

# Projet ANR- 13-MONU-0010

## MAIDESC

### Programme Modèles Numériques 2013

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION .....</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC .....</b>	<b>2</b>
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics .....	2
B.2	Résumé consolidé public en français .....	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	3
<b>C</b>	<b>MÉMOIRE SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>3</b>
C.1	Résumé du mémoire .....	4
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art .....	4
C.3	Approche scientifique et technique.....	4
C.4	Résultats obtenus .....	4
C.5	Exploitation des résultats .....	4
C.6	Discussion .....	4
C.7	Conclusions.....	4
C.8	Références.....	4
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES.....</b>	<b>4</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET .....</b>	<b>5</b>
E.1	Indicateurs d'impact .....	5
E.2	Liste des publications et communications.....	6
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	6
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .....	7

*Ce document a reçu le feu vert des partenaires du projet.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	MAIDESC
Titre du projet	Maillages adaptatifs pour les interfaces instationnaires avec déformations, étirements, courbures
Coordinateur du projet (société/organisme)	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
Date de début du projet	01/10/2013
Date de fin du projet	30/09/2017
Labels et correspondants des pôles de compétitivité (pôle, nom et courriel du corresp.)	non
Site web du projet, le cas échéant	<a href="http://www-sop.inria.fr/tropics/maidesc.html">www-sop.inria.fr/tropics/maidesc.html</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr Alain Dervieux
Téléphone	04 92 38 77 91
Courriel	<a href="mailto:alain.dervieux@inria.fr">alain.dervieux@inria.fr</a>
Date de rédaction	Novembre 2017

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	<p>Partenaire coordinateur : INRIA-Ecuador a Sophia-Antipolis, resp. Alain Dervieux.</p> <p>Partenaire 2 (même enveloppe que Partenaire 1): INRIA-Gamma3 a Rocquencourt (début du projet) puis Saclay, resp. Frédéric Alauzet.</p> <p>Partenaire 3 : IMAG (ex-ACSIOM) à l'université de Montpellier, resp. Bruno Koobus.</p> <p>Partenaire 4 : Société Lemma à Sophia-Antipolis, resp. Olivier Allain.</p> <p>Partenaire 5 : Cemef Ecole des Mines de Paris à Sophia-Antipolis, resp. Elie Hachem.</p> <p>Partenaire 6 : Société Transvalor à Sophia-Antipolis, resp. Etienne Wey.</p> <p>Partenaire 7 : INRIA-Cardamom à Bordeaux, resp. Cécile Dobrzynski.</p>
---	--

## **B RESUME CONSOLIDE PUBLIC**

### **B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

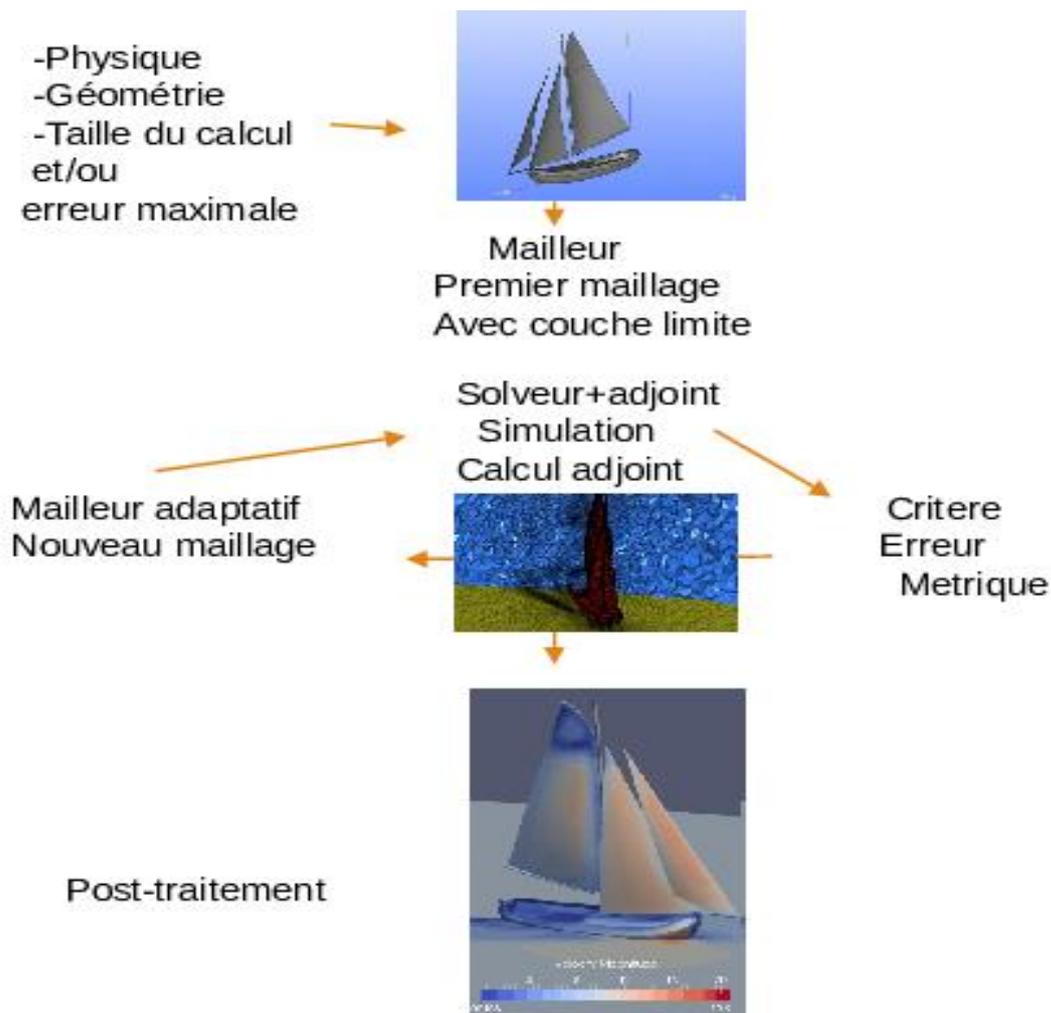
#### **Titre d'accroche du projet : Maillages adaptatifs pour les interfaces et couches limites en ingénierie**

**Titre 1 : Avancement des technologies numériques pour le calcul avec maillage adaptatif en mécanique des fluides focalisant sur les interfaces entre deux fluides et les chocs, couches limites, couches de mélange.**

**Paragraphe 1 :** L'usage de la simulation numérique est de plus en plus fréquent et crucial dans les réalisations industrielles, notamment en énergie où la mécanique des fluides joue un rôle central. A cet effet le modèle numérique est appliqué à chaque cas particulier à l'aide d'un maillage, dont la qualité décide de la précision du résultat, c'est-à-dire de la sécurité du produit et de l'efficacité de son design. Avec des phénomènes de plus en plus complexes et des exigences de précision de plus en plus fortes, l'adaptation du maillage à la physique du phénomène devient indispensable et doit se faire de plus en plus *automatiquement*, voire de manière *transparente* pour l'ingénieur. Cette adaptation passe par des technologies qu'il faut améliorer dans le bon sens : adapter les maillages eux-mêmes, mettre au point les analyseurs d'erreur numérique spécifiant les meilleurs maillages, coupler efficacement maillages et solveurs sur machine parallèle. Le consortium a apporté des réponses aux défis identifiés : meilleure topologie de maillage via des maillages métrique-orthogonaux, meilleures métriques pour les interfaces et couches limites soit par de la physique soit par une formulation de contrôle optimal, couplages maillage-simulateur efficaces en stationnaire (Mutigrille) et en instationnaire (Multirate), ainsi que sur ordinateur massivement parallèle (partitionnements adaptés), maillages courbes et ordre élevé. La plupart de ces avancées sont intégrées dans le logiciel d'une au moins des deux sociétés de simulation numérique partenaires, avec des applications aux éoliennes et aux carènes de bateaux. Publications et livraisons sont accessibles sur le site du projet <http://www-sop.inria.fr/tropics/livraisons-maidesc.html>

**Titre 2 : Nouvelles méthodes : maillages, estimations d'erreur et algorithmique de couplage d'algorithmes.**

**Paragraphe 2 :** Le maillage doit, pour être adapté aux interfaces et couches limites, comporter des éléments étirés mais sans présenter d'angles obtus défavorables à l'approximation des gradients des différents champs. La nouvelle technologie métriques-orthogonale aligne les arêtes avec les directions caractéristiques de la métrique et satisfait donc par construction à ce critère. Une des difficultés de l'adaptation de maillage est de choisir un nouveau maillage, meilleur, sans faire simplement appel à l'intuition ! Les méthodes de métriques optimales orientées objectif ou orientées norme (de l'erreur) permettent de bâtir mathématiquement un problème d'optimisation produisant un maillage qui minimise l'erreur sur le critère choisi par l'utilisateur, donnant accès à une évaluation rigoureuse des marges de l'étude. L'étude du couplage entre maillages adaptatifs et solveur fait appel à des théories évaluant la complexité des couplages, c'est à dire in fine le temps calcul nécessaire, et permet donc sa minimisation.



**Schéma 1 :** Comment sera la plate-forme de simulation nouvelle génération : l'utilisateur communique les données physiques, la géométrie et une taille de calcul maximale (nombre de points du maillage) ainsi qu'une erreur de prédiction maximale. Le mailleur construit un premier maillage sur lequel le solveur évalue un écoulement et son écoulement adjoint. Puis, *en boucle*, critère et métrique, puis nouveau maillage, puis nouveaux écoulements sont calculés, jusqu'à convergence du point fixe, produisant un calcul sur maillage parfaitement adapté, remplissant les conditions de nombre de points et/ou erreur de prédiction spécifiés.

### Résultats majeurs du projet :

Ce projet prépare la nouvelle génération de logiciels de simulation aérodynamique et hydrodynamique (Schéma 1). Ces logiciels construiront, en couplage avec le calcul de l'écoulement, le maillage le meilleur pour ce calcul, évitant ce souci à l'ingénieur et permettront des calculs beaucoup plus difficiles qu'avant, et ceci dans des conditions de grande sécurité dans les résultats (meilleur contrôle des marges industrielles). L'objectif du maillage adaptatif fiable des couches limites est essentiellement atteint grâce notamment aux nouveaux mailleurs métriques-orthogonaux et aux critères soit directement basés sur la physique, soit basés sur le contrôle optimal produisant des maillages optimaux. Des progrès importants en efficacité (rendant certains calculs enfin possibles) ont été accomplis grâce à de

nouveaux algorithmes de remaillage, résolution, couplage. Les applications concernent les éoliennes et l'hydrodynamique des navires.

#### **Production scientifique et brevets depuis le début du projet :**

Les partenaires contribuent et animent des ateliers scientifiques réguliers sur le sujet chaud des « maillages adaptatifs ou non » et notamment aux réunions annuelles de l'International Meshing Round Table co-organisé par Sandia (<http://imr.sandia.gov/>). Ils contribuent à des documents prospectifs sur le sujet en coopération avec l'AIAA.

Compte tenu, justement, du caractère chaud du sujet, les communications en colloques sont les plus nombreuses : 49 communications. Articles en revue : 11. Les nouveaux logiciels de maillage sont déposés à l'APL et plusieurs sont commercialisés.

Le projet Maidesc est un projet de recherche fondamentale coordonné par INRIA-Ecuador à Sophia-Antipolis. Il associe les sociétés Lemma et Transvalor ainsi que Cemef-Ecole des Mines de Paris, IMAG-Université de Montpellier, INRIA-Gamma3 à Saclay, INRIA-Cardamom à Bordeaux. Le projet a commencé en novembre 2013 et a duré 50 mois. Il a bénéficié d'une aide de 922 053,95 € pour un coût global de l'ordre de 4 038 692,20 €.

## **B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS**

### **Project title: Adaptive mesh for interfaces and boundary layers in engineering**

**Advancement of digital technologies for computation with adaptive mesh in fluid mechanics focusing on the interfaces between two fluids and shocks, boundary layers, mixing layers.**

The use of numerical simulation is more and more frequent and crucial in industrial realizations, especially in energy where fluid mechanics plays a central role. For this purpose the numerical model is applied to each particular case using a special mesh, whose quality decides that of the result: efficiency and safety, in particular. With more complex phenomena and increasingly demanding precision requirements, the adaptation of the mesh to the physics of the phenomenon becomes indispensable and must be done more automatically, or even transparently for the engineer. This adaptation involves technologies that must be improved in the right direction: adapt the meshers themselves, develop digital error analyzers specifying the best meshes, effective coupling with solvers on parallel machine. The consortium provided answers to the challenges identified: better mesh topology via metric-orthogonal meshes, better metrics for the interfaces and boundary layer either by physics or by an optimal control formulation, effective meshing-simulator couplings in stationary (Mutigrad) and unsteady (Multirate), as well as on massively parallel calculator (adapted partitions), curved meshes and high order. Most of these advances are integrated into the software of at least one of the two partner digital simulation companies, with applications to wind turbines and boat hulls. Publications and deliverables can be accessed at <http://www-sop.inria.fr/tropics/livraisons-maidesc.html>

**New methods: meshers, error estimates and algorithmic coupling algorithms.**

In order to be adapted to the interfaces and boundary layers, the mesh must have elements that are stretched but without obtuse angles. The new metric-orthogonal mesher aligns the edges with the characteristic directions of the metrics and thus satisfies by construction this criterion. One difficulty of mesh adaptation is to define a better mesh without simply using intuition! Objective-oriented or norm(of error)-oriented metric methods can mathematically construct an optimization problem that produces *the* mesh which minimizes the error on the criterion chosen by the user, giving access to a rigorous evaluation of the margins of the study. The study of the coupling between adaptive meshes and solver calls upon theories evaluating the complexity of the couplings, i.e. in fine the necessary computation time, thus allowing its minimization.

**Major results of the project:**

This project is preparing the new generation of aerodynamic and hydrodynamic simulation software (Schéma 1). This software builds, coupled with the computation of the flow, the best mesh for this computation, avoiding this concern to the engineer and allowing calculations much more difficult than before, and this in conditions of great security in the results (better control of industrial margins). The objective of reliable adaptive meshing of boundary layers is essentially achieved through new metric-orthogonal meshes and through new criteria that are either directly physics-based or based on optimal control that produces optimal meshes. Significant progress in efficiency (making some calculations finally possible) have been achieved thanks to the new algorithms of remeshing, solving, and coupling. The applications concern wind turbines and hydrodynamics of ships.

**Scientific production and patents since the beginning of the project:**

The partners contribute and animate regular scientific workshops on the hot topic of adaptive or non-adaptive linkages and in particular at the annual meetings of the International Meshing Round Table co-organized by Sandia (<http://imr.sandia.gov/>). They contribute to forward-looking documents on the subject in cooperation with AIAA. In view of the warm nature of the subject, the production of symposium papers is the most important: 49 communications. Articles with review: 11. The new mesh software is uploaded to the APL and several parts are marketed.

**Illustration: see Schéma 1 above.**

The Maidesc project is a basic research project coordinated by INRIA-Ecuador in Sophia-Antipolis. It associates Lemma and Transvalor as well as Cemef-Ecole des Mines in Paris, IMAG-University of Montpellier, INRIA-Gamma3 in Saclay, INRIA-Cardamom in Bordeaux. The project started in November 2013 and lasted 50 months. It received an aid of € 922,053.95 for an overall cost of € 4,038,692.20.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE (*MEMOIRE SCIENTIFIQUE CONFIDENTIEL : NON*)

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce projet prépare la nouvelle génération de logiciels de simulation aérodynamique et hydrodynamique (Schéma 1). Ces logiciels construiront, en couplage avec le calcul de l'écoulement, le maillage le meilleur pour ce calcul, évitant ce souci à l'ingénieur et permettant des calculs beaucoup plus difficiles qu'avant, et ceci dans des conditions de grande sécurité dans les résultats (meilleur contrôle des marges industrielles). L'objectif du maillage adaptatif fiable des couches limites est essentiellement atteint grâce aux nouveaux maillages métriques-orthogonaux et aux critères soit directement basés sur la physique, soit basés sur le contrôle optimal produisant des maillages optimaux. Des progrès importants en efficacité (rendant certains calculs enfin possibles) ont été accomplis grâce aux algorithmes de remaillage, résolution, couplage. Les applications concernent les éoliennes et l'hydrodynamique des navires.

### C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

L'enjeu de la recherche proposée est d'aider à combler le fossé technologique entre la génération actuelle de logiciels de simulation sur maillages non structurés et de nouveaux logiciels maillage-adaptatifs, multi-échelle et multi-physique. La réduction de cet écart entraînera d'abord une simplification du travail de l'ingénieur et une amélioration de la sécurité en ingénierie. En effet, l'analyse de ces méthodes montre que les erreurs sont mieux prédites et que la convergence vers une solution exacte est mieux assurée. De plus, la simulation de nombreux nouveaux phénomènes deviendra abordable au calcul. Du point de vue économique, cette nouvelle génération d'outils de simulation va donc doter leurs propriétaires et utilisateurs d'un avantage concurrentiel important.

La Mécanique des Fluides Numérique (MFN) combine la modélisation physique et les méthodes numériques basées sur les Equations aux Dérivées partielles (EDP). Il y a une forte attente pour étendre les méthodes basées maillage à des milieux instables hétérogènes, impliquant de multiples échelles, et notamment les couches limites minces et les interfaces séparant différents supports.

**Interfaces et couches limites.** Les interfaces sont des surfaces séparant différents médias ou phases (discontinuité dans les propriétés du milieu). Les couches limites sont des zones de forte variation concentrées sur des frontières du domaine. Des méthodes qui représentent les interfaces en maillage fixe existent depuis des décennies. Citons VOF (*volume of fluid*) et *level-set* [2] qui paramètre une surface via la ligne de niveau d'une fonction spéciale et s'associe potentiellement avec de l'adaptation de maillage.

**Frontières immergées.** Les méthodes de calcul d'écoulements autour d'objets immergés ou incorporés gagnent en popularité en MFN. Citons la frontière immergée [3], la frontière incorporée [4], le domaine fictif [5], la méthode cartésienne [6]. De nouvelles approches sont développées par le Cemef, la méthode du *volume immergé* [7, 8], puis la *contrainte immergée* dans [9, 10,11]. Ces méthodes simplifient le traitement des couplages de codes et de changements topologiques [12]. Elles créent des éléments extrêmement étirés le long de l'interface [13,14] mais doivent être étendues à des structures se déformant et se déplaçant.

**Ordre supérieur / courbure.** Les schémas stabilisés de troisième ordre modernes sont les volumes finis ENO [15], le discontinu Galerkin [16], les éléments finis stabilisés [17], et schémas distributifs [18]. Comment coupler ces schémas à de l'adaptation anisotrope ?

**Complexité des solveurs scalaires et parallèles.** Le contrôle des erreurs en temps interfère fortement avec la complexité globale du calcul. La complexité asymptotique peut être améliorée par une stratégie de pas de temps zonal telle que Runge-Kutta *multirate* [19].

**Indicateurs d'erreur spatiale.** Les méthodes *basées sur le hessien* supposent que la maîtrise des erreurs d'interpolation conduit à un bon contrôle des erreurs d'approximation. La relation hessien/métrique fait l'objet d'une *théorie continue* [20] et d'une *théorie discrète* [14]. Ces méthodes doivent être étendues à un ordre supérieur. La méthode DWR [21] minimise l'erreur d'approximation *a posteriori* sur un objectif scalaire. Les estimations *a priori* décrivent explicitement l'influence du maillage sur l'erreur [22]. Ces estimations, étendues de l'elliptique à Euler [23], nécessitent des analyses spéciales à chaque modèle.

**Génération de maille et adaptation.** *Métrique.* La représentation d'un maillage par une métrique doit être entièrement étendue aux calculs instationnaires. *Mouvement de maille.* Déplacer le maillage pour l'adaptation, reste une question plutôt ouverte. Il faut un modèle fiable pour les mailles fortement étirées [24]. *Régénération de maille.* Pendant des décennies, l'adaptation modifiait le maillage existant. L'*Adaptive Mesh Refinement* divise une sous-région. Mais l'adaptation isotrope ne converge pas au second ordre sur les discontinuités alors que l'adaptation anisotrope peut le faire. *Anisotropie.* Pour les Reynolds élevés, le rapport d'anisotropie doit être de 4-5 *ordres de grandeur*. Jusqu'à présent, malgré le développement de tant de codes de remaillage anisotrope, tels Feflo.a (George Mason), Forge3d (Mines de Paris), Fun3d (NASA Langley), Gamanic (INRIA), Madlib (Université catholique de Louvain), MeshAdap (RPI), Mmg3d (INRIA/Bordeaux INP/CNRS/Paris 6), Mom3d (École Polytechnique de Montréal), Tango (Polytechnique de Milan), LibAdaptivity (Imperial College), *il n'existe pas encore de logiciel capable d'effectuer une bonne adaptation de maillage anisotrope de la couche limite.* *Éléments courbes.* Les éléments courbes sont nécessaires pour les *couches limites courbes* et obligatoires pour les *approximations d'ordre au moins trois*.

### C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le programme rassemble en trois tâches plusieurs avancées pour maîtriser l'adaptation de maillage instationnaire à base métrique pour les interfaces et couches limites. **Tâche 1:** *Modélisation d'erreur:* étant donné un modèle physique et une approximation, avant d'essayer d'améliorer le maillage, nous devons évaluer une mesure d'erreur-approximation locale pour un ensemble de nouvelles configurations: approximation d'ordre élevé, erreurs en temps, formulations orientées vers une norme d'erreur d'approximation. **Tâche 2:** *Régénération du maillage et interfaces:* étant donné une description du meilleur maillage, nous devons le construire, en particulier dans le cas du suivi d'interface avec un fort étirement, une courbure, avec des représentations particulières de l'interface et du mouvement du maillage. **Tâche 3:** *Efficacité:* L'efficacité sera augmentée par de nouvelles boucles adaptatives temporelles, de nouvelles formulations spatiales optimales, leur adaptation à l'ordre élevé et le couplage à des algorithmes de résolution efficaces.

### C.4 RESULTATS OBTENUS

La nécessité d'un meilleur suivi des couches limites et des interfaces a conduit au développement d'une nouvelle génération de *mailleurs métrique-orthogonaux* [77,78], qui

permettent d'obtenir des étirements beaucoup plus élevés, mieux en accord avec la métrique, tout en assurant une meilleure précision de l'approximation. On obtient des améliorations importantes pour les interfaces (livraison T4-D6) et les couches limites [27]. L'un d'eux a été transféré à Lemma et introduit dans une boucle d'adaptation de maillage industriel pour calculer une rupture de barrage (*coopération INRIA-Gamma3 / Lemma*).

Une nouvelle *méthode orientée objectif* a été spécifiée pour la simulation d'écoulements visqueux compressibles [27]. Elle a été combinée avec un maillage métrique-orthogonal (*coopération INRIA-Ecuador/INRIA-Gamma3 et coopération avec Paris 6*).

Une nouvelle *formulation orientée-norme* [33] a été introduite. Une formulation orientée normes pour Euler 3D a été développée et démontrée [42] (*coopération INRIA-Ecuador/INRIA-Gamma3*). Une extension de l'adaptation anisotropique orientée-objectif à l'ordre trois est proposée dans [26]. Selon un *reviewer* de l'article, "l'extension à un système précis de troisième ordre est non triviale et l'approche proposée est unique et une contribution valable" (*coopération INRIA-Ecuador/INRIA-Gamma3 / Lemma et coopération avec Paris 6*). Dans [80] on propose une métrique optimale pour les erreurs d'interpolation de n'importe quel ordre. La combinaison *adaptation de maillage et multigrille complète* a été proposée, développée, démontrée et publiée [25]. Cette méthode développée par INRIA-Ecuador utilise le maillage d'INRIA-Gamma3 et a été transférée, étendue en 3D et parallélisée par Lemma. La plupart de ces nouveautés ont été identifiées comme importantes dans le document Vision 2030 [1]. Une synthèse a été proposée entre la méthode tensorielle et la méthode métrique continue [34] (*synthèse entre la méthode du Cemef et la méthode INRIA*).

Une nouvelle méthode *d'avance temporelle multirate explicite* a été développée [43]. C'est une méthode simple applicable aux modèles d'écoulements complexes. L'algorithme proposé est un prédictor-correcteur dans lequel le prédictor utilise des pas de temps plus importants grâce à l'agglomération de petites cellules voisines. Le correcteur est restreint aux petites cellules. La méthode a été introduite dans le code CFD massivement parallèle AIRONUM. Elle a été appliquée et testée pour un ensemble d'écoulements turbulents calculés avec les modèles LES, VMS, VMS dynamique et hybride (T5-D2 et thèse d'E. Itam, *coopération entre Montpellier, Lemma et INRIA-Ecuador*).

Une nouvelle approche hybride [81] a été utilisée pour générer des *maillages bidimensionnels et tridimensionnels courbes* de géométries complexes telles que des avions. Cette méthode, robuste et automatique permet en outre de conserver les structures particulières, telle que les *couches limites*, présentes dans le maillage initial. Une méthode d'adaptation de maillages anisotropes a été couplée avec une méthode de pénalisation afin de simuler avec précision des phénomènes de mécanique des fluides compressibles [76]. Pour les simulations instationnaires, une méthode de *déformation de maillage* a été développée et utilisée avec un schéma ALE afin de pouvoir simuler des objets en mouvements [73]. De plus, nous avons montré des *formules générales de p-adaptation* pour les schémas aux résidus distribués et testé leur robustesse sur des simulations bi- et tridimensionnelles d'écoulements subsoniques, transsoniques et supersoniques [74].

Le Cemef-Ecole des Mines de Paris a proposé une nouvelle procédure d'adaptation de maille de *couche limite anisotrope en formulation géométrique immergée* [61,68]. Il est basé sur l'utilisation de la méthode *multi-level-set* pour localiser la couche limite, pour contrôler la distribution de la taille du maillage, la forme et l'orientation assurant une gradation en

douceur. Lorsque la solution affiche un comportement anisotrope, nous la combinons avec un estimateur d'erreur basé sur les arêtes et une adaptation de maillage dynamique anisotrope sous la contrainte d'un nombre fixe d'éléments. Des applications en *aérodynamique à haut nombre de Reynolds* pour la prédiction des coefficients de traînée et de portance ainsi que des *écoulements complexes gaz-solide-liquide* ont été mises en place et validées.

L'objectif de Transvalor était de mailler une *éolienne en rotation*. C'est maintenant un succès, basé sur une solution entièrement opérationnelle, cf. la vidéothèque du site web. Collaborer avec les partenaires du projet nous a suggéré quelques fonctionnalités qui seront ajoutées dans la bibliothèque. Comme seconde contribution, Transvalor a développé sa *plate-forme cloud Aeromines* <https://aeromines.com>. Cette plate-forme en ligne intègre plusieurs benchmarks et validations standards. La bibliothèque CFD d'Aeromines a été validée par comparaison avec un calcul de Lemma du même cas test adaptatif (*coopération TSV-Lemma*).

## C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

- Les différentes thèses soutenues brillamment ont débouché (cf. statistiques) sur des post-docs dans de bonnes universités ou dans des postes d'ingénieurs dans le prolongement des compétences acquises.
- Les résultats sont publiés dans de bonnes revues et de bons colloques, notamment très spécialisés comme International Meshing Round Table dans lequel les partenaires prennent part comme conférenciers invités ou comme co-organisateurs.
- Les succès rencontrés appellent à des recherches pour étendre les résultats notamment à d'autres physiques (et du couplage : recherche soutenue par un programme Rapid) ou en direction du design en maillage adaptatif.
- Les méthodes sont validées et les logiciels réalisés sont industrialisés par les deux participants industriels du projet.

## C.6 DISCUSSION

Dans le projet initial, nous envisagions plus l'adaptation des interfaces, éventuellement avec capillarité. Cette focalisation a donné lieu à pas mal de progrès, mais nous avons préféré concentrer nos efforts sur les couches limites, sujet qui s'est révélé plus difficile que prévu. Nous avons néanmoins réalisé deux avancées importantes : un critère physique pour les couches limites turbulentes et une analyse complète d'erreur en compressible. Ces deux avancées sont accompagnées par des progrès en efficacité y compris parallèle (multigrille, multirate). L'ordre trois et le maillage courbe ont bien avancé sur trois fronts (arêtes courbes, erreur d'interpolation, erreur d'approximation) mais leur assemblage reste à faire. Les applications aux éoliennes sont très avancées, les applications à la capillarité ont été remplacées pour cause d'opportunité commerciale par des calculs de bateaux. Ces deux applications sont des succès.

## C.7 CONCLUSIONS

Le projet a rassemblé beaucoup de collaborateurs (y compris imprévus dans Maidesc comme une chercheuse de Paris 6), mais le soutien ANR (qui s'est intégralement transformé en salaires de jeunes chercheurs) a été déterminant. La coopération s'est bien mise en œuvre

entre équipes avec plusieurs connexions exemplaires. Le succès théorique et méthodologique est avéré. Le succès industriel et commercial semble en très bon chemin.

## C.8 REFERENCES DE L'ÉTAT DE L'ART

- [1] M. A. Park, J. A. Krakos, A. Loseille and J. J. Alonso, Unstructured Grid Adaptation: Status, Potential Impacts, and Recommended Investments Toward CFD Vision 2030 (2017) *cf. site Maidesc*.
- [2] S. Osher and J. Sethian: Fronts propagating with curvature dependent speed : Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J. Comp. Phys.*, 1:12-49, 1988
- [3] Peskin CS. Flow patterns around heart valves: a numerical method. *J. Comp. Phys.* 1972; 10:252-271.
- [4] Kreiss HO, Petersson A. A second-order accurate embedded boundary method for the wave equation with Dirichlet data. *SIAM Journal of Scientific Computation* 2006; 27:1141–1167.
- [5] Glowinski R, Pan TW, Kearsley AJ, Periaux J. Numerical simulation and optimal shape for viscous flow by a fictitious domain method. *Int. J. for Num. Meth. Fluids* 2005; 20:695–711
- [6] Johansen H, Colella P. A Cartesian grid embedded boundary method for Poisson's equation on irregular domains. *J. Comp. Phys.* 1998; 147:60–85
- [7] E. Hachem, T. Kloczko, H. Digonnet and T. Coupez. Stabilized finite element solution to handle complex heat and Fluid Flows in industrial furnaces using the immersed volume method. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2012;68:99-121
- [8] E. Hachem, H. Digonnet, E. Massoni, T. Coupez, Immersed volume method for solving natural convection, conduction and radiation of a hat-shaped disk inside a 3D enclosure, *Int. J. of Num. Meth. Heat & Fluid Flow*, 22 (6), 718 - 741, 2012
- [9] S. El Feghali, E. Hachem, and T. Coupez, Monolithic stabilized finite element method for rigid body motions in the incompressible Navier-Stokes flow, *European J. of Comp. Mech.*, 19 (5-7), 547-573, 2010
- [10] E. Hachem, S. Feghali, R. Codina and T. Coupez, Anisotropic Adaptive Meshing and Monolithic Variational Multiscale Method for Fluid-Structure Interaction, *Comp. and Struct.*, 2012
- [11] E. Hachem, S. Feghali, R. Codina and T. Coupez, Immersed Stress Method for Fluid Structure Interaction, *Int. J. Num. Meth. Engg.*, 94(9) 805-825, 2013
- [12] Farhat C, Maute K, Argrow B, Nikbay M. A shape optimization methodology for reducing the sonic boom initial pressure rise. *AIAA J. of Aircraft* 2007; 45:1007–1018.
- [13] C. Gruau and T. Coupez. 3D tetrahedral, unstructured and anisotropic mesh generation with adaptation to natural and multidomain metric. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 194(48-49):4951-4976, 2005
- [14] T. Coupez. Metric construction by length distribution tensor and edge based error for anisotropic adaptive meshing. *J. Comp. Phys.*, 230:2391–2405, 2011
- [15] A. Harten, S. Osher, B. Engquist and S. Chakravarthy, Some results on uniformly high order accurate essentially non-oscillatory schemes, *Appl. Num. Math.*, 2, (1986) ,347-377.
- [16] Cockburn B, Shu CW: The Runge-Kutta discontinuous Galerkin method for conservation laws V - Multidimensional systems, *J. Comp. Phys.* 141 (2): 199-224, 1998
- [17] T. J. R. Hughes, Multiscale phenomena: Green's functions, the Dirichlet to Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* , 127 (1995), pp. 387–401.
- [18] R. Abgrall, M. Ricchiuto, A. Larat and C. Tavé, A simple construction of very high order non-oscillatory compact schemes on unstructured meshes, *Comp. and Fluids*, 38, 1314-1323, 2009
- [19] C. Gear, and D. Wells. Multirate linear multistep methods. *BIT* 24 (1984), 484-502
- [20] A. Loseille and F. Alauzet. Continuous mesh framework. *SIAM J. Numer. Anal.*, 49(1):38–86, 2011.
- [21] R. Becker and R. Rannacher: A feed-back approach to error control in finite element methods: Basic analysis and examples, *East-West J. Numer. Math.*, 4:237–264 (1996)
- [22] Loseille, A., Dervieux, A., Alauzet, F. (2010), Fully anisotropic goal-oriented mesh adaptation for 3D steady Euler equations, *J. Comp. Phys.*, 229 (2010) 2866-2897
- [23] A. Belme, A. Dervieux, and F. Alauzet. Time accurate anisotropic goal-oriented mesh adaptation for unsteady flows. *J. Comp. Phys.*, 231:19:6323-6348, 2012
- [24] C. Degand and C. Farhat, "A three-dimensional torsional spring analogy method for unstructured dynamic meshes", *Comput. Struct.* 80 (2002) 305.
- [25] *Et suivants : cf. E.2*

## D LISTE DES LIVRABLES

Les livrables en bleu souligné sont disponibles sur le site web : <http://www-sop.inria.fr/tropics/livraisons-maidesc.html>

*Livrables de coordination et thèses:*

- [18th month report \(09/2014\)](#) ✓
- [30th month report \(06/2016\)](#) ✓
- Rapport de synthèse finale : *le présent rapport.*
- Thèse de [Nicolas Barral soutenue 27 nov 2015](#) ✓
- Thèse de [Gautier Brethes soutenue 8 dec 2015](#) ✓
- Thèse de [Victorien Menier soutenue 31 Mar 2016](#) ✓
- Thèse de [Laure Billon soutenue le 9 dec. 2016](#) ✓
- Thèse de Emmanuelle Itam (soutenance : 30 novembre 2017)
- Thèse d'Eléonore Gauci (soutenance en avril 2018)

*Livrables rapports techniques (partenaire responsable **en vert**):*

- T2-D1 ATC1 -Falling water- column specification (M9), **Sophia** ✓
- T2-D1: [Specification de ATC1 -Chute d'une colonne liquide 2D \(A. Dervieux\) juillet 2014](#)
- T2-D2 ATC2 -Circular cylinder- specification (M9) **Montpellier** ✓
- T2-D2: [Specification de ATC2 -Unsteady flows around a cylinder at different Reynolds numbers \(E. Itam, B. Koobus\) septembre 2014](#)
- T2-D3 ATC3 -M6- specification (M9) **INRIA-Rocquencourt** ✓
- T2-D4-5a: [Specification de la geometrie M6 \(F. Alauzet\) octobre 2014](#)
- T2-D4-5b: [Step, M6 and two wing-bodies \(F. Alauzet\) octobre 2015](#)
- T2-D4/D5 ITC1 -probe- ITC2 -capillarity- specification (M9) **Lemma** ✓
- T2-D4-5: [Specification de la rupture de barrage et de la reorientation en zero gravite \(O. Allain\) octobre 2014](#)
- T2-D6 ITC3 -Falcon- specification (M9) **Bordeaux** ✓
- T2-D6: [Specification de ITC3 -Falcon \(C. Dobrzynski\) septembre 2014](#)
- T2-D7 ATC4 -3D Notched sphere- and ITC4 -Breaking waves- specification (M9), **Cemef**: ✓
- T2-D7a: [Etude analyse de couches limites pour les ecoulements turbulents \(L. Billon\) 10 janvier 2014](#)
- T2-D7b: [Analyse et validation des outils pour l'etude des couches limites turbulentes \(L. Billon\) 12 juin 2014](#)
- T2-D7c: [ATC4 - Test case \(L. Billon, Y. Mesri and E. Hachem\) avril 2015](#)

- T2-D7d: [ATC4 - Notched sphere avril 2015](#)
- T2-D7e: [ATC4 - Dam break avril 2015](#)
- T2-D8 ITC5 -Wind mill- specification (M9) **TSV** ☑
- T2-D8: [ITC5: Wind mill specification \(A. Boilley\) 22 septembre 2014](#)
- T2-D9 Synthesis by leader (M12) Bordeaux N.B. ATC1 and ATC4 are grouped in one test case. Task is complete. ☑
- T3-D1 Space-time error for monolithic multi-physics (M18) **Cemef** ☑
- T3-D1: [Adaptive time-step with anisotropic meshing for unsteady convection-dominated problems \(G. Jannoun, E. Hachem, J. Veysset, T. Coupez\) mars 2015](#)
- T3-D2 Applications of error estimation tools (M36) **Bordeaux**
- T3-D3/D4 Error for third-order and norm-oriented (M18) **Sophia** ☑
- T3-D3-4: [Norm-oriented mesh-adaption analysis for a third-order accurate Euler model \(A. Carabias, A. Loseille, A. Dervieux\) mars 2015](#)
- T3-D5 Space-time error for a second-order ALE (M18) **Montpellier/Sophia/Rocquencourt** / T3-D6 Space-time error analyses... (M18) Rocquencourt: ☑
- T3-D5/D6: [Space-time error for a second-order ALE \(E. Gauci, F. Alauzet, A. Loseille, A. Dervieux\) mars 2015](#)
- T3-D7 Synthetic report (prelim.M24/final M38) Rocquencourt Task is complete. ☑
- T4-D1/D2 Level-set distancing/ Curved immersed boundaries and interfaces (M18, M30) **Cemef** ☑
- T4-D1D2: High fidelity adaptive meshing for immersed methods, [24].
- T4-D3 Curved boundaries for iso-geometric (M18, M30) **Bordeaux** ☑
- T4-D3: [A method for computing curved meshes via the linear elasticity analogy, application to fluid dynamics problems](#)
- T4-D4/D5 Highly anisotropic meshes/Mesh deformation (M18, M30) **Rocquencourt** ☑
- T4-D4: [Metric-orthogonal anisotropic mesh generation](#)
- T4-D6 Interface meshing for unsteady simulations (M18, M30) **Lemma** ☑
- T4-D6: [Interface meshing for unsteady simulations M18-April 2015 \(D. Guegan, O. Allain\) avril 2015](#)
- Synthesis by leader (M33) Cemef . Task completed. ☑
- T5-D1 Space time optimal discretization (M12, M42) **Cemef** Replanified M36 ☑
- T5-D1: [Fully space-time metric based anisotropic mesh adaptation for unsteady problems](#)
- T5-D2 Review of multi-rate time-advancing (M12, M42) **Montpellier** ☑
- T5-D2: [A review of multirate time-advancing \(E. Itam, B. Koobus\) 2015/2017](#)
- T5-D2 Multi-rate time-advancing (M12, M42) **Montpellier** ☑

- T5-D2: [Multirate time-advancing for high Reynolds LES \(E. Itam, B. Koobus\) 2017](#)
- T5-D3 Norm-oriented adaptive (M12, M42) **Sophia**
- T5-D3: [Norm-oriented adaptive FMG \(G. Brethes, A. Dervieux\) fevrier 2015](#)
- T5-D3-BIS: [A continuous/tensorial synthesis for mesh adaptation \(G. Brethes, T. Coupez, A. Dervieux\) novembre 2015](#)
- T5-D4 Adaptive FMG to the unsteady (M12, M42) **Lemma**
- T5-D4: [Adaptive FMG for unsteady CFD \(Gautier Brethes, Vincent Levasseur\) septembre 2015](#)
- Synthesis by leader (M45) Montpellier, Task completed.

## E IMPACT DU PROJET

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

**Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	3	8
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	10	39
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres	1 film pédagogique (voir vidéothèque du projet)	Site Aeromines

**Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)**

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	

<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	<b>Fefloa d'INRIA : une licence à Lemma</b>
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	<b>Projet Rapid Lemma-INRIA</b>
<b>Colloques scientifiques</b>	
<b>Autres (préciser)</b>	

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les publications avec la mention [pdf](#) sont disponibles sur le site web : <http://www-sop.inria.fr/tropics/maidesc-communications.html>

Les équipes Gamma3 de Rocquencourt-Saclay et Ecuador de Sophia sont notées comme deux partenaires différents bien que partageant la même enveloppe financière de cette ANR.

### *Reuves internationales à comité de lecture multipartenaires :*

[25] Brèthes, G., Allain, O., and Dervieux, A., 2015, A Mesh-Adaptive Metric-Based Full-Multigrid for the Poisson problem, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 79-1, 30~53, 2015 (Lemma and Sophia). [pdf](#)

[26] A. Carabias, A. Belme, H. Loseille, and A. Dervieux, Anisotropic goal-oriented error analysis for a third-order accurate CENO Euler discretization, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, <http://dx.doi.org/10.1002/fld.4423>, 2017.( Lemma-Rocquencourt-Sophia) [pdf](#)

[27] A. Belme, F. Alauzet, A. Dervieux, An a priori anisotropic Goal-Oriented Estimate for Viscous Compressible Flow and Application to Mesh Adaptation (soumis). ( Rocquencourt/Saclay-Sophia) [pdf](#)

### *Reuves internationales à comité de lecture monopartenaires :*

[28] [T4-D3] R. Abgrall, C. Dobrzynski, and A. Froehly. A method for computing curved meshes via the linear elasticity analogy, application to fluid dynamics problems. *Int. J. for Numer. Meth. Fluids*, 76(4):246~ 266, 2014. [pdf](#)

[29] F. Alauzet, A. Loseille, G. Olivier, Time-Accurate Multi-Scale Anisotropic Mesh Adaptation for Unsteady Flows in CFD, *J. Comp. Phys.*, 2015. [pdf](#)

[30] L. Billon, Y. Mesri, E. Hachem, "Anisotropic boundary layer mesh generation for immersed complex geometries", *Engineering with Computers*, 28 July 2016. [pdf](#)

- [31] F. Alauzet, V. Menier and A. Loseille, Unique cavity-based operator and hierarchical domain partitioning for fast parallel generation of anisotropic meshes, *Comput. Aided Des.*, Accepted, 2016, [pdf](#)
- [32] F. Alauzet and A. Loseille, A decade of progress on anisotropic mesh adaptation for Computational Fluid Dynamics, *Comput. Aided Des.*, 72, pp. 13-39, 2016, [pdf](#)
- [33] G. Brethes, A. Dervieux, Anisotropic Norm-Oriented Mesh Adaptation for a Poisson problem, *J. Comp. Phys.* 322 (2016) 804-826, [pdf](#)
- [34] G. Brethes, A. Dervieux, A tensorial-based mesh adaptation for a Poisson problem, *European J. Comp. Mech.* 26 :3, 2017, 245-281. [pdf](#)
- [35] N. Barral, G. Olivier, F. Alauzet, Time-accurate anisotropic mesh adaptation for three-dimensional time-dependent problems with body-fitted moving geometries, *J. Comp. Phys.*, Elsevier, 2017, 331, pp.157-187. <10.1016/j.jcp.2016.11.029> [pdf](#)

### *Communications internationales multipartenaires :*

- [36] G. Brethes, A. Loseille, F. Alauzet, and A. Dervieux. Convergent error-controlled mesh adaptation. In ADMOS 2015, Nantes, 2015. [pdf](#)
- [37] Adrien Loseille, Alain Dervieux and Frederic Alauzet, Anisotropic Norm-Oriented Mesh Adaptation for Compressible Flows, 53rd AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, 2015. [pdf](#)
- [38] [T3-D5/D6] E. Gauci, F. Alauzet, A. Loseille, A. Dervieux, Towards goal-oriented mesh adaptation for fluid-structure interaction, VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2015, B. Schrefler, E. Onate and M. Papadrakakis(Eds), May 18-20, Venice, Italy. [pdf](#)
- [39] C. Moussaed, E. Itam, S. Wornom, B. Koobus, M.V. Salvetti, A. Dervieux, Dynamic and hybrid VMS models for the simulation of bluff-body flows, ECFD 2014 - Barcelona, sept. 2014 (UM2-Lemma-Inria)
- [40] E. Itam, S. Wornom , B. Koobus , A. Dervieux, Application of a hybrid variational multiscale model to massively separated flows, 3AF - 8 avril 2015, Toulouse (UM2-Lemma-Inria)
- [41] E. Itam, S. Wornom, B. Koobus, B. Sainte-Rose, A. Dervieux, Simulation of multiple blunt-body flows with a hybrid variational multiscale model, Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF~15) The 16th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, September 1-4, 2015 [pdf](#) (UM2-Lemma-Inria)

[42] A. Loseille, A. Dervieux, F. Alauzet, Anisotropic Norm-Oriented Mesh Adaptation for A Compressible Inviscid Flow, AIAA SciTech, Kissimmee, Florida, United States, 25 janvier 2015, AIAA paper, 2015--2037 [pdf](#)

[43] [26] E. Itam, S. Wornom, B. Koobus, and A. Dervieux, "A volume-agglomeration multirate time advancing approach", European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS), Crete Island, Greece, 5-10 juin, 2016. [pdf](#)

[44] E. Gauci, F. Alauzet, and A. Dervieux, Goal-oriented mesh adaptation for moving mesh FSI problems, ECCOMAS Congress 2016, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, G. Stefanou, V. Plevris (eds.) Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.

[45] E. Itam, S. Wornom, B. Koobus, and A. Dervieux, "Hybrid simulation of high-Reynolds number flows relying on a variational multiscale model", paper in 6th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Strasbourg, France, 26-28 September 2016. [pdf](#)

### *Communications internationales monopartenaires :*

[46] C. Dobrzynski, Curved meshing for high Reynolds flows solved using high order framework, ADMOS 2015. [pdf](#)

[47] L. Billon, Y. Mesri and E. Hachem, Adaptive Finite Element Simulation of Multi-Physics Turbulent Flow with Applications in Aerodynamics, in ADMOS 2015, Nantes, 2015. [pdf](#)

[48] N. Barral, F. Alauzet, A. Loseille, Metric-Based Anisotropic Mesh Adaptation for Three-Dimensional Time-Dependent Problems, 53rd AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, 2015. [pdf](#)

[49] A. Loseille, Metric-orthogonal anisotropic mesh generation, IMR23 [pdf](#)

[50] C. Dobrzynski, Curved mesh generation for fluid dynamics problem. SIAM-SEAS 2015, Birmingham, Alabama, mars 15. [pdf](#)

[51] D. Marcum and F. Alauzet, Aligned Metric-based Anisotropic Solution Adaptive Mesh Generation, *Procedia Engineering*, 82, 2014, Pages 428-444. [pdf](#)

[52] A. Loseille, Metric-orthogonal Anisotropic Mesh Generation, *Procedia Engineering*, 82, 2014, Pages 403-415 [pdf](#)

[53] N. Barral, Edward Luke and Frederic Alauzet, Two Mesh Deformation Methods Coupled with a Changing-connectivity Moving Mesh Method for CFD Applications, *Procedia Engineering*, 82, 2014, Pages 213-227. [pdf](#)

- [54] N. Barral and F. Alauzet, Large displacement body-fitted FSI simulations using a mesh-connectivity-change moving mesh strategy, AIAA Aviation 2014, Atlanta, GA, USA, June 2014. [pdf](#)
- [55] N. Barral, F. Alauzet and A. Loseille, Metric-Based Anisotropic Mesh Adaptation for Three-Dimensional Time-Dependent Problems Involving Moving Geometries, AIAA SciTech 2015, Kissimee, FL, USA, January 2015. [pdf](#)
- [56] G. Brethes Algorithmes Full-Multigrid adaptatifs basés sur des métriques Riemanniennes, Congres SMAI 27-30 mai 2013, Seignosse, [slides-pdf](#)
- [57] G. Brethes, Main issues in anisotropic mesh adaptive FMG, ECCOMAS, Barcelona, [slides-pdf](#)
- [58] G. Brethes, Adaptive multigrid methods, ECCOMAS, Bordeaux. [slides-pdf](#)
- [59] L. Billon, Y. Mesri and E. Hachem, Parallel anisotropic 3D mesh adaptation for unsteady turbulent Flows, in PANACM 2015 , Buenos Aires, 2015.
- [60] E. Hachem, L. Billon, J. Sari, F. Cauneau and Y. Mesri, Parallel anisotropic 3D mesh adaptation for unsteady turbulent flows, AERO2015, 50th edition of the 3AF International Conference on Applied Aerodynamics, Toulouse, March 30, 31, April 1, 2015
- [61] L. Billon, Y. Mesri, E. Hachem, Mesh adaptation for unsteady interfaces with deformation, stretching and curvature, Poster, Séminaire de Mécanique des fluides CEA/GAMNI, Paris 5&6 Fevrier 2015
- [62] E. Hachem, L. Billon, J. Sari, T. Coupez, Variational multiscale large eddy simulation and anisotropic mesh adaptation for transient and turbulent flows, AERO2014, 49th International Symposium of Applied Aerodynamics Lille, March 24-26, 2014
- [63] E. Hachem, L. Billon and T. Coupez, Variational multiscale large eddy simulation and anisotropic mesh adaptation for transient and turbulent flows, 11th world congress on computational mechanics (WCCM 2014), Barcelona, Spain, July 20-25, 2014
- [64] N. Barral, F. Alauzet and A. Loseille, Metric-Based Anisotropic Mesh Adaptation for Three-Dimensional Time-Dependent Problems Involving Moving Geometries, 53rd AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, 2015.
- [65] V. Menier, A. Loseille and F. Alauzet, Multigrid Strategies Coupled with Anisotropic Mesh Adaptation, 53rd AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, 2015. [pdf](#)
- [66] C. Dobrzynski, SIAM SEAS 2015, USA
- [67] C. Dobrzynski, ADMOS 2015, Nantes, France 16.

- [23] L. Billon, Y. Mesri, E. Hachem, Adaptive meshing method for turbulent flow simulations, ECCOMAS Congress, Crete Island, Greece, 5 - 10 JUNE 2016
- [68] T. Toulorge, Y. Mesri, E. Hachem, High fidelity adaptive meshing for immersed methods, ECCOMAS Congress, Crete Island, Greece, 5 - 10 JUNE 2016
- [69] Y. Mesri, L. Billon, E. Hachem, On the efficiency of parallel incompressible Navier-Stokes solvers in the framework of anisotropic adaptive finite elements, 12th World Congress on Computational Mechanics, 24-29 July 2016 Seoul, Korea
- [70] F. Alauzet, A. Loseille, G. Olivier. Multi-Scale Anisotropic Mesh Adaptation for Time-Dependent Problems. [Research Report] RR-8929, INRIA Saclay - Ile-de-France. 2016, pp.42 [pdf](#)
- [71] F. Alauzet. A parallel matrix-free conservative solution interpolation on unstructured tetrahedral meshes. *Comp. Meth. Applied Mech. and Engrg*, Elsevier, 2016, 299, pp.26. <10.1016/j.cma.2015.10.012> [pdf](#)
- [72] F. Alauzet, B. Fabrèges, M. A. Fernández, M. Landajuela. Nitsche-XFEM for the coupling of an incompressible fluid with immersed thin-walled structures. *Comp. Meth. Applied Mech. Engrg.*, Elsevier, 2016, 301, pp.300-335. <10.1016/j.cma.2015.12.015> [pdf](#)
- [73] L. Nouveau, H. Beaugendre, C. Dobrzynski, R. Abgrall, and M. Ricchiuto. An adaptive, residual based, splitting approach for the penalized Navier Stokes equations. *Comp. Meth. Appli. Mech. Engrg*, 303:208-230, 2016. [pdf](#)
- [74] R. Abgrall, H. Beaugendre, C. Dobrzynski, Q. Viville. Construction of a p-adaptive continuous Residual Distribution scheme for hyperbolic problems. *J. Sci. Comput.* 1-37, 2017. [pdf](#)
- [75] B. Re, C. Dobrzynski, A. Guardone. An interpolation-free ALE scheme for unsteady inviscid flow computations over three-dimensional adaptive grids. *J. Comp. Phys.* 340:26-54, 2017 [pdf](#)
- [76] R. Abgrall, H. Beaugendre, C. Dobrzynski. An immersed boundary method using unstructured anisotropic mesh adaptation combined with level-sets and penalization techniques. *J. Comp. Phys.*, Elsevier, 2014, 257, pp.83-101. [pdf](#)
- [77] A. Loseille. Metric-orthogonal Anisotropic Mesh Generation, *Procedia Engineering* 82, 2014, Pages 403-415. [pdf](#)
- [78] F. Alauzet and D. Marcum. Metric-Aligned and Metric-Orthogonal Strategies in AFLR, 23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2017-3108). [pdf](#)

[79] G. Jannoun, E. Hachem, J. Veysset, J-F. Zaragoci, and T. Coupeuz. Fully space-time metric based anisotropic mesh adaptation for unsteady problems, VI International Conference on Adaptive Modeling and Simulation ADMOS 2013, J. P. Moitinho de Almeida, P. Diez, C. Tiago and N. Parés (Eds) [pdf](#)

[80] O. Coulaud and A. Loseille. Very High Order Anisotropic Metric-Based Mesh Adaptation in 3D. 25th International Meshing Roundtable. *Procedia Engineering* 163 ( 2016 ) 353 ~ 365 [pdf](#)

[81] C. Dobrzynski, G. El Jannoun. High order mesh untangling for complex curved geometries. RR-9120, INRIA Bordeaux, 2017. [pdf](#)

[82] R. Abgrall, H. Alcin, H. Beaugendre, C. Dobrzynski, L. Nouveau. Residual Schemes Applied to an Embedded Method Expressed on Unstructured Adapted Grids. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34 (2), pp.214-223. [pdf](#)

### Vulgarisation :

[83] - Enrichissement de la plateforme Aéromines de Cemef/TSV offrant un service cloud en CFD pour les professionnels Site : <https://aeromines.com/>

[84] - Tournage d'un film de 10 mn sur l'adaptation de maillage en mécanique, associant Lemma et INRIA. ([Grand fichier](#)) [play](#).

## E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Liste des éléments. Préciser les titres, années et commentaires	
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	1. 2.
<b>Brevet internationaux en cours d'obtention</b>	1. 2.
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	1. 2.
<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	1. 2.
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	1. Dépôt de FEFLOW par INRIA-Rocquencourt. 2015. 2. Licence de FEFLOW à Lemma. 2015. 3. 4.
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	1. 2.
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	1. Extension au couplage fluide-structure dans le cadre d'un projet Rapid Lemma-INRIA (en cours). 2.
<b>Colloques scientifiques</b>	1. 2.
<b>Autres (préciser)</b>	1. 2.

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Gautier Brethes	H	gautier.brethes@orange.fr	2017	Master	Bordeaux	non	INRIA-Sophia	Chercheur doctorant	36	Déc. 2015	CDI	Scalan, GE	Ing.	N	O
Emmanuelle Itam	F	itame.mmanuelle@gmail.com	2017	Master	Montpellier2	non	Montpellier	Chercheuse doctorante	36	Nov. 2017	CDD	CNAM, Paris, Ens.	ATER	N	O
Laure Billon	F	laure.billon@mines-paristech.fr	2017	Master	ENSMP Sophia	non	Cemef	Chercheuse doctorante	36	Déc. 2016	CDD	Ecole : ENSAM	Post-Doc	N	O

Éléonore Gauci	F	eleonore.gauci@inria.fr	2017	Master	UCA Nice	non	INRIA Sophia	Chercheuse doctorante	42	Avril 2018	Thèse en cours CDD	Paris 6, Univ.	ATER	N	O
Guilherme Cunha	H	gcoelhocunha@gmail.com	2017	PHD	France	non	INRIA Sophia	Post. Doc	9 (départ)	2016	CDI Décembre 2015	Dassault Systèmes, GE	Ing.	N	O

Ghinna El Jannoun	F	ghinna.el-jannoun@inria.fr	2017	PHD Cemef	France	non	INRIA Bordeaux	Post. Doc (départ)		2016	CDI	CESI, Univ.	Ens.	N	O
Marco Lorini	H	marco.lorini@inria.fr	2017	PHD	UE		INRIA Bordeaux	Post. Doc	Nov. 2017	2017	CDD JUIN 2018	INRIA, EPST	Post-doc	O	O

(1) Adresse email : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) Poste dans le projet : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) Durée missions : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) Devenir professionnel : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) Type d'employeur : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) Type d'emploi : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) Lien au projet ANR : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) Valorisation expérience : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.