



## UMA - Unité de mathématiques appliquées

### Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. UMA - Unité de mathématiques appliquées. 2014, École nationale supérieure de techniques avancées - ENSTA Paristech, Centre national de la recherche scientifique - CNRS, Institut national de recherche en informatique et en automatique - INRIA. hceres-02033069

**HAL Id: hceres-02033069**

**<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02033069>**

Submitted on 20 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



agence d'évaluation de la recherche  
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Évaluation de l'AERES sur l'unité :

Unité de Mathématiques Appliquées

UMA

sous tutelle des

établissements et organismes :

École Nationale Supérieure des Techniques Avancées –

ENSTA PARISTECH

Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS

Institut National de Recherche en Informatique et en

Automatique



Décembre 2013



agence d'évaluation de la recherche  
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

*Pour l'AERES, en vertu du décret du 3 novembre 2006<sup>1</sup>,*

- M. Didier HOUSSIN, président
- M. Pierre GLAUDES, directeur de la section des unités de recherche

*Au nom du comité d'experts,*

- M<sup>me</sup> Maitine BERGOUNIOUX, présidente du comité

---

<sup>1</sup> Le président de l'AERES « signe [...], les rapports d'évaluation, [...] contresignés pour chaque section par le directeur concerné » (Article 9, alinea 3 du décret n°2006-1334 du 3 novembre 2006, modifié).



# Rapport d'évaluation

Ce rapport est le résultat de l'évaluation du comité d'experts dont la composition est précisée ci-dessous. Les appréciations qu'il contient sont l'expression de la délibération indépendante et collégiale de ce comité.

Nom de l'unité : Unité de mathématiques appliquées

Acronyme de l'unité : UMA

Label demandé :

N° actuel : UMR 7231 pour POEMS

Nom du directeur  
(2013-2014) : M. Éric LUNEVILLE

Nom du porteur de projet  
(2015-2019) : M. Éric LUNEVILLE

## Membres du comité d'experts

Président : M<sup>me</sup> Maitine BERGOUNIOUX, Université d'Orléans

Experts :

- M. Martin COSTABEL, Université de Rennes 1
- M. Paul CRISTINI, LMA CNRS et Université d'Aix-Marseille
- M. Élie TURKEL, Université de Tel Aviv, Israël

Délégué scientifique représentant de l'AERES :

M. Antoine HENROT

Représentant(s) des établissements et organismes tutelles de l'unité :

- M<sup>me</sup> Élisabeth CREPON, ENSTA
- M<sup>me</sup> Isabelle TANCHOU, ENSTA
- M. Yves REMOND, CNRS INSIS
- M<sup>me</sup> Nozha BOUJEMAA, INRIA
- M. Pierre LEGRAIN (directeur de l'École Doctorale de Polytechnique)



## 1 • Introduction

### Historique et localisation géographique de l'unité

L'UMA est née en 1995 de la réorganisation des équipes de l'ENSTA. Elle comptait alors une dizaine d'enseignant-chercheurs et chercheurs dont quelques uns regroupés sur les thématiques Optimisation/Commande et Algorithmique-Informatique. Au début des années 2000, l'UMA s'est structurée autour de 3 équipes : Optimisation-Commande (OC), Algorithmique-Langage-Information (ALI) et l'équipe POEMS (Propagation des Ondes, Etude Mathématique et Simulation) qui est depuis 2005 une UMR CNRS/ENSTA/INRIA. L'équipe ALI a été rattachée en 2011 à l'Unité d'Informatique et d'Ingénierie des Systèmes (UIIS).

Jusqu'en 2012 POEMS était bi-localisée à Paris (ENSTA/CNRS) et Rocquencourt (INRIA). Le déménagement de l'ENSTA à Palaiseau à l'été 2012 a permis de localiser sur un même site (ENSTA) tous les personnels de POEMS, favorisant ainsi une meilleure intégration des personnels de l'INRIA au sein de l'UMA. Aujourd'hui, l'UMA s'articule autour des deux équipes. L'équipe POEMS est une unité mixte CNRS/ENSTA/INRIA- Saclay (UMR 7231), rattachée à l'INSIS - Institut National des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes - constituée de 13 EC permanents (6 CNRS, 4 ENSTA, 3 INRIA). L'équipe OC est constituée de 6 EC permanents ENSTA. Elle est non labellisée.

### Équipe de direction :

M. Eric LUNEVILLE directeur, responsable POEMS : M. Patrick JOLY, responsable OC : M. Pierre CARPENTIER.

### Nomenclature AERES :

ST1 Mathématiques

### Effectifs de l'unité

| Effectifs de l'unité   | Nombre au 30/06/2013 | Nombre au 01/01/2015 |
|--|----------------------|----------------------|
| <b>N1</b> : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés                             | 10                   | 10                   |
| <b>N2</b> : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés                        | 9                    | 9                    |
| <b>N3</b> : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)       | 6                    | 6                    |
| <b>N4</b> : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)                            |                      |                      |
| <b>N5</b> : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.) | 4                    |                      |
| <b>N6</b> : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)     |                      |                      |
| <b>TOTAL N1 à N6</b>   | <b>29</b>            | <b>25</b>            |



| <b>Effectifs de l'unité</b>                                 | <b>Nombre au<br/>30/06/2013</b> | <b>Nombre au<br/>01/01/2015</b> |
|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Doctorants  | 26                              |                                 |
| Thèses soutenues  | 29                              |                                 |
| Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité * | 5                               |                                 |
| Nombre d'HDR soutenues                                      | 2                               |                                 |
| Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées | 14                              | 14                              |



## 2 • Appréciation sur l'unité

### Avis global sur l'unité

L'unité a une activité scientifique de très haut niveau et fait preuve d'une très bonne dynamique de recherche. Chaque équipe est très impliquée dans des contrats académiques (ANR) ou industriels et a un très fort rayonnement. L'investissement dans l'enseignement est remarquable et permet de renforcer la cohésion entre les deux équipes. Toutefois il y a peu d'interactions entre les deux groupes ce qui rend la juxtaposition des deux thématiques assez artificielle.

La composition « institutionnelle » de l'unité est un cas particulier puisque les deux équipes n'ont pas le même statut (UMR pour POEMS) ni les mêmes tutelles (INRIA/CNRS/ENSTA pour POEMS, ENSTA pour OC). Le laboratoire regroupe des chercheurs relevant de la 26ème et 61ème section du CNU et de la section 09 du CNRS.

### Points forts et possibilités liées au contexte

L'ENSTA ParisTech constitue un environnement privilégié pour l'UMA. En effet, les thématiques de l'UMA sont en adéquation avec les objectifs de l'école et l'UMA bénéficie d'un apport croissant d'étudiants de très bon niveau et bien formés au niveau M2. L'UMA développe également des partenariats avec d'autres laboratoires de l'école : l'équipe POEMS avec l'UME et l'équipe OC avec l'UIIS. L'UMA dispose de moyens (matériels, locaux) qui lui permettent de développer des activités de transfert technologique (logiciels) et d'organiser des événements scientifiques (séminaires, workshops, conférences) dans de très bonnes conditions. Le récent déménagement sur le nouveau site est unanimement salué. Outre des locaux neufs et adaptés, il a également permis de réunir la totalité de l'équipe POEMS dans les mêmes locaux et de renforcer la cohésion de l'équipe.

### Points faibles et risques liés au contexte

L'ENSTA apporte un soutien politique et institutionnel fort à l'unité mais les membres du laboratoire déplorent un manque de moyens en particulier pour la gestion administrative difficile de contrats académiques et industriels de plus en plus nombreux et complexes. Il n'y a pas de possibilité pour dégager des mois pour des chercheurs extérieurs et le recrutement des EC ENSTA se fait essentiellement (au moins dans le profil des postes) sur des critères d'enseignement. De plus, compte-tenu du contexte budgétaire de l'ENSTA, les budgets d'investissement des laboratoires en 2014 sont en forte baisse.

L'UMA est principalement constituée de seniors et les départs probables sont sans garantie de renouvellement. Compte-tenu des recrutements récents de POEMS via le CNRS (INSIS), l'équilibre mathématique/science de l'ingénieur de POEMS repose sur des recrutements de mathématiciens appliqués par l'ENSTA ou l'INRIA. L'INRIA n'a soutenu aucun recrutement ces dix dernières années. Par ailleurs, la baisse du budget de l'ENSTA ne donnant aucune perspective de création de nouveaux postes, le renouvellement des EC ENSTA n'est pas nécessairement assuré particulièrement pour l'équipe OC. Tous ces éléments font peser une menace sur le maintien des effectifs de l'UMA.

Enfin le projet de rapprochement de l'ENSTA avec l'École Polytechnique soulève les interrogations inquiètes de tous les membres de l'unité qui craignent pour leur visibilité et leur autonomie scientifique.

### Recommandations

L'UMA est une petite unité composée de deux entités qui ne collaborent pas et qui n'ont pas le même statut ni les mêmes tutelles ce qui en fait un cas très particulier. De ce fait, les processus de décision se font de manière informelle ce qui ne pose pas de problème à l'heure actuelle. Il serait plus raisonnable toutefois de prévoir un conseil de laboratoire pour ne pas laisser le directeur porter seul la parole de l'unité face aux tutelles en particulier.

Il serait souhaitable que les deux équipes aient des connections scientifiques plus poussées que de simples discussions pour faire une unité plus homogène. Les thématiques de contrôle non destructif et de problèmes inverses pourraient faire l'objet de recherches communes par exemple.

Il serait également important que les membres de l'unité réfléchissent sur leur devenir en tant qu'équipe et à leur place scientifique si le projet de rapprochement de l'ENSTA avec l'École Polytechnique aboutit à une réorganisation des laboratoires des deux écoles, ce qu'ils refusent d'envisager à l'heure actuelle.



### 3 • Appréciations détaillées

#### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

La production scientifique est de très haut niveau tant pour les publications, que pour les communications. Le nombre de publications est très important dans des revues de très bon niveau. Les applications traitées par les membres de l'unité sont nombreuses, et sont effectuées en collaboration avec des partenaires académiques et industriels diversifiés. Le spectre des mathématiques utilisées est très large : les aspects théoriques sont abordés comme les aspects numériques et algorithmiques (une plate-forme de développement commune aux différents projets portés par l'une des deux équipes a été mise en place). L'activité d'encadrement doctoral est soutenue et les docteurs ont tous un emploi à l'issue de leur thèse pour 1/3 dans la recherche académique (chercheurs ou enseignants-chercheurs), 1/3 dans des entreprises et 1/3 en post-doctorat.

#### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le rayonnement et l'attractivité sont importants. Les membres de l'équipe sont éditeurs dans des revues de leur champ, participent à des rencontres internationales. Les collaborations académiques nationales et internationales via un réseau d'universités en Europe (Italie, Portugal, Suisse (EPFL) ...) sont nombreuses. Le projet européen SADCO a permis d'attirer de bons doctorants et post-doctorants. L'unité participe à de nombreux projets ANR (notamment avec le CEA) et est régulièrement impliquée dans l'organisation de manifestations scientifiques (comme la conférence de référence « WAVES »). L'équipe POEMS est également fortement impliquée dans l'activité d'un GDR européen sur le contrôle non destructif. Les derniers recrutements sont de très bonne qualité et renforcent indéniablement le potentiel de l'unité.

#### Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

De par son positionnement à l'interface du monde académique et du monde de l'entreprise, caractéristique des écoles d'ingénieurs, l'UMA mène une stratégie partenariale à la fois tournée vers les laboratoires académiques et les laboratoires R&D des grandes entreprises (EDF, CEA, CNES, EADS, THALES, ORANGE, ...) que ce soit au moyen de contrats industriels (support de thèse le plus souvent) ou de réponses à des appels d'offre (ANR, projet européen). Une des actions stratégiques du laboratoire a été de s'investir dans les projets sur appel d'offres. Ainsi sur la période 2008-2013, le laboratoire s'est impliqué dans 10 ANR (porteur de 4 ANR) et dans deux projets européens : SADCO (porteur) et SIMPOSIUM. Un des objectifs a été de maintenir un bon équilibre entre recherche académique et recherche appliquée.

#### Appréciation sur l'organisation et la vie de l'unité

L'UMA mutualise les ressources informatiques (matériels comme les serveurs de fichiers ou de calculs et personnels), les ressources documentaires (gestion déléguée à la bibliothèque centrale de l'ENSTA), la gestion administrative (la partie INRIA/POEMS est gérée par une gestionnaire spécifique fournie par l'INRIA).

L'UMA dispose d'un site internet et d'un site intranet qui permet de gérer en particulier les publications du laboratoire. Chaque équipe dispose également de son propre site.

La plupart des dépenses du laboratoire (missions, matériels informatiques, fournitures) sont gérées et affectées aux différents budgets par l'équipe de direction.

Un séminaire commun à l'UMA est organisé une fois par trimestre. Chaque équipe organise ses propres séminaires et groupes de travail. Les doctorants ont également mis en place un groupe de travail.

Compte-tenu de la petite taille du laboratoire, une AG de laboratoire est organisée une fois par an, chaque équipe réalisant plus régulièrement des réunions spécifiques à ses activités. Il n'y a pas de conseil de laboratoire. La plupart des décisions sont prises par l'équipe de direction constituée de 4 personnes (3 de POEMS et une d'OC).





## Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

*(Fiche destinée aussi à la section des formations et des diplômes pour l'évaluation des masters et des ED)*

En tant qu'unité d'enseignement de l'ENSTA, l'UMA est impliquée dans le cursus niveau M1 et M2 de l'école.

Il est remarquable que près de la moitié des 140 élèves de l'ENSTA choisissent la filière Ingénierie Mathématique en deuxième année.

Par ailleurs, les EC de l'UMA interviennent dans les masters suivants :

- Mathematical Models in Economics and Finance (MMEF) (Paris -1 ) ED 465 : Économie ;
- Master parisien de recherche opérationnelle, MPRO porté par le CNAM, co-habilité ENSTA, Polytechnique, Telecom Paris, ENSIIE - ED130 : DITE, École Doctorale X ED 447 ;
- Master Mathématiques appliquées en finance MAF (Paris- Est, ENPC). ED 532 : Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (MSTIC) ;
- Master Automatique et traitement du signal et des images, (Orsay) ED 422 : Sciences et Technologies de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes (STITS) - co-accrédité : GIF SUPELEC ;
- Master Modélisation et Simulation (M2S) - porteur UVSQ, ED 539 : Sciences et Technologies de Versailles - École Doctorale X ED 447 (Co-responsabilité) ;
- Master Dynamique, Structures, Matériaux, Systèmes couplés (Ecole centrale Paris) ED 287 :Sciences pour l'Ingénieur ;
- Master Analyse numérique, équations aux dérivées partielles (ANEDP - Paris 6) ED 386 : Sciences mathématiques de Paris Centre ;
- Master Techniques Avancées en Calcul des Structures (TACS, ENS Cachan) ED 285 : Sciences pratiques.

L'unité organise plusieurs événements scientifiques (journées doctorales du réseau, écoles thématiques,etc.), dans le cadre ITN-SADCO, Ecole CEA-EDF-INRIA, Trimestre IHP, école d'été internationale « Mathematical methods of celestial mechanics », conférence « WAVES ».

L'UMA est principalement rattachée à l'École Doctorale de l'École Polytechnique (ED 447) dans laquelle l'ENSTA- ParisTech est co-accréditée. De par l'association de certains EC à d'autres laboratoires, l'UMA a bénéficié du soutien d'autres école doctorales via des co-encadrements : EDITE (UPMC), ED Paris-Est, Galilée (Paris 13), ED de Dauphine, ED Math-Orsay, ED P6, ED P7.

Durant la période 2008-2013, le laboratoire a accueilli 57 doctorants dont 12 sur contrat de type CIFRE ou assimilé (CEA), les autres sur des financements académiques divers (bourse MESR, DGA, AMX, AMN, Marie-Curie, ANR); 29 thèses ont été soutenues et 26 sont en cours (dont 5 soutenances prévues fin 2013). Il est à noter que parmi les 59 doctorants, 14 étaient issus de l'ENSTA. Le laboratoire a aussi accueilli entre 10 et 15 stagiaires par an (stage M2 ou niveau M1). Les doctorants sont vivement encouragés à suivre des écoles, des conférences. Ils sont financés pour cela.

## Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Un des objectifs majeurs est de poursuivre l'insertion de l'UMA dans l'environnement Paris-Saclay selon plusieurs axes. L'UMA est en train d'élaborer une offre de M1 d'ingénierie mathématique en partenariat avec l'université d'Orsay (ouverture à la rentrée 2015). L'UMA va également s'investir dans l'offre des parcours M2.

La stratégie scientifique de l'unité vise surtout à préserver ses conditions de travail actuelles et l'originalité du laboratoire. Chaque équipe prévoit de conforter les thèmes de recherche existants, chacune d'elle insistant sur sa volonté d'introduire plus de stochastique dans sa démarche.

Enfin, si le projet de rapprochement de l'ENSTA avec l'École Polytechnique se concrétise, les membres de l'unité seront dans l'obligation de réfléchir à une réorganisation de l'unité et ne pas rester dans la posture de déni actuelle.



## 4 • Analyse équipe par équipe

**Équipe 1 :** Optimisation et Commande

**Nom du responsable :** M. Pierre CARPENTIER

**Effectifs**

| Effectifs de l'équipe  | Nombre au 30/06/2013 | Nombre au 01/01/2015 |
|--|----------------------|----------------------|
| <b>N1</b> : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés                             | 6                    | 6                    |
| <b>N2</b> : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés                        |                      |                      |
| <b>N3</b> : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)       | 2                    | 2                    |
| <b>N4</b> : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)                            |                      |                      |
| <b>N5</b> : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.) |                      |                      |
| <b>N6</b> : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)     |                      |                      |
| <b>TOTAL N1 à N6</b>   | <b>8</b>             | <b>8</b>             |

| Effectifs de l'équipe                                       | Nombre au 30/06/2013 | Nombre au 01/01/2015 |
|---|----------------------|----------------------|
| Doctorants  | 12                   |                      |
| Thèses soutenues  | 8                    |                      |
| Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité   | 2                    |                      |
| Nombre d'HDR soutenues                                      | 1                    |                      |
| Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées | 5                    | 5                    |



## • Appréciations détaillées

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'équipe OC, « Optimisation et Commande », s'intéresse aux mathématiques de la décision et étudie des systèmes de nature variée (dynamiques, discrets, stochastiques...). Elle développe des outils mathématiques, algorithmiques et logiciels permettant d'analyser, de commander et d'optimiser les diverses classes de systèmes apparaissant en théorie du contrôle et en optimisation. Ces développements font appel à plusieurs branches des mathématiques comme la théorie des graphes, la géométrie différentielle, l'analyse (convexe, non lisse, stochastique), les probabilités et les processus stochastiques, ainsi que l'analyse numérique. Les applications traitées par le groupe sont nombreuses, et sont effectuées en collaboration avec des partenaires académiques et industriels diversifiés.

La production scientifique est abondante et de très bonne qualité (très bonnes revues du champ). L'équipe couvre un large spectre dans le domaine de l'optimisation et de la commande.

La diversité des membres du groupe « Optimisation et Commande » permet de couvrir un large spectre dans le domaine des mathématiques de la décision. Le groupe s'organise autour des trois thématiques de recherche suivantes :

#### *Optimisation et recherche opérationnelle*

La recherche dans cette équipe concerne l'optimisation et ses applications, avec une expertise sur les aspects discret, dynamique et stochastique. En optimisation stochastique (en temps discret), l'accent porte sur les méthodes numériques, la prise en compte du risque et la gestion des systèmes de grande taille, avec un intérêt particulier pour le monde de l'énergie. En optimisation combinatoire, les travaux de recherche portent sur la programmation mathématique en nombres entiers, l'optimisation dans les graphes et les réseaux, la prise en compte d'incertitudes, avec des applications dans les télécommunications et les énergies renouvelables. Ces travaux se font en collaboration avec le Cnam-ENSIIE (CEDRIC), l'ENPC (CERMICS), l'EPFL (Lausanne) et INRIA.

#### *Commande et systèmes dynamiques*

Dans cette thématique, on s'intéresse d'une part à l'étude de systèmes dynamiques issus de la physique (gravitation relativiste), et d'autre part à la commande des systèmes avec un intérêt particulier pour la commande optimale. Une partie de l'activité est dédiée à l'analyse mathématique de ces problèmes, ainsi que des équations aux dérivées partielles et des géométries associées. L'autre partie concerne les applications et l'étude de méthodes numériques. Ces travaux se font en collaboration avec INRIA (projets COMMANDS et GECO), le CMAP, l'Observatoire de Paris-Meudon (LUTH), et un réseau d'universités en Europe (Italie, Portugal, Suisse...).

Une approche originale, basée sur le contrôle optimal inverse, a été développée pour identifier des principes de minimisation dans le contrôle moteur humain. Les mouvements étudiés, la locomotion et les mouvements de pointage du bras, l'ont été avec la collaboration d'équipes de physiologistes, de roboticiens et d'automaticiens.

La modélisation des problèmes de contrôle optimal inclut souvent des contraintes sur la commande et sur l'état. En combinant à la fois des outils de l'analyse non lisse et la théorie de la viscosité, plusieurs résultats ont été établis pour la caractérisation de la fonction valeur de problème de commande optimale sous contraintes et sans hypothèse de contrôlabilité. Ces résultats s'avèrent très utiles pour analyser la sensibilité du problème considéré et aussi pour synthétiser une loi de commande optimale globale. Cette approche a été étendue à des problèmes de jeux différentiels, de contrôle impulsionnel et de contrôle hybride.

#### *Analyse stochastique et contrôle optimal stochastique*

La recherche dans ce domaine comporte un premier axe fondamental «Calcul stochastique via régularisation», avec un accent sur les problèmes en dimension infinie (équations aux dérivées partielles stochastiques). Une autre activité concerne la représentation probabiliste des solutions des EDP à coefficients irréguliers et les approches numériques associées. Une troisième partie de l'activité est plus orientée vers le contrôle du risque, par exemple en finance quantitative sur le problème de couverture en marché incomplet et ses applications aux marchés de l'énergie, ou encore le contrôle optimal stochastique en observation complète et partielle. Une dernière partie de l'activité concerne la commande optimale stochastique et la programmation stochastique avec des applications industrielles telle que la performance de la gestion de l'énergie de véhicules hybrides. Parmi les collaborations, on mentionne celles avec l'Université de Bielefeld, INRIA (projet MathRisk) et l'EPFL.



### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Les collaborations académiques nationales (CNAM-ENSIIE (CEDRIC), l'ENPC (CERMICS), les projets COMMANDS et GECO de l'INRIA, le CMAP, l'Observatoire de Paris-Meudon), internationales via un réseau d'universités en Europe (Italie, Portugal, Suisse (EPFL) ...) et industrielles (EDF, France Telecom/Orange, Thales, CFE, Renault, CNES...) sont nombreuses. L'équipe profite d'un financement via le projet européen SADCO (Sensitivity Analysis for Deterministic Controller Design - programme ITN), piloté par l'UMA, qui a permis le recrutement de doctorants et de post-doctorants en commande optimale.

### Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

L'équipe OC a développé des partenariats avec de nombreuses entreprises (EDF, France Telecom/Orange, Thales, CFE, Renault, CNE) et bénéficie de contrats et de bourses CIFRE. Un EC est conseiller scientifique du festival international d'astronomie de Fleurance.

### Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

Le laboratoire a soutenu des actions d'associations plus ou moins formalisées des EC avec d'autres équipes (Projets COMMANDS et GECO INRIA/CMAP, équipe Optimisation et Systems du CERMICS (ENPC), Optimisation Combinatoire du CEDRIC (CNAM)).

### Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

L'équipe a la responsabilité de deux filières, de cinq modules et de nombreux cours de 3ème année à l'ENSTA. Elle a participé à la création et a la responsabilité du Master Parisien de Recherche Opérationnelle (ENSTA, X, CNAM, ENSIIE, Telecom) : 30 étudiants, 12 entreprises partenaires.

Les membres de l'équipe ont la responsabilité de cours de M2 dans 5 masters différents (MMMEF, MPRO, EDP-Calcul Scientifique, Modélisation et Simulation, Astronomie et Astrophysique).

Enfin un programme complet de formation a été mené dans le cadre du projet SADCO : 8 post-docs et 20 doctorants (766 mois au total), 4 écoles thématiques; formation complémentaires; workshops industriels; workshops internes ; journées doctorales. Sur la période d'évaluation 9 thèses sont été soutenues, 15 en cours (dont 4 à soutenir en 2013).

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

L'équipe souhaite conforter les thèmes existants et renforcer les liens entre les différentes thématiques du groupe. En effet, l'équipe est composée de chercheurs actifs mais dont les thématiques restent assez éloignées. Il y a donc peu de connections entre les différents membres. Ils souhaitent que l'arrivée de probabilistes joue un rôle fédérateur.

### Conclusion

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Les chercheurs de l'équipe sont actifs et ont beaucoup de collaborations nationales et internationales, académiques et industrielles. Il y a une bonne dynamique de recherche. L'équipe s'appuie sur les filières de l'ENSTA pour développer et ancrer ses thématiques. Elle peut ainsi attirer de bons étudiants.

- *Points faibles et risques liés au contexte :*

L'équipe a un faible effectif. Elle est relativement dispersée thématiquement (les liens internes étant en grande partie basés sur l'enseignement), et non labélisée. Il lui est donc plus difficile d'élaborer une stratégie scientifique globale.



- *Recommandations :*

L'équipe qui a déjà des associations individuelles avec des projets INRIA aurait sûrement intérêt à se rapprocher des gros laboratoires de l'École Polytechnique, surtout dans une perspective plus ou moins claire de rapprochement des deux écoles. La juxtaposition des deux équipes de l'unité est artificielle et l'équipe OC pourrait obtenir la reconnaissance qu'elle souhaite par une restructuration scientifique.



**Équipe 2 :** Propagation des Ondes, Etude Mathématique et Simulation

**Nom du responsable :** M. Patrick JOLY

**Effectifs**

| Effectifs de l'équipe  | Nombre au 30/06/2013 | Nombre au 01/01/2015 |
|--|----------------------|----------------------|
| <b>N1</b> : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés                             | 4                    | 4                    |
| <b>N2</b> : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés                        | 10                   | 10                   |
| <b>N3</b> : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)       | 1                    | 1                    |
| <b>N4</b> : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)                            |                      |                      |
| <b>N5</b> : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.) | 3                    |                      |
| <b>N6</b> : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)     |                      |                      |
| <b>TOTAL N1 à N6</b>   | <b>18</b>            | <b>15</b>            |

| Effectifs de l'équipe                                       | Nombre au 30/06/2013 | Nombre au 01/01/2015 |
|---|----------------------|----------------------|
| Doctorants  | 13                   |                      |
| Thèses soutenues  | 21                   |                      |
| Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité   | 2                    |                      |
| Nombre d'HDR soutenues                                      | 1                    |                      |
| Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées | 9                    | 9                    |



## • Appréciations détaillées

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'équipe POEMS, « Propagation des Ondes, Etude Mathématique et Simulation » est une unité mixte CNRS/ENSTA/INRIA-Saclay qui travaille sur l'étude et le développement de méthodes numériques pour les phénomènes de propagation d'ondes. La production scientifique est remarquable, tant du point de vue de la qualité (dans les meilleures revues du domaine) que de la quantité, avec un positionnement scientifique original partant des mathématiques appliquées pour aller jusqu'aux applications industrielles. Les travaux se déclinent en plusieurs thématiques décrites succinctement ci-dessous :

#### Le traitement des frontières artificielles

C'est une des thématiques classiques de l'équipe pour laquelle elle est internationalement reconnue. Jouant un rôle important dans la plupart des applications qui font intervenir des phénomènes de propagation d'ondes, ce sujet a été à la base de 7 thèses et d'une collaboration avec le CEA-LIST. Des résultats ont été obtenus dans deux directions :

La méthode PML. L'applicabilité de la méthode a été élargie dans plusieurs directions, soit par la construction et l'analyse d'algorithmes nouveaux, soit par l'application de versions connues des PML dans des situations nouvelles, comme par exemple pour la modélisation numérique de coins de métamatériaux où des phénomènes surprenants ont été découverts théoriquement et par des calculs numériques. POEMS participe à deux projets ANR, METAMATH et CHROME, contenant des sujets de recherche basés sur la méthode PML.

Conditions aux limites transparentes dans des milieux périodiques. Un formalisme a été développé qui est à la fois original et utile en pratique. Une thèse est en cours en collaboration avec le CEA, montrant l'intérêt du sujet dans des applications industrielles, mais l'activité concernant ce point est en retrait par rapport à la période précédente.

#### Équations intégrales

Dans le cadre d'une thèse, des techniques intéressantes pour le calcul d'intégrales singulières ont été construites. Grâce aux derniers recrutements, la thématique gagne plus d'importance. Des résultats sur des méthodes rapides pour des équations intégrales en élasticité ont été obtenus. Le nouveau projet ANR RAFFINE porté par POEMS est concentré sur des estimations a posteriori et des méthodes adaptatives - aspects de la méthode des équations intégrales qui ne sont actuellement étudiés que par un petit nombre de mathématiciens au niveau international. Pour la France, c'est un nouveau sujet, et le projet peut - de par la collaboration de ONERA, CERFACS, EADS, Thales, IMACS - avoir le potentiel de créer un réseau de visibilité internationale réunissant des chercheurs universitaires et industriels, avec un rôle important pour POEMS.

#### Analyse asymptotique

L'équipe développe des méthodes asymptotiques pour des géométries spécifiques comme par exemple remplacer un anneau périodique par une condition frontière de transmission. Des codes ont été produits mais la plupart des résultats restent théoriques.

#### Schémas numériques en domaine temporel

L'équipe POEMS possède une expertise reconnue sur ce sujet qu'elle a continué à développer aussi bien en électromagnétisme qu'en élasto-dynamique. En électromagnétisme, les travaux ont porté sur l'utilisation de maillage non conforme et hybrides ainsi que sur des méthodes à pas de temps local conservatives. En élasto-dynamique, les travaux ont portés sur le découplage des ondes de pression et de cisaillement.

#### Guide d'ondes

L'équipe POEMS mène sur la thématique guides d'ondes des recherches originales depuis de nombreuses années. En particulier, elle a mené des études sur les guides d'ondes dits « ouverts » qui posent des problèmes difficiles en raison de la présence d'un spectre continu que l'on ne trouve pas dans les guides fermés. La mise en œuvre de PML pour simuler la partie « ouverte » du guide dans un tel contexte conduit à des difficultés particulières qui ont été analysées en détail. On note également des travaux sur les guides uniformes ainsi que le développement pour les guides d'ondes fermés de modèles asymptotiques de la diffraction par un petit obstacle ou une petite déformation de la frontière.



## Problèmes inverses

L'étude de problèmes inverses a été menée notamment par des chercheurs qui ont depuis quitté l'équipe. Toutefois, l'expertise de POEMS peut être très intéressante dans l'étude de problèmes en acoustique (avec des méthodes de retournement temporel). Il y a beaucoup d'applications en ingénierie (domaine médical, sonar, radar) qui relèvent de la compétence de POEMS.

## Piano

Ce thème de par ses aspects pluridisciplinaires, combinant acoustique musicale, modèle mathématique, simulation numérique et calcul haute performance, a produit des résultats remarquables récompensés par le prix de la meilleure communication à l'ASA en 2011. Cette recherche devrait se poursuivre dans le cadre d'un projet européen ITN.

## Aéro-acoustique

C'est une des thématiques qui fédère le plus de personnels de l'équipe et qui est d'une grande importance pour les applications industrielles. A ce jour, la plupart des activités portent sur le cas harmonique avec comme projet d'étudier un modèle non standard de type Goldstein. En raison de la nature large bande des sources de bruit dans ce domaine, il serait intéressant de mettre également l'accent sur l'étude de modèles temporels.

## Les métamatériaux électromagnétiques

C'est une nouvelle activité qui a beaucoup d'importance pratique. Des résultats basés sur des techniques très originales ont été obtenus et sont internationalement reconnus. Des nouveaux phénomènes surprenants reliés aux singularités de coins ont été détectés et analysés théoriquement et numériquement. Le projet ANR METAMATH porté par POEMS pourra aider à maintenir le haut niveau de recherche dans ce sujet important pour l'avenir.

## Contrôle non destructif

Ce thème est un des thèmes important de l'équipe POEMS tant du point de l'activité scientifique que contractuelle. Dans le domaine ultrasonore, on note en particulier le travail remarquable réalisé sur la modélisation en temps des capteurs piézoélectriques qui a donné lieu à la fois à des développements théoriques originaux, des développements numériques et un transfert vers un industriel. Il serait souhaitable que ce thème porteur soit poursuivi malgré la fin de la thèse financée dans ce cadre. Des études dans le domaine fréquentiel sur la diffraction par un défaut dans un guide d'onde élastique ont également été menées. On note aussi le développement d'approches utilisant les ondes électromagnétiques. Cette thématique démontre tout le savoir-faire de POEMS permettant d'aller jusqu'au transfert technologique vers un industriel.

## Le code éléments finis Xlife++

L'équipe POEMS, suite à une réflexion en interne, a décidé la mise en place d'une plate-forme de développement commune aux différents projets portés par le laboratoire. Au delà du caractère structurant au sein de l'équipe, cette plate-forme pourrait également faciliter la dissémination des développements réalisés au sein de l'équipe vers les laboratoires demandeurs de modèles numériques. On note le recrutement d'un ingénieur de recherche CNRS, réalisé en 2011 afin de participer à sa réalisation en accord avec les recommandations faites à l'issue de la précédente évaluation. La pérennité de cette activité structurante de l'équipe semble donc acquise et on ne peut que s'en féliciter.

## Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le rayonnement et l'attractivité académiques sont importants. Il y a une reconnaissance nationale et internationale via par exemple l'organisation de nombreux colloques en France et à l'étranger (dont le reconnu congrès WAVES), de nombreuses conférences invitées ainsi que la participation à des activités éditoriales dans des journaux internationaux. L'équipe POEMS est également fortement impliquée dans l'activité d'un GDR européen sur le contrôle non destructif.





## Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

L'activité partenariale avec le monde de l'industrie est opérée au travers de contrats, de financements de doctorants directement par l'entreprise (bourse Cifre ou assimilée), ou d'appels d'offres (ANR, projet européen) dans lesquels interviennent des industriels. Durant cette période, un important partenariat avec le CEA/LIST s'est développé (3 thèses et 3 post-docs et partenaire de POEMS dans 2 projets ANR et 1 projet Européen). POEMS est également partenaire du projet Européen SIMPOSIUM (15 partenaires de 6 pays) coordonné par le CEA dont l'objectif est de rassembler sur une seule plate-forme des outils numériques spécifiquement conçus pour la simulation du Contrôle Non Destructif.

## Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

L'équipe organise une fois par mois un séminaire qui comporte deux exposés. Il n'y a pas de conseil de laboratoire pour cette équipe qui est une UMR. L'équipe initialement répartie sur deux sites est maintenant regroupée dans des locaux neufs sur le plateau de Saclay, ce qui a été jugé positivement par tout le monde et tout particulièrement par les doctorants.

## Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

L'équipe participe à des masters et a la co-responsabilité du master Modélisation et Simulation. Elle a aussi organisé une école CEA-INRIA-EDF intitulée « Waves in periodic media : mathematical and numerical aspects » à l'ENSTA, du 15 au 19 avril 2013 (50 participants dont 6 étrangers).

## Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

La stratégie scientifique de l'équipe vise surtout à préserver ses conditions de travail actuelles et son originalité. L'équipe prévoit de conforter les thèmes de recherche existants, tout en insistant sur sa volonté d'introduire plus de stochastique dans sa démarche

## Conclusion

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

La qualité scientifique et la quantité des travaux effectués sont excellentes avec un positionnement original à l'interface entre les mathématiques appliquées et l'industrie. Suite au déménagement de l'ENSTA sur le plateau de Saclay, l'équipe est maintenant réunie sur un seul site dans des locaux neufs. Elle dispose maintenant d'excellentes conditions de travail et bénéficie de la proximité d'un environnement scientifique riche.

- *Points faibles et risques liés au contexte :*

La plupart des projets semblent dépendre des thèses de doctorants. Cela peut conduire à un manque de continuité lorsque l'étudiant termine sa thèse et quitte l'unité. A titre d'exemple, le projet « Piano » présenté comme un projet phare dans le dossier et la visite disparaît complètement dans le projet à 5 ans de l'équipe. Il s'ensuit une impression de dispersion thématique qui conduit à un manque de lisibilité. On a un peu le sentiment à la lecture du rapport qu'il s'agit d'une superposition de thèmes résultant d'opportunités saisies plus que d'une véritable politique scientifique. Il faudrait donner un peu plus de cohérence à la présentation de l'ensemble des activités scientifiques.

On attend d'une équipe associée à l'INRIA un certain niveau de production logicielle et de rayonnement auprès des communautés intéressées par ses travaux sur la modélisation numérique de la propagation d'ondes. La mise en place de la plate-forme XLife++ est une étape importante qui mériterait cependant d'être diffusée plus largement que ce qui est envisagé actuellement.

- *Recommandations :*

L'équipe devrait élaborer un projet scientifique structuré, conforme à la qualité de ses membres. Elle devrait également développer des collaborations avec l'autre équipe de l'UMA pour donner de la cohérence à l'ensemble.



Enfin il est important que l'équipe réfléchisse à son devenir institutionnel si une réorganisation en profondeur des laboratoires de Paris-Saclay et un rapprochement de l'ENSTA avec l'École polytechnique devait se concrétiser dans les prochaines années.



## 5 • Déroulement de la visite

### Date de la visite

Début : Mercredi 11 décembre 20013 à 8h30  
Fin : Mercredi 11 décembre 20013 à 18h 20

### Lieu de la visite

Institution : ENSTA Paris-Tech,  
Adresse : 823 bd des Maréchaux, 91762 Palaiseau

### Locaux spécifiques visités :

laboratoire, bureaux

### Déroulement ou programme de visite

Amphi 2329

09h00 - 09h45 : présentation générale UMA/POEMS et questions  
09h45 - 10h25 : deux exposés scientifiques  
10h25 - 10h40 : codes de calcul  
10h40 - 11h00 : pause

Salle séminaire 2320

11h00 - 11h30 : rencontre avec l'équipe Poems  
11h30 - 11h55 : rencontre avec l'équipe OC  
11h55 - 12h15 : rencontre avec les membres du laboratoire sans l'équipe de direction

Coin café UMA

12h15 - 13h15 : visite des locaux et déjeuner avec tout le laboratoire

Salle séminaire 2320

13h15 - 13h40 : rencontre avec les ITA  
13h40 - 14h10 : rencontre avec les doctorants et post doctorants  
14h10 - 14h40 : rencontre avec l'équipe de direction  
14h40 - 15h20 : rencontre avec les responsables de Formation (ED/Masters/ENSTA)  
15h20 - 15h40 : pause

Salle de réunion 2326

15h40 - 16h20 : rencontre avec les tutelles  
16h20 - 18h20 : réunion du comité à huis clos



## 6 • Observations générales des tutelles

Palaiseau, le 14 mars 2014

N° 14/08 ENSTA/D

Monsieur le Président  
du Comité d'Expert  
AERES

Affaire suivie par : Isabelle TANCHOU  
Directrice de la formation et de la recherche  
Tel : 01.81.87.19.00  
isabelle.tanchou@ensta-paristech.fr

**Objet :** AERES – Evaluation Unité de Mathématiques Appliquées : observations de portée générale

**Réf :** S2PUR150008240 – Unité de Mathématiques Appliquées – 0751878J

Monsieur le Président,

Dans l'avis sur l'unité et sur les deux équipes qui la composent (POEMS et OC), le comité reconnaît notre activité scientifique en la qualifiant de très haut niveau, avec une excellente production scientifique, un fort rayonnement, un positionnement à l'interface du monde académique et du monde de l'entreprise, une activité d'encadrement doctoral soutenue et une forte implication dans l'enseignement. Ceci, à nos yeux, témoigne d'une certaine réussite du laboratoire et devrait l'encourager à continuer dans cette direction.

Néanmoins le rapport soulève quelques points et recommandations qui nous paraissent mériter des commentaires.

Un des points qui apparaît à la lecture du rapport est la nature « artificielle » de la coexistence de deux équipes sur des thématiques différentes. S'il y a une organisation en deux équipes c'est bien qu'il y a deux axes majeurs thématiques au laboratoire qui permettent d'une part, à l'instar des unités d'enseignement des universités, de répondre aux besoins de formation de l'ENSTA dans les grands domaines de l'ingénierie mathématique, et d'autre part, de développer deux domaines d'expertise ayant des interactions avec d'autres champs disciplinaires (mécanique-physique-informatique) de natures légèrement différentes, l'équipe POEMS ayant un positionnement mathématique-mécanique assez affirmé. Dans le domaine de l'enseignement, la synergie entre les deux équipes est forte. Même s'il existe déjà quelques collaborations de recherche non concrétisées par des publications, nous notons tout l'intérêt d'intensifier la collaboration des deux équipes sur certaines thématiques (problèmes inverses, modélisation stochastique par exemple). Le rapport en fait d'ailleurs la recommandation à l'équipe POEMS.

Nous estimons que la question du rapprochement entre l'ENSTA et l'Ecole Polytechnique a pris une place importante dans ce rapport ; un certain nombre de remarques et de recommandations étant données à l'égard de cette question. La date de l'audition a probablement pesé sur cette analyse car

le laboratoire était alors en pleine réflexion sur divers scénarii, certain allant même jusqu'à la dissolution, voire la disparition du laboratoire. L'analyse qui a été menée à l'époque, en phase avec celle de la direction, nous a conduit à privilégier des scénarii qui maintenaient l'identité de l'école et de ses laboratoires. Nous n'estimons pas que cela traduisent une posture de « refus » de toute évolution, comme le mentionne à deux reprises le rapport. Aujourd'hui, la situation a évolué et l'on parle dorénavant d'un rapprochement fondé sur une vision partagée qui permettra d'envisager des collaborations préservant l'identité de chacun et s'inscrivant pleinement dans la stratégie d'intégration de l'UMA au sein de l'université Paris-Saclay, que l'on mène depuis plus d'un an.

Sur la base des deux points précédents que nous contestons, le rapport en arrive à suggérer une restructuration scientifique sans donner de précisions sur la direction à prendre : éclatement de l'équipe OC, dissociation des deux équipes, ... conduisant à un affaiblissement certain de l'UMA. Autant d'évolutions qui ne sont pas envisageables par la direction de l'école compte-tenu de l'importance qu'elle accorde à cette unité dans son dispositif d'enseignement/recherche. L'équipe OC a légitimement exprimé un besoin de reconnaissance de son collectif. La demande d'une évaluation AERES commune aux deux équipes de l'UMA visait justement à apporter un début de reconnaissance de cette équipe. Nous regrettons que ce point important n'ait pas fait l'objet d'une discussion avec la direction lors de la visite du comité.

L'analyse de la politique scientifique de l'équipe POEMS mentionne "une impression de dispersion thématique" et "un manque de continuité", ce qui ne nous semble absolument pas refléter la réalité. En effet, POEMS a une identité thématique très forte comparativement à d'autres unités de recherche, identité qui constitue son projet scientifique : il s'agit d'étudier mathématiquement et de simuler numériquement les ondes dans tous les domaines de la physique, les sujets devant être à la fois ambitieux et pertinents, tant sur le plan académique que sur celui de leurs éventuelles retombées applicatives. La visibilité de POEMS dans ce domaine est largement reconnue. Il est vrai que cette unité thématique et l'expertise qui en résulte permettent à l'équipe POEMS d'aborder une grande diversité de problèmes, divers par leur nature physique ou par les difficultés mathématiques et numériques qu'ils soulèvent. Cette diversité est une richesse car elle permet une fertilisation croisée des travaux menés. Mais en voulant la mettre en valeur, l'équipe a manifestement donné une image pas assez lisible de ses orientations, perçues alors comme opportunistes et dispersées. On peut regretter l'absence totale de question scientifique le jour de l'évaluation, questions qui auraient pu permettre de dissiper cette impression.

### **Points particuliers**

Contrairement à ce que dit le rapport, le travail de POEMS sur le piano (cité comme exemple d'opportunisme et de discontinuité) s'inscrit dans la thématique de l'acoustique musicale, poursuivie depuis une vingtaine d'années en collaboration avec Antoine Chaigne, chercheur en acoustique à l'ENSTA (modélisation de la timbale puis de la guitare et enfin du piano). Sur le piano, l'activité se poursuit dans le cadre du projet européen BatWoman auquel POEMS participe, et l'étude du violon est en projet.

C'est parce qu'il y a eu une dizaine d'années de travail sur les milieux périodiques d'une part et sur les milieux à coefficients négatifs d'autre part que POEMS a monté le projet ANR METAMATH, projet ambitieux dans le domaine de la modélisation des métamatériaux, qui implique près de la moitié des membres de POEMS. L'activité sur les milieux périodiques n'est donc pas "en retrait" comme cela est écrit dans le rapport. Elle s'est au contraire diversifiée et se poursuit sous plusieurs formes : le projet METAMATH, les problèmes inverses dans les milieux périodiques, et l'étude spectrale des guides périodiques.

Dans le paragraphe concernant les problèmes inverses, il est écrit dans le rapport que "L'étude des problèmes inverses a été menée notamment par des chercheurs qui ont depuis quitté l'équipe", alors que le rapport fourni par l'UMA indiquait au contraire que cette activité avait connu un développement particulier pendant la période évaluée avec l'arrivée de nouveaux chercheurs, et

constituait l'une des perspectives importantes pour l'avenir, motivée en particulier par ses applications au contrôle non destructif.

Dans le paragraphe concernant l'analyse asymptotique, le rapport de l'AERES ne mentionne qu'un des nombreux sujets traités par POEMS (étude des couches de cisaillement en aéroacoustique, propagation dans les réseaux de câbles, modélisation des revêtements électromagnétiques ou des couches de colle en élastodynamique, méthode du gradient topologique etc...), et prétend que les résultats restent pour la plupart théoriques. Nous tenons à souligner qu'il s'agit là d'un thème important de l'équipe pour la période présente comme pour la période future, et que c'est justement l'une des originalités de POEMS d'exploiter ces travaux théoriques à des fins numériques.

Elisabeth CREPON

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'E' followed by a large, circular flourish that ends with a small dot.

Directrice de l'ENSTA ParisTech