

JOURNÉES GDR DYNOLIN

10 - 11 octobre 2016
à l'ENSTA ParisTech

GRUPE DE RECHERCHE **D**YNAMIQUE DES STRUCTURES
ET APPROCHES DE DYNAMIQUE **N**ON **L**INEAIRES



ENSTA PARISTECH
828, BD DES MARÉCHAUX 91120 PALAISEAU

[WWW.ENSTA-PARISTECH.FR](http://www.enssta-paristech.fr)

<http://dynolin-gdr3437.entpe.fr/>



Manifestation du GDR DYNOLIN
DYnamique NOn LINéaire

10 et 11 octobre 2016

ENSTA ParisTech

828 Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex

<http://dynolin-gdr3437.entpe.fr>

Le GDR DYNOLIN organise cette année une manifestation sur deux journées comprenant:

- Le lundi 10 octobre, une journée de cours doctoraux ("*école d'automne*"), à l'attention de doctorants, jeunes chercheurs, ingénieurs R& D, sur les thématiques du GDR
- le mardi 11 octobre, la journée de présentation des travaux menés au sein des laboratoires du GDR (communications et discussions scientifiques).

Ces journées sont ouvertes aux membres des organismes et établissements partenaires du GDR.

Organisation :

Cyril Touzé, IMSIA, ENSTA ParisTech, cyril.touze@ensta-paristech.fr

Claude Lamarque, direction GDR 3437, LTDS, ENTPE, claude.lamarque@entpe.fr

Informations pratiques :

- Pas de frais d'inscription. Les repas du midi seront offerts par le GDR.
- Le nombre de places disponibles est limité : 50 places pour le lundi 10 octobre, 90 places pour le mardi 11 octobre.
- Les inscriptions se font sur la page suivante:

<http://tinyurl.com/dynolin>

Programme de la journée du lundi 10 octobre

Cours doctoraux – école d'automne

ENSTA - ParisTech
Salle 2.3.29 - deuxième étage

- 9h00 \rightsquigarrow 9h45: Accueil, café.
Alvéole 1, hall d'entrée de l'ENSTA-ParisTech
- 9h45: **Turbulence d'ondes dans les vibrations de plaque mince**
Christophe Josserand, Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS, Univ Paris 6.
- 10h40: **Intégrateurs numériques conservatifs pour la dynamique non linéaire**
Cyril Touzé, IMSIA, ENSTA ParisTech.
- 11h35: **Absorbeurs non-linéaires: forces et faiblesses**
Gaetan Kerschen, LTAS-SDRG, Université de Liège, Belgique.

– 12h25 \rightsquigarrow 13h50: *Déjeuner* –
École Polytechnique - restaurant administratif
- 13h50 \rightsquigarrow 14h20: Café.
- 14h20: **Intégrateurs temporels pour la dynamique non lisse**
Vincent Acary et Franck Pérignon (INRIA Grenoble)
- 15h50: **Modes non linéaires comme outil de diagnostic - Applications aux tubes de générateurs de vapeur**
Mathieu Corus, IMSIA, EDF.
- 16h20: **Étude de systèmes à pendules non linéaires en rotation**
Zoran Dimitrijevic, PSA Peugeot-Citroën
- 16h50: **Prise en compte de quelques non-linéarités dans un outil éléments finis d'analyse des machines tournantes**
Benoit Prabel, IMSIA, CEA.
- 17h20 \rightsquigarrow 18h00: discussions - clôture de la journée.

Programme de la journée du mardi 11 octobre

ENSTA - ParisTech Amphithéâtre R 112 - rez-de-chaussée

- 9h00 ~ 9h40: Accueil, café.
Alvéole 1, hall d'entrée de l'ENSTA-ParisTech
- 9h40 ~ 10h00 : Effet d'un amortisseur non linéaire accordé sur un profil d'aile d'avion en flottement, Arnaud Malher, IMSIA, ENSTA ParisTech.
- 10h00 ~ 10h20 : Prédiction de la dynamique chaotique d'un absorbeur passif non linéaire bistable sous forçage quasi-périodique, Pierre-Olivier Mattei, LMA, Marseille.
- 10h20 ~ 10h40 : Amélioration de l'effet Trou Noir Acoustique par transfert d'énergie dû aux nonlinéarités géométriques, Vivien Denis, Arts et métiers ParisTech, Lille.

– 10h40 ~ 11h00 : pause café –

- 11h00 ~ 11h20 : Hardening / softening behaviour of antiresonance for nonlinear torsional vibration absorbers, Alexandre Renault, Arts et métiers ParisTech, Lille.
- 11h20 ~ 11h40 : Équilibrage Harmonique et convolution : accélération des calculs, régimes quasi-périodiques, Pierre Vigué, LMA, Marseille.
- 11h40 ~ 12h00 : Analysis of the Nonlinear Dynamics of an F-16 Aircraft Using the NI2D Toolbox, Thibaut Detroux, Université de Liège.

– 12h00 ~ 13h40 : déjeuner - école Polytechnique –

- 13h40 ~ 14h00: Café.
- 14h00 ~ 14h40: **Conférence d'ouverture : Quelques exemples de dynamique non-linéaire dans la mécanique du contact/frottement**
Vladislav Yastrebov, MINES ParisTech.
- 14h50 ~ 15h10: Approche énergétique et méthode de tir pour la détermination des vibrations auto-entretenues d'un système à trois degrés de liberté en contact frottant, Lucien Charroyer, CLA/LTDS/IFSTARR.
- 15h10 ~ 15h30: Multi-scale approaches for nonlinear vibration of contact joint structures, Loïc Salles, VUTC, Imperial College, Londres.
- 15h30 ~ 15h50: Periodic solutions of a two-degree-of-freedom autonomous vibro-impact oscillator with sticking phases, Huong Le Thi, Université de Nice.
- 15h50 ~ 16h10: Méthode modale mixte pour le contact unilatéral corde / obstacle : application au chevalet de la tampoura, Clara Issanchou, Université Pierre et Marie Curie.

– 16h10 ~ 17h15 : Clôture de la journée - Comité d'orientation du GDR–

Résumés des communications

Journée du mardi 11 octobre

9h40 – 10h00

Effet d'un amortisseur non linéaire accordé sur un profil d'aile d'avion en flottement

A. Malher¹, O. Doaré¹, G. Habib², G. Kerschen², C. Touzé¹

¹ Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications (IMSIA)
ENSTA-ParisTech - CNRS - EDF - CEA, Université Paris-Saclay
{arnaud.malher,olivier.doare,cyril.touze}@ensta-paristech.fr

² Space Structures and Systems Laboratory (S3L)
University of Liege, Belgium

{giuseppe.habib,g.kerschen}@ulg.ac.be

Le flottement d'aile est une instabilité donnant lieu à une bifurcation de Hopf engendrant l'apparition de cycles limites dont l'amplitude peut endommager la structure. Dans ce cadre, nous nous proposons d'étudier l'influence d'un amortisseur non linéaire, appelé NLTVA pour "Non-Linear Tuned Vibration Absorber", sur le flottement d'un profil à deux degrés de liberté. Ce type d'amortisseur est pourvu d'une force de rappel possédant une partie linéaire et une partie non linéaire. Le NLTVA peut alors agir à la fois sur le comportement linéaire et non linéaire du profil d'aile. La partie linéaire du NLTVA a pour objectif de retarder le plus possible l'apparition du flottement et la partie non linéaire d'assurer la supercriticalité de la bifurcation et de réduire l'amplitude des cycles limites dans le régime post-critique.

10h00 – 10h20

Prédiction de la dynamique chaotique d'un absorbeur passif non linéaire bistable sous forçage quasi-périodique

P.-O. Mattei, M. Pachebat, V. Iurasov

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)
UPR CNRS 7051

mattei@lma.cnrs-mrs.fr

Ces travaux concernent l'analyse de la dynamique chaotique d'un absorbeur bistable non linéaire sous sollicitation pseudo-périodique. La dynamique d'un tel système peut être approchée par un oscillateur non linéaire de type Helmholtz-Duffing dont la rigidité comporte des termes linéaire, quadratique et cubique. La bifurcation de la dynamique d'un tel oscillateur de régulière vers chaotique sous forçage pseudo-périodique est étudiée en utilisant la méthode Melnikov. On montre que cette bifurcation est prédite par des règles simples qui ne dépendent que de la fréquence de résonance et de l'amortissement en régime linéaire de cet oscillateur.

10h20 – 10h40

Amélioration de l'effet Trou Noir Acoustique par transfert d'énergie dû aux nonlinéarités géométriques

V. Denis^{1,2}, A. Pelat¹, F. Gautier¹, C. Touzé³

¹ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), UMR CNRS 6613, Le Mans.

² Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS) UMR CNRS 7296
Arts et Métiers ParisTech, Lille, France

³ Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications (IMSIA)
ENSTA-ParisTech - CNRS - EDF - CEA, Université Paris-Saclay
vivien.DENIS@ensam.eu

L'effet Trou Noir Acoustique (TN) est une technique passive d'amortissement de vibrations sans ajout de masse fondée sur les propriétés des ondes de flexion dans des structures minces d'épaisseur variable. La mise en œuvre habituelle consiste en une plaque avec une extrémité profilée selon une loi exponentielle, recouverte d'un film viscoélastique. L'inhomogénéité de la structure conduit à une baisse de la célérité et une augmentation de l'amplitude des ondes de flexion, ce qui a pour conséquence une dissipation d'énergie efficace quand un film amortissant est placé dans la zone de faible épaisseur. L'amplitude des ondes à l'extrémité peut facilement atteindre l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la plaque, ce qui est une source de non-linéarités géométriques. Ces non-linéarités peuvent avoir pour conséquences des couplages entre les modes de vibration de la structure, et induire un transfert d'énergie des basses fréquences vers les hautes fréquences. Ce phénomène de transfert d'énergie peut être exploité pour augmenter l'efficacité du traitement dans le domaine des basses fréquences pour lequel le trou noir est peu efficace. Une expérience montre que la terminaison TN se comporte de manière non-linéaire et permet un couplage entre modes. Un régime fortement non-linéaire peut également être observé, qui est associé au phénomène de turbulence d'ondes. Une modélisation d'une poutre TN comme une plaque de von Kármán d'épaisseur variable et une résolution du problème par une méthode modale permet de confirmer les effets observés dans l'expérience et d'analyser plus finement ces résultats.

11h00 – 11h20

Hardening / softening behaviour of antiresonance for nonlinear torsional vibration absorbers

A. Renault^{1,2}, O. Thomas¹, H. Mahé², Y. Lefebvre²

¹ Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS) UMR CNRS 7296
Arts et Métiers ParisTech, Lille, France

² Valeo Transmissions, Centre d'Étude des Produits Nouveaux, Amiens, France
{alexandre.renault,olivier.thomas}@ensam.eu

We address non linear torsional vibration absorbers (TVA), used in rotating machinery to counteract irregularities of rotation at a some order of the engine speed of rotation. The TVA is analogous to a tuned mass damper (TMD), tuned on the desired order. It exhibits non-linearities of

various natures which affect resonance and antiresonance frequencies at large amplitude of motion, which consequently causes the detuning of the system from the targetted order. This study focuses on some non linear systems (several TVA designs and a more general Duffing like system) to study the impact of non-linearities on the hardening / softening behavior of antiresonances. Non linear solutions are obtained by a numerical continuation procedure coupled with the harmonic balance method to follow periodic solutions in forced steady-state. Moreover, we propose an original direct antiresonance continuation method for undamped systems.

11h20 – 11h40

Équilibrage Harmonique et convolution : accélération des calculs, régimes quasi-périodiques

P. Vigué, C. Vergez, B. Cochelin

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)

UPR CNRS 7051

{vigue,vergez}@lma.cnrs-mrs.fr

La méthode de l'Équilibrage Harmonique (EH) permet classiquement de rechercher les solutions périodiques de systèmes non linéaires. Associée à une méthode de continuation, comme la Méthode Asymptotique Numérique par exemple, elle permet d'obtenir des diagrammes de bifurcation. Nous présentons une formulation de l'EH en coefficients de Fourier complexes. Les produits de variables sont traités par convolution des séries de Fourier, sans aller-retour dans le domaine temporel. Ceci permet une accélération des calculs et une extension aux régimes quasi-périodiques à deux fréquences. Nous avons traité à titre d'exemple la continuation des solutions quasi-périodiques d'oscillateurs de Van der Pol dans les cas autonome et forcé.

11h40 – 12h00

Analysis of the Nonlinear Dynamics of an F-16 Aircraft Using the NI2D Toolbox

T. Detroux, T. Dossogne, L. Masset, J.P. Noël, G. Kerschen

Space Structures and Systems Laboratory (S3L)

University of Liège, Belgium

{tdetroux,tdossogne,luc.masset,jp.noel,g.kerschen}@ulg.ac.be

Nonlinearity is a frequent occurrence in engineering structures due, for instance, to elastomeric materials, gaps, gears or friction. Nonlinearities distort frequency response functions and can make experimental and numerical models difficult to correlate. They also induce new phenomena with

no linear counterpart such as modal interactions and bifurcations. In this context, the recently-developed Nonlinear Identification to Design (NI2D) MATLAB toolbox combines experimental and numerical techniques to address nonlinear vibration problems. The purpose of this study is to perform a complete analysis of the nonlinear dynamics of an F-16 aircraft using the NI2D toolbox. First, sine-sweep data collected during ground vibration testing are exploited to build a nonlinear experimental model of the aircraft with good predictive capabilities. Next, this model is exploited to understand the measured nonlinear regimes of motion, and to uncover additional nonlinear phenomena that can be encountered in the different regimes of operation of the structure. Eventually, this process allows the structural analyst to precisely quantify the impact of nonlinearity and to decide whether design modifications are necessary to achieve the requested system performance.

14h00 – 14h40 : Conférence d'ouverture

Quelques exemples de dynamique non-linéaire dans la mécanique du contact/frottement

V. Yastrebov

MINES ParisTech, PSL Research University,
Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633
vladislav.yastrebov@mines-paristech.fr

La mécanique du contact (des impacts et collisions ou le contact Hertzien) et du frottement (stick-slip et d'autres instabilités) entre des solides déformables présente un domaine vaste d'application de la dynamique non linéaire. De plus, la compréhension de nombreux systèmes industriels ainsi que des phénomènes naturels nécessite la prise en compte du contact frottant mais aussi de la dynamique du système associée : le glissement dans les failles géologiques et le crissement des freins, les chants de sauterelle et la vibration d'une corde de violon, le forage à percussion et le comportement des matériaux granulaires donnent quelques exemples d'applications. Dans cet exposé, en premier lieu, on rappellera les bases de la mécanique du contact et la physique de l'interaction entre les corps. En deuxième lieu, quelques exemples de problèmes naturels et industriels seront brièvement discutés. Par la suite, on abordera la question de stabilité du frottement en élastodynamique à l'interface entre des matériaux aux propriétés différentes. Ce problème, qui se pose pour de nombreux systèmes (à titre d'exemple : pneu-chaussée, freins, composites fissurés et failles géologiques) nous offre une lecture radicalement nouvelle du phénomène de frottement, qui est souvent trop simplifié dans nos modèles. En deuxième partie, on discutera du comportement vibratoire d'une nouvelle classe des matériaux architecturés dont la réponse est asymétrique, *i.e.* la raideur dépend du type de chargement. Leur réponse dynamique riche donne lieu à tout type de bifurcation et un comportement chaotique marquant. Pour conclure, on formulera quelques questions ouvertes pour la communauté de dynamique non-linéaire.

14h50 – 15h10

Approche énergétique et méthode de tir pour la détermination des vibrations auto-entretenues d'un système à trois degrés de liberté en contact frottant

L. Charroyer^{a,b,c}, O. Chiello^{a,c}, J.-J. Sinou^{a,b}

^a Centre Lyonnais d'Acoustique, Université de Lyon, France.

^b Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes UMR 5513, ECL, France.

^c IFSTTAR, AME, LAE, Bron, France.

lucien.charroyer@doctorant.ec-lyon.fr

Cette étude porte sur les vibrations auto-entretenues d'un système amorti simple à trois degrés de liberté frottant sur un plan rigide de vitesse imposée. Des lois non linéaires et non régularisées de contact unilatéral et de frottement de Coulomb sont utilisées et le coefficient de frottement est supposé constant. En premier lieu la stabilité du système est étudiée en fonction du coefficient de frottement et de la direction de glissement. Ce travail préliminaire permettra de déterminer les zones instables pour lesquelles des vibrations auto-entretenues peuvent être observées. Ces paramètres étant ajustés, dans une seconde partie, la recherche du niveau vibratoire non-linéaire stationnaire du système est étudiée. Une approche se basant sur la méthode de tir combinée à une approche énergétique permettant d'initier la résolution du problème non linéaire est proposée. Dans une troisième partie, les résultats sont validés par comparaison à ceux obtenus par intégration temporelle directe. Enfin dans une quatrième partie une méthode de continuation selon le coefficient de frottement sera envisagée afin de déterminer l'influence de ce paramètre sur l'amplitude des niveaux vibratoires. Ce travail s'inscrit dans le cadre de recherches de méthodes numériques pour la modélisation des bruits de crissement.

15h10 – 15h30

Multi-scale approaches for nonlinear vibration of contact joint structures

J. Armand, L. Pesaresi, L. Salles, C. Schwingshackl

Vibration University Technology Center (VUTC)

Imperial College, Londres.

{j.armand13,l.salles}@imperial.ac.uk

Motivated by the current demands in high-performance structural analysis, and by a need to better model systems with localised nonlinearities, analysts have developed a number of different approaches for modelling and simulating the dynamics of a bolted-joint structure.

The scales involved in vibration of joint structures can be very large: macroscale for the vibration (1-10mm) to microscale at the asperity level of the contact. Different approaches have been developed in Vibration University Technology Centre to analysis those systems and take into

account the different scale involved. This presentation will summarise the strategies that have been developed and implemented in the in-house code FORSE.

Numerical examples will illustrate the proposed methods. One of the example will focus on under-platform dampers where the motion at the frictional interfaces can lead to a highly nonlinear dynamic response and cause fretting wear at the contact. The latter changes the contact conditions of the interface and consequently impact the nonlinear dynamic response of the entire assembly.

The presentation will be concluded by a discussion on the future strategies concerning numerical tool and experimental validations in order to improve accuracy of vibration analysis with contact joints.

15h30 – 15h50

Periodic solutions of a two-degree-of-freedom autonomous vibro-impact oscillator with sticking phases

H. Le Thih¹, S. Junca¹, M. Legrand²,

¹ Laboratoire J.A. Dieudonné, Université de Nice, France,
& Team Coffee, INRIA, Sophia-Antipolis, France,

² Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montréal.
lethih@unice.fr, junca@math.unice.fr, mathias.legrand@mcgill.ca

Periodic motions with sticking phase of a two degree-of-freedom vibro-impact spring mass model with perfect elastic impact and without source term are motivated and presented. Periodic solutions with sticking phase have been observed in some continuous models of vibro-impact systems. To study this complex phenomenon, we consider a discrete n degree-of-freedom (dof) system. Since the sticking phase does not occur for a one dof system with perfect elastic impact and without source term, we consider the two dof vibro-impact system and find that it is the simplest model in which sticking phase occurs.

All the periodic motions with one sticking phase per period are computed. The key unknown parameter is the durations of free flight phase which appears as a root of a nonlinear equation. When s is known (numerical computation), the period, the sticking time and the associated solution are explicitly derived. A number of numerical experiments of 1SPP solutions are also explored and a relationship between periodic solutions with 1SPP and a special set of periodic solutions with 1 impact per period is established.

15h50 – 16h10

Méthode modale mixte pour le contact unilatéral corde / obstacle : application au chevalet de la tampoura

C. Issanchou^{1,2}, S. Bilbao², J.-L. Le Carrou¹, O. Doaré³, C. Touzé³

¹ LAM/Institut d'Alembert, Université Paris 6

² Acoustics and Audio Group, University of Edinburgh

³ IMSIA, ENSTA ParisTech-CNRS-EDF-CEA, Université Paris Saclay

clara.issanchou@ensta-paristech.fr

De nombreux instruments de musique font intervenir des contacts entre une corde vibrante et un obstacle rigide afin d'enrichir le son produit (notamment la basse électrique, la contrebasse, le sitar ou encore la tampoura). Cette étude présente une nouvelle méthode numérique modélisant une corde vibrante, éventuellement raide et amortie, en présence d'un obstacle unilatéral fixe de forme quelconque. Le schéma s'appuie sur une approche modale permettant de prendre en compte des fréquences propres et amortissements ajustables pour chaque mode. En particulier, des mesures peuvent être injectées dans le modèle, lui conférant un grand réalisme. La méthode est dite mixte car malgré cette description modale, les opérateurs numériques sont exprimés dans l'espace physique. La force de contact est régularisée et un schéma conservatif (dissipatif en présence de pertes) est mis en oeuvre. Des résultats numériques sont confrontés à des mesures expérimentales dans le cas d'un obstacle ponctuel, placé au milieu de la corde puis proche d'une extrémité, ce dernier cas se rapprochant du chevalet d'une tampoura. Une très bonne concordance entre signaux expérimentaux et numériques est observée sur des temps longs.

Informations pratiques

L'ENSTA-ParisTech se trouve à Palaiseau, sur le site de l'université Paris-Saclay, quartier de l'École Polytechnique.

Adresse : 828, Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex

Coordonnées GPS : 48.711042, 2.219278.

Pour venir en transports en commun :

1. Un service de navette est mis en place par le GDR afin de faire les trajets gare de Massy-Palaiseau / ENSTA ParisTech. Elles seront opérées par la SAVAC. Les horaires retenus pour ces navettes sont:

- Lundi 10 octobre à 9h00, départ de Massy-Palaiseau
- Lundi 10 octobre à 17h45, départ de l'ENSTA ParisTech
- Mardi 11 octobre à 9h00, départ de Massy-Palaiseau
- Mardi 11 octobre à 16h30, départ de l'ENSTA ParisTech

La navette SAVAC sera devant la gare TGV avenue Carnot avec un panneau indiquant la direction de l'ENSTA. Il faudra compter 10 à 12 minutes de trajet.

2. En plus de ces navettes, un service de bus dessert le campus de l'École Polytechnique et donc l'ENSTA ParisTech. Pour venir à l'ENSTA il faut prendre le bus **91.06B** ou **91.06C**. Le bus circule en site propre et rejoint la gare RER de Massy-Palaiseau à l'ENSTA-ParisTech en 8 minutes environ. Pour l'ENSTA l'arrêt est **Polytechnique - ENSTA - Les Joncherettes**.

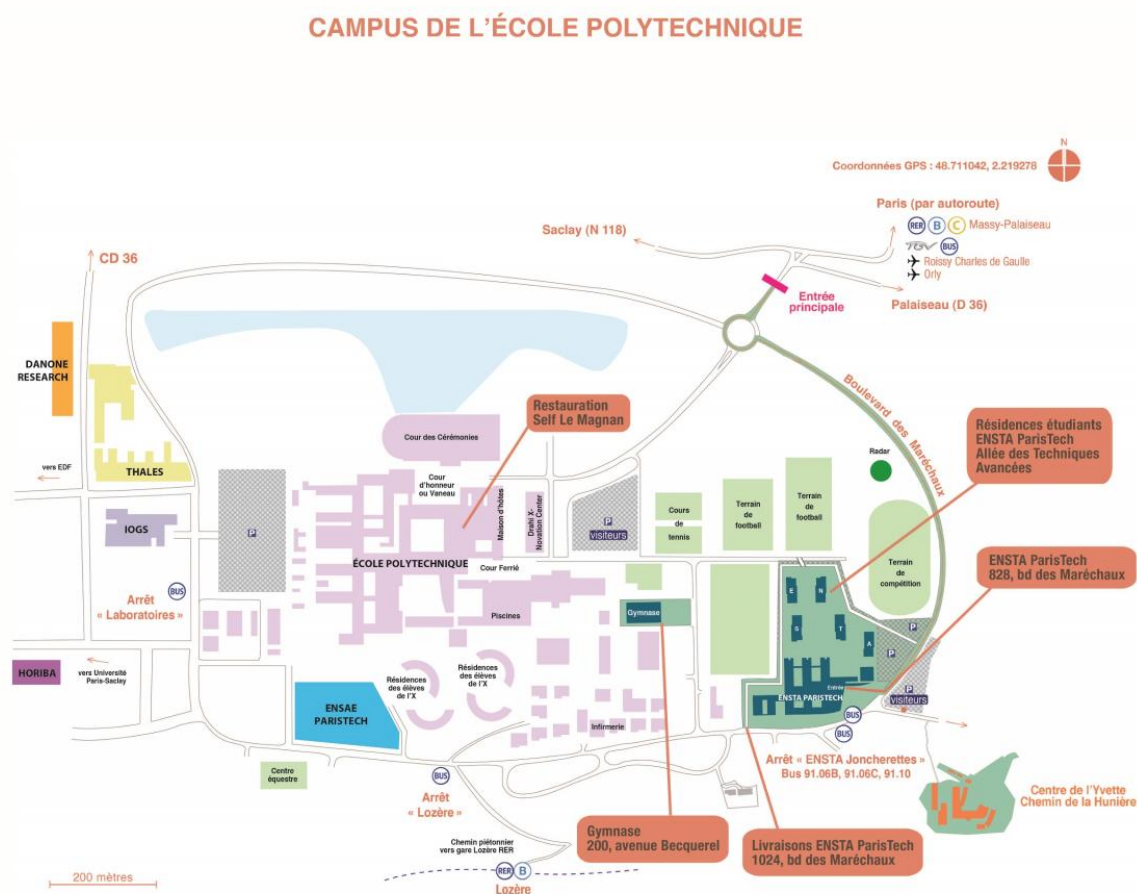
Plan de la station RER - gare TGV à Massy-Palaiseau



NB : la nouvelle passerelle notée "à venir" sur le plan existe maintenant !

Pour ceux qui viennent en avion depuis l'aéroport d'Orly, le bus 91.10 relie l'aéroport d'Orly à l'ENSTA ParisTech.

Plan du campus - Quartier de l'Ecole Polytechnique - ENSTA et arrêt 91.06



Liens utiles

- Le plan des lignes Albatrans (dont les lignes 91.06B, 91.06C et 91.10):
<http://www.albatrans.net/wp-content/themes/default/pdf/Plan.pdf>
<http://www.albatrans.net/les-lignes-les-horaires/carte-reseau-statique>
- Les horaires détaillées:
<http://www.albatrans.net/les-lignes-les-horaires/les-horaires/les-horaires-dhiver>
Pour le 91.06 depuis Massy-Palaiseau, voici quelques horaires de départ intéressants :

Massy-Palaiseau	8h47	9h00	9h12	9h30	9h45	10h00	10h48	11h05
Joncherettes	8h56	9h09	9h21	9h39	9h54	10h08	10h56	11h13
- Pour le retour, Albatrans annonce un passage toutes les 5 minutes entre 16h et 19h.
- Autres informations (pour venir en voiture par exemple):
<http://www.ensta-paristech.fr/fr/venir-ensta-paristech>