modélisation du crissement TGV

- **Modèle EF simplifié**
 - Timonerie rigide
 - ▶ Adapté aux hautes fréquences
 - Contact frottant basique
 - Contact unilatéral
 - Frottement Coulomb $\mu = \text{cst}$
- **Recalage disque libre**
 - ▶ Erreurs fréquences < 3 %
- **Etude de stabilité**
 - Nombreux modes instables
 - Rôle de l'axi-symétrie
 - Validation partielle

— Fréquences des modes de disque instables
 — Spectre expérimental



CRISFIS : autres résultats de modélisation (1)

□ Développement d'une méthode de calcul transitoire par intégration numérique

X. Lorang, Thèse 2007

- Schéma d'intégration : θ -méthode modifiée
 - Implicite / 1er ordre
 - Chocs inélastiques
- Algorithme de *point fixe* pour le traitement des non linéarités
 - ▶ Adapté aux lois de contact frottant non régulières
 - ▶ Très peu de paramètres de contrôle
 - ▶ Temps de calculs longs ...

□ Développement d'une méthode d'analyse *a posteriori* de la solution temporelle

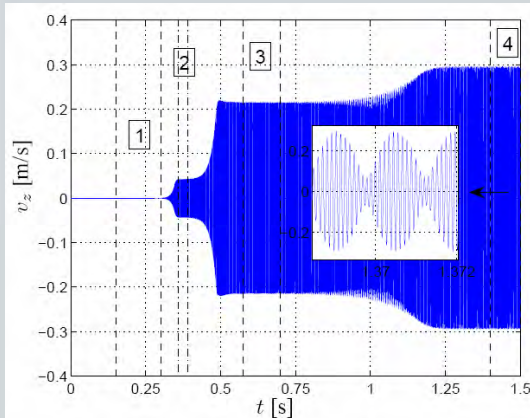
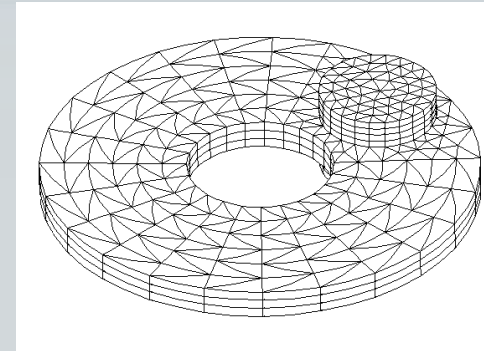
X. Lorang et O. Chiello, NMFM 2008

- Projection sur les modes complexes issues de l'étude de stabilité
 - ▶ Evolutions modales au cours du temps

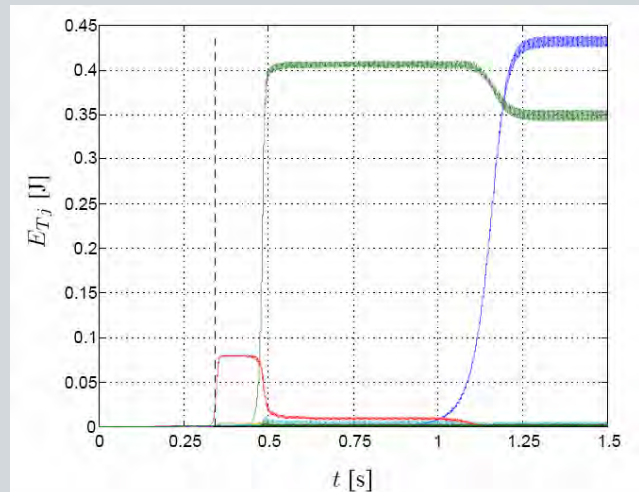
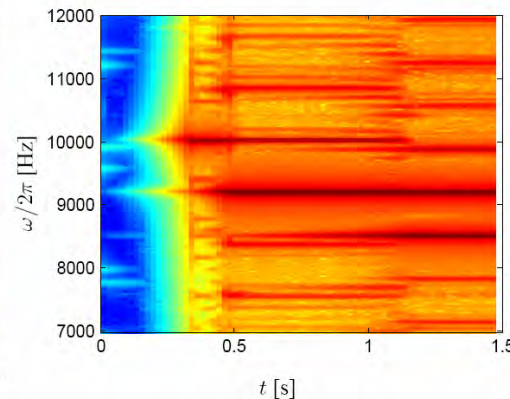


CRISFIS : autres résultats de modélisation (2)

- Application a un modèle EF de petite taille
 - 30000 ddls – [0 -10 kHz]
 - Etude de stabilité : 3 modes instables
 - Analyse temporelle
 - Conditions initiales proches de l'équilibre



vitesse normale locale



Contribution des modes instables

► Perspectives de réduction *a priori* !



Ce que l'on ne connaît pas ...

- **Caractérisation expérimentale**
 - Comportement dynamique des garnitures
 - Matériaux frittés (plots)
 - Armatures, fixations, ...
 - Comportement dynamique de la timonerie
 - Résultats pour des garnitures/systèmes de freinage différents
- **Modélisation**
 - Modèle avec timonerie flexible pour la plage [0 – 5 kHz]
 - Calcul transitoire avec un modèle de grande taille
 - Contributions des modes dans la solution stationnaire ?
 - Niveaux de crissement ??
 - Robustesse du modèle
 - Variation occurrence/niveaux avec les paramètres de garnitures
- ▶ **Peut-on spécifier des garnitures « non crissantes » ?**



Le projet AcouFren

Titre	Outils d'aide à la spécification et à la conception de freins à disque ferroviaires optimisés vis à vis du crissement
Appel d'offre	ANR « Véhicules pour les Transports Terrestres » / PREDIT 3
Axe thématique	Efficacité énergétique des véhicules et réduction des émissions
Financement	ADEME
Durée	3 ans
Démarrage	Janvier 2010
Coordinateur	Exploitant : SNCF
Partenaires	Laboratoires : LTDS (ECL), UR Navier (ENPC), LTE (IFSTTAR) Editeur de logiciel : SDTools Constructeurs : Alstom Transport, Bombardier Fournisseurs : Faiveley, Frenotec

- Démarrage effectif en avril 2010
- Retrait de Frenotec fin 2010 en cours de remplacement par Freinrail



Objectifs du projet

Thèse CIFRE d'Andréa Loyer 2008-2011
(SNCF-LTDS-IFSTTAR)

□ Objectifs scientifiques

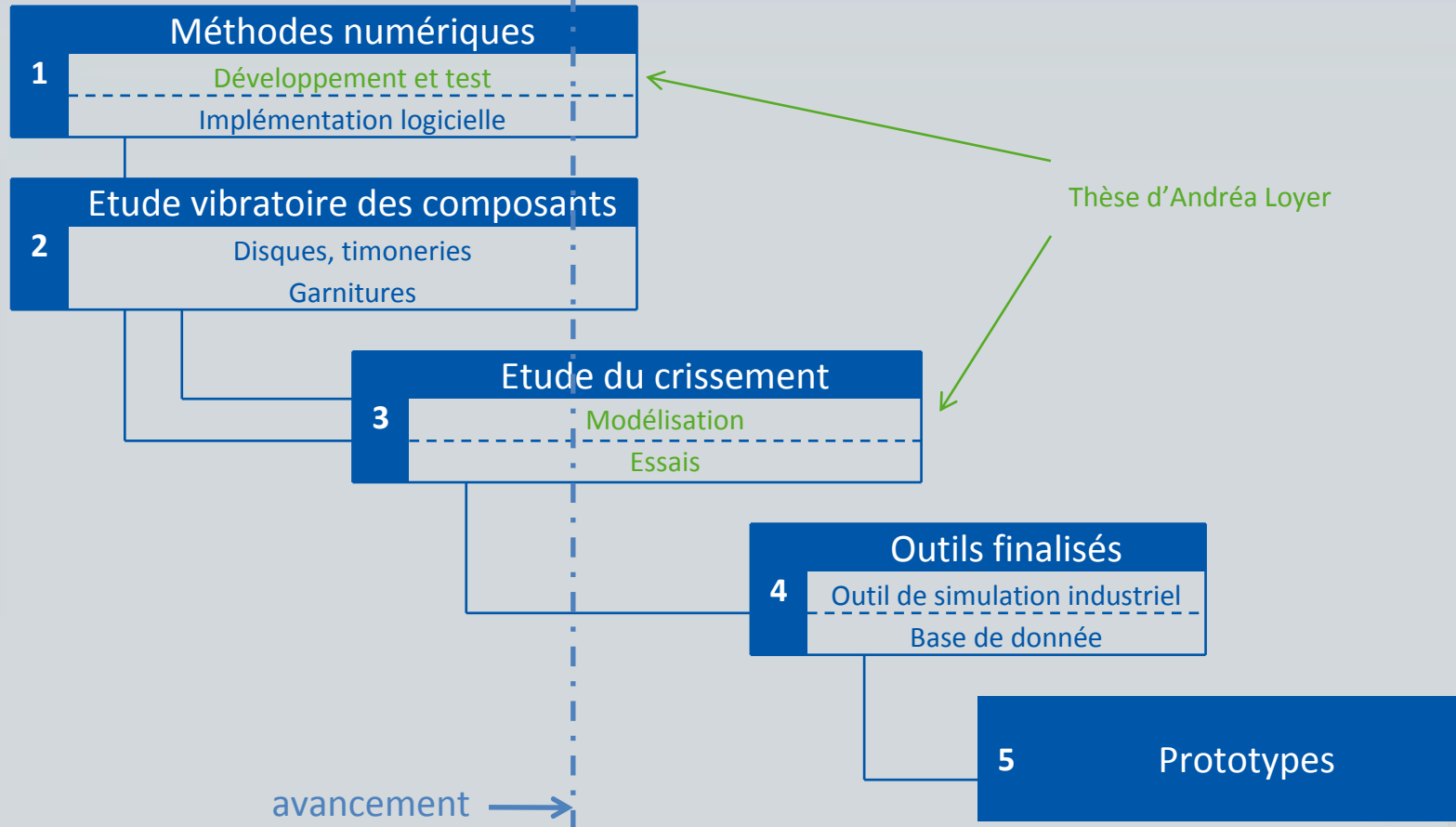
- Une méthode numérique de calcul et d'analyse transitoire des vibrations auto-entretenues
 - adaptée aux spécificités des instabilités de frottement
 - adaptée aux modèles industriels (⇒ réduction + implémentation logicielle)
- Un modèle de crissement de frein à disques ferroviaires
 - capable de prédire des spectres vibratoires et acoustiques
 - capable de reproduire le comportement d'un panel de garnitures (⇒ robustesse)

□ Livrables techniques

- Des outils d'aide à la spécification/conception de garnitures de freins pour 2 systèmes de freinage (TGV et AGC)
 - Un outil de simulation industriel
 - Une base de données expérimentale + une procédure d'essais
- Des prototypes de garnitures conçus par les fournisseurs



Structuration du projet



Programme de travail (1)

Responsable tâche	Tâches	Responsable sous-tâche	Autres acteurs	Contenu
Tâche 1 : Développement des méthodes numériques				
SNCF	1.1	IFSTTAR	SNCF, LTDS	Développement et test des méthodes
	1.2	SDTools	IFSTTAR, SNCF, LTDS	Implémentation dans SDT pour application à des modèles industriels
Tâche 2 : Caractérisation et modélisation vibratoire des composants TGV/AGC				
Vibratec	2.1	Vibratec	SNCF	Disques libres
	2.2	Vibratec	SNCF	Timonerie TGV
	2.3	Vibratec	SNCF	Timonerie AGC
	2.4	Vibratec	Faiveley, Freinrail, SNCF, IFSTTAR	Panel de garnitures
Tâche 3 : Caractérisation et modélisation du crissement TGV/AGC				
IFSTTAR	3.1	IFSTTAR	SDTools, LTDS, SNCF	Modélisation des instabilités vibratoires
	3.2	ENPC *	IFSTTAR	Modélisation du rayonnement acoustique
	3.3 - 3.5	SNCF	IFSTTAR, LTDS, Bombardier	Essais de crissement
	3.4 - 3.6	LTDS	IFSTTAR, SDTools, SNCF	Comparaison modèle/essais

* Développement de méthodes HF : post-doctorat de Mathieu Aucejo (H.-P. Yin, D. Duhamel)



Programme de travail (2)

Responsable tâche	Tâches	Responsable sous-tâche	Autres acteurs	Contenu
Tâche 4 : Développement des outils finalisés				
SNCF	4.1	SNCF	tous les industriels	Capitalisation retour d'expérience
	4.2	SNCF	IFSTTAR, SDTools, ENPC, Faiveley, Freinrail	Outil de simulation industriel
	4.3	SNCF	Vibratec, IFSTTAR	Base de données + procédure d'essai
	4.4	Alstom	SNCF, IFSTTAR	Couplage modèle acoustique global TGV
Tâche 5 : Développement des prototypes				
SNCF	5.1	SNCF	Alstom, Faiveley, Freinrail	Cahier des charges garnitures TGV
	5.2	Faiveley, Freinrail		Fabrication prototypes TGV
	5.3	SNCF		Essais au banc TGV
	5.4	SNCF	Bombardier, Faiveley, Freinrail	Cahier des charges garnitures AGC
	5.5	Faiveley, Freinrail		Fabrication prototypes AGC
	5.6	SNCF	Bombardier	Essais en ligne AGC



Avancement des tâches

- À finaliser
 - Tâche 1.1 : Développement et test des méthodes numériques
 - Tâches 2.1 à 2.4 : Caractérisation et modélisation vibratoire des composants
- En cours
 - Tâche 1.2 : Implémentation des méthodes numériques dans SDT pour application à des modèles industriels
 - Tâches 3.1 à 3.6 : Caractérisation et modélisation du crissement
- En attente
 - Tâches 4.1 à 5.6 : Développement d'outils et de prototypes



Quelle méthode de calcul ?

□ Rappel des objectifs

- Précision
- Adaptation aux modèles de grande taille
- Robustesse : pas de paramètre de contrôle « magique » !

□ Démarche

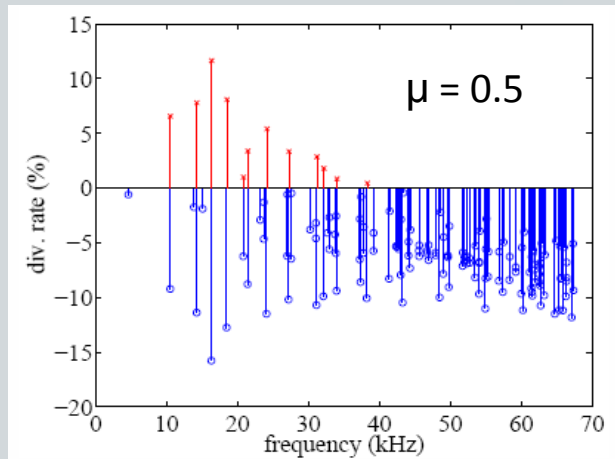
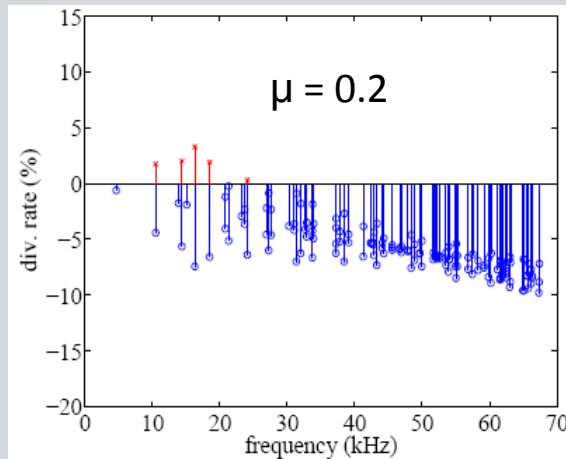
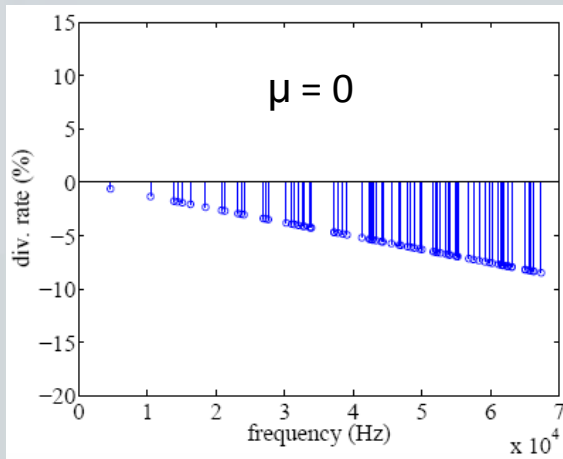
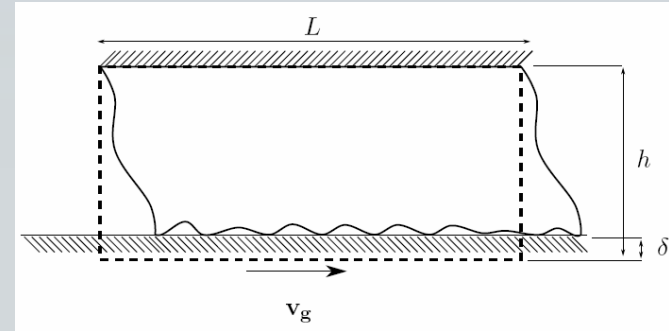
- Améliorations de la méthode « dure » (lois non régulières)
 - Reformulation statique/stabilité avec noyaux de contraintes
 - Test de différents schémas d'intégrations / algorithmes non linéaires
 - Optimisation des paramètres d'augmentation de la méthode du point fixe
 - ▶ θ -méthode/point fixe plus rapide et plus robuste
- Tests de réduction
- Comparaisons avec une méthode « souple » (lois pénalisées)



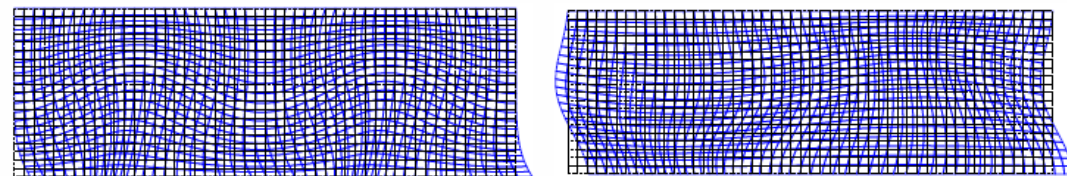
Réduction de systèmes déstabilisés par le frottement

□ Exemple de la couche élastique

- Condition de périodicité sur les bords
- 700 ddls environ
- ▶ Calculs non réduits possibles
- Modes doubles déstabilisés par le frottement

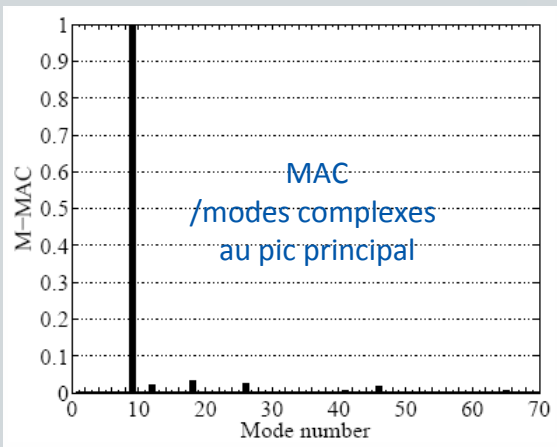
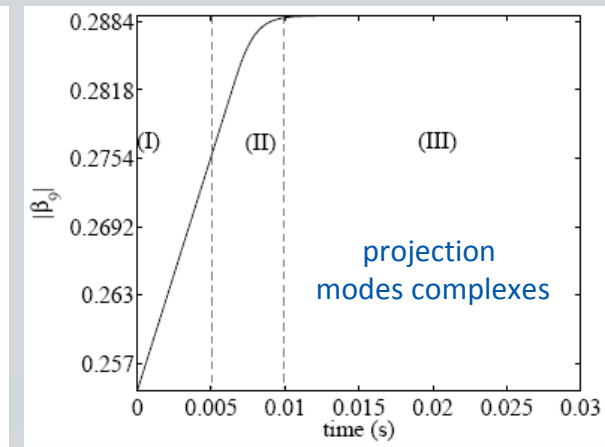
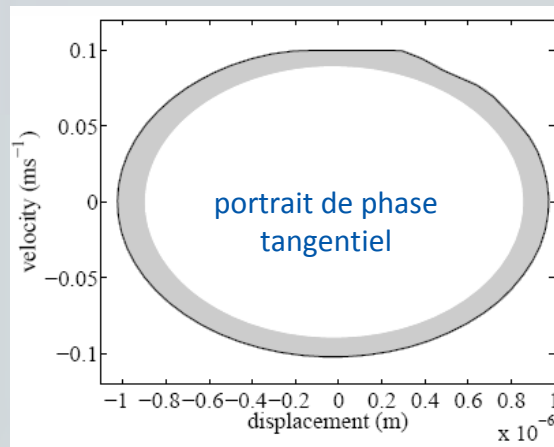
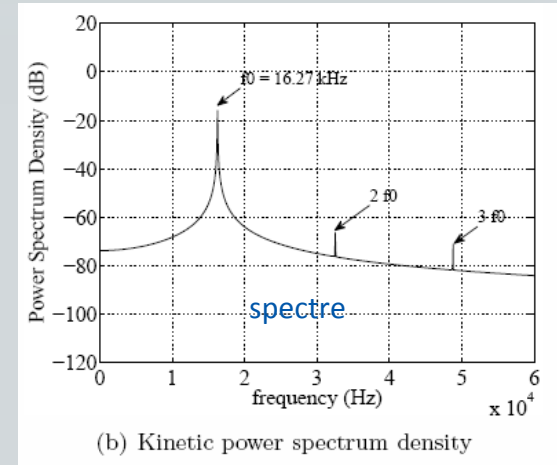
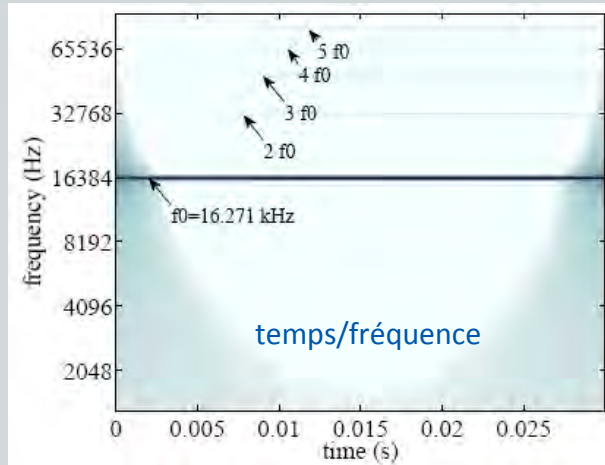
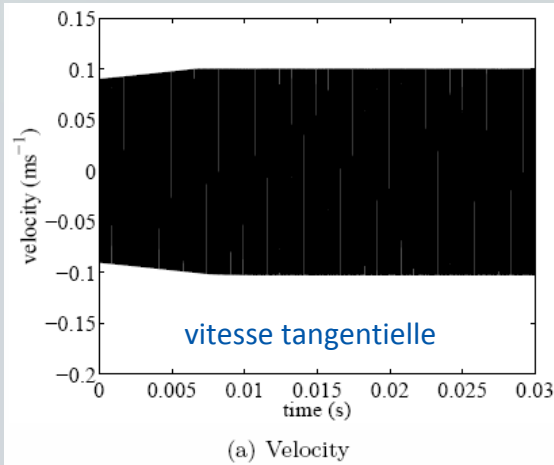


Exemple de modes instables



Exemples de comportements transitoires (1)

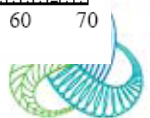
□ Mono-instabilité + saturation par adhérence



évolution locale au contact

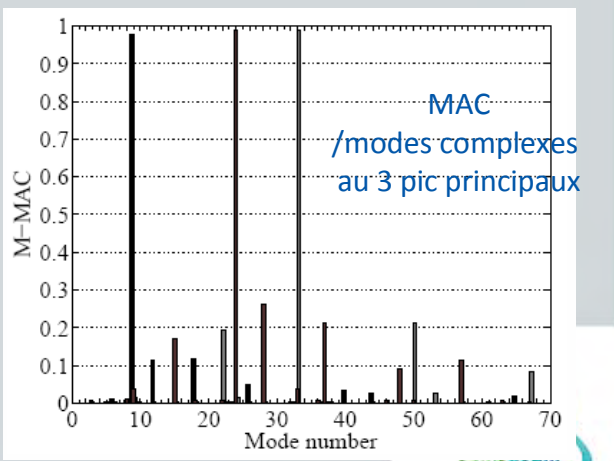
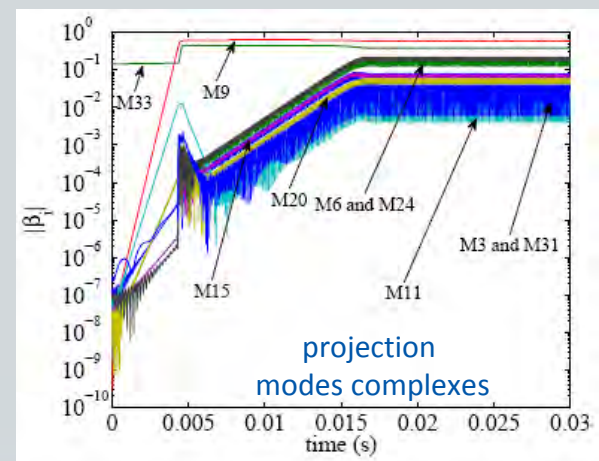
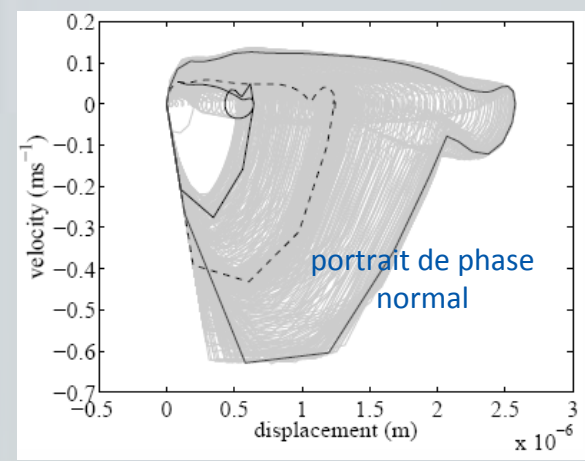
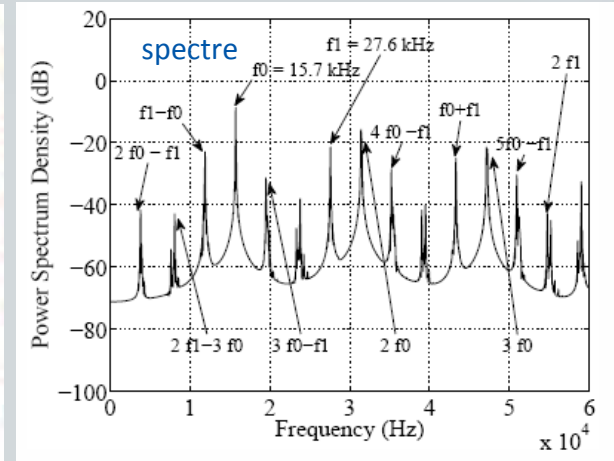
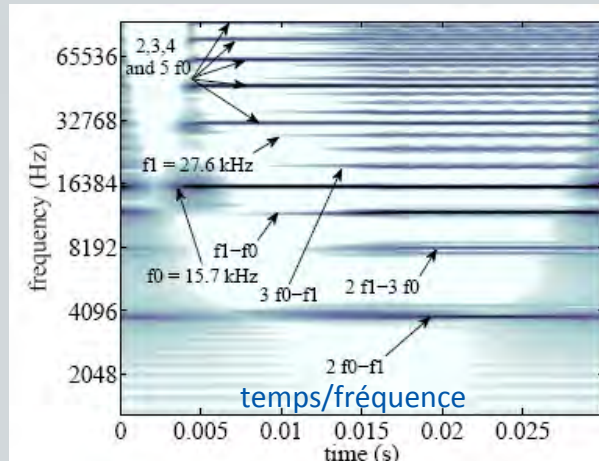
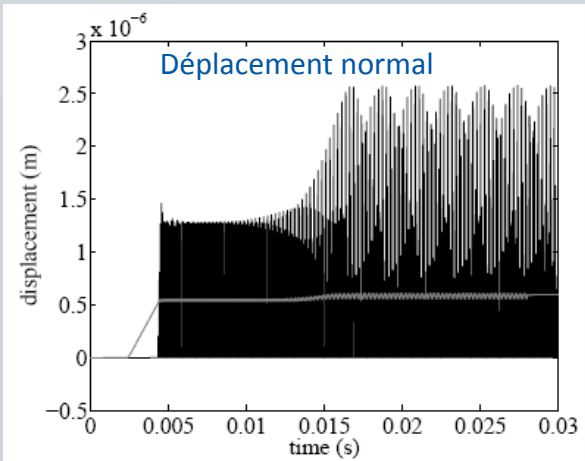
évolution énergétique globale

état stationnaire



Exemples de comportements transitoires (2)

Multi-instabilité + saturation par décollement et adhérence



évolution locale au contact

évolution énergétique globale

état stationnaire



Quelle base réduite ?

Degrés de liberté de contact + Modes instables → IM1

- Comportement proche de l'équilibre
- Possibilités de décollement/adhérence
- ▶ Base minimale

+ Modes stables → FC

- Equilibre énergétique
- Réponse forcée dans la bande

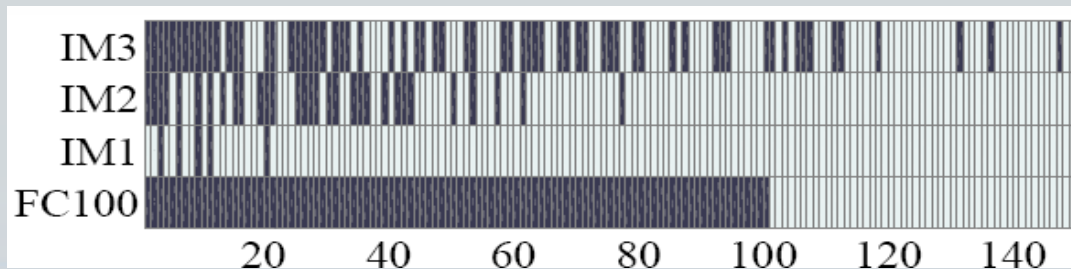
+ Modes proches des harmoniques d'ordre n → IM2, IM3

- Non linéarité au contact
- Harmoniques dans la réponse

+ Modes statiques d'interface → FCs, IM2s

- Effet statique des phénomènes locaux au contact

Exemple
à 5 modes
instables



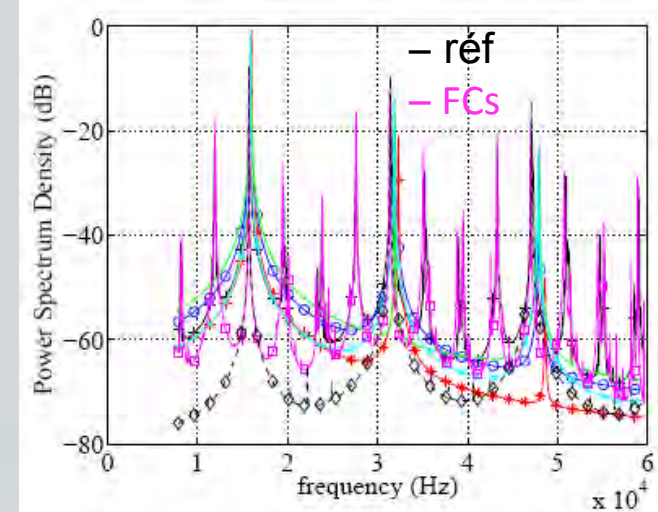
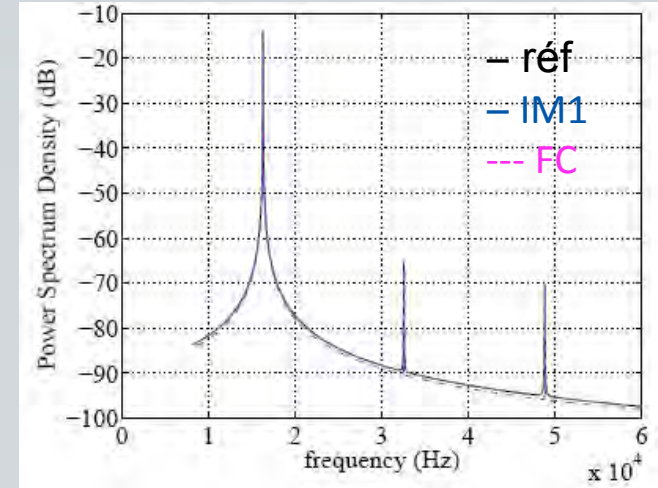
Effets de la réduction

□ Critères

- Comportement général dans le transitoire
 - Phénomènes locaux marqués
 - Compétition modale
- Erreurs sur l'état stationnaire
 - Fréquence des pics principaux
 - Niveau des pics principaux
 - MAC référence/base réduite sur les pics

□ Résultats principaux

- Besoin des modes stables dans les multi-instabilités
- Besoin des modes statiques dans les cas avec décollements
- Décalage inévitables dans le transitoire



Etude vibratoire des composants (Vibratec)

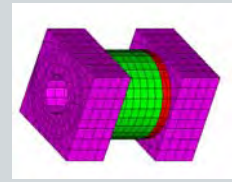
□ Caractérisation expérimentale

■ AME pour les structures « libres »

- Disques TGV et AGC
- Timoneries TGC et AGC →
- Panel de garnitures (10)

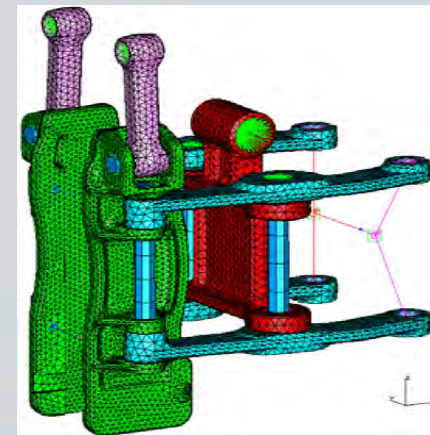
■ Développement d'une méthode spécifique pour la mesure des paramètres mécaniques des plots

- Raideur dynamique traction/compression →
- Raideur dynamique cisaillement
- ▶ Modules d'élasticité + amortissements



□ Modélisations par éléments finis

- Recalage des paramètres
- ▶ Difficultés avec les timoneries



Conclusions et perspectives

- Projet à (presque)mi-parcours
- Achèvement imminent des tâches préliminaires
 - Des développements qui permettent de mener des calculs transitoires avec contact frottant sur base réduite
 - Des modèles vibratoires recalés des composants des freins TGV/AGC
 - Une implémentation à terminer pour passer à des modèles de grande taille (SDTools) 1 million de ddls !!!
- Lot central « modélisation/essais » en cours
 - Calcul stabilité/transitoire sur les modèles vibratoires assemblés
 - Calcul rayonnement acoustique (ENPC)
 - Campagnes d'essais + comparaisons essais/calculs
 - Première campagne au banc sur frein TGV réalisée (8 garnitures)
- Tâches de développements techniques en attente



Merci de votre attention !



IFSTTAR