

"Code_Aster opensource un vecteur de développement durable"

"LEVESQUE Jean-Raymond"¹,

¹ "Réseau Professionnel Code_Aster, FRANCE, contact@code-aster-pronet.org"

Résumé

Dans le domaine de la simulation numérique du comportement mécanique et multi physique des infrastructures industrielles les progrès des cinquante dernières années sont considérables.

En analysant les besoins d'un exploitant d'installations industrielles, on présente les objectifs de la simulation numérique à EDF (Electricité de France) qui a choisi une politique de développement de logiciel « domestique » pour programmer et capitaliser ses travaux de recherche et des modèles numériques dédiés à ses besoins d'ingénierie dans la **plateforme Salomé** pour mettre en œuvre **Code_Aster** (Méca), **Code_Saturne** (CFD), **Syrthes** (Thermo-hydraulique), **Openturns** (Incertitudes).

Ce choix est détaillé pour répondre à la question « Comment traduire les exigences de qualité ? » : le processus de développement, la documentation, le processus de Vérification et de Validation, la qualification des outils.

Pour partager les développements internes, plusieurs modèles de diffusion ont été analysés. On présente le modèle économique du logiciel libre sous la licence GNU Public Licence tel qu'il été mis en œuvre depuis 2001 et ce qui est mis à la disposition de la Communauté : les différentes distributions, un corpus documentaire, un forum des utilisateurs.

Le retour d'expérience permet de présenter des contributions significatives de la communauté d'utilisateurs, ce qui a permis de mettre en place un réseau professionnel international de partage et d'échange avec des utilisateurs, des fournisseurs de services et des enseignants de vingt et un pays.

Pour apporter une contribution concrète au développement d'une coopération renforcée entre les Etablissements d'Enseignement supérieur de chaque pays du Maghreb, une action coopérative et un partage de compétences dans le domaine de la simulation numérique en mécanique a été engagée. Elle s'appuie sur les libertés offertes par la licence de distribution et l'absence de contrepartie financière à court et long terme pour les usages académiques et industriels.

1. Electricité de France et la simulation numérique en mécanique

Electricité de France (EDF) a choisi de devenir un acteur de la simulation numérique il y a plus de cinquante ans pour répondre à des besoins spécifiques et a mis en place un mode de développement d'outils logiciels particulier.

1.1 Des besoins de long terme pour un exploitant d'installations industrielles



Figure 1. Des installations de transport et de production d'électricité à grand cycle de vie

Pour bien appréhender le contexte dans lequel EDF R&D a choisi d'engager le développement de *Code_Aster*, il est important de rappeler qu'EDF est avant tout, en tant que producteur – transporteur - distributeur d'énergie électrique. C'est de ce fait un exploitant de matériels et d'ouvrages mécaniques (centrales nucléaires et thermiques, digues et barrages, pylônes, postes et lignes).

Pour l'essentiel, l'activité de R&D en mécanique des structures concerne les spécificités fortes des ouvrages : **les exigences de sécurité et la durée de vie.**

EDF est responsable de l'exploitation sûre de ses ouvrages vis-à-vis des autorités de sûreté, qui sont seules habilitées à en autoriser l'exploitation. L'Autorité de sûreté nucléaire demande à EDF, outre **l'analyse permanente du retour d'expérience**, de procéder à une **réévaluation de sûreté**, à intervalles réguliers. Celle-ci comporte une phase d'étude intégrant **l'évolution des règles et doctrines de sûreté** : ceci conduit à utiliser des méthodes et des **outils d'analyse** les plus récents **validés, éprouvés et approuvés.**

La seconde spécificité réside dans **la durée de vie des ouvrages et des matériaux** utilisés (a minima quarante ans). Ainsi, l'activité de R&D de mécanique des structures concerne pour une très grande part, la justification de la bonne tenue de ces ouvrages dans le temps et la maîtrise des opérations de maintenance.

Le rôle joué par une activité de R&D dans ce cadre n'est donc pas identique au cas d'une entreprise manufacturière classique sollicitant sa R&D à des fins d'innovations concurrentielles pour la conception ou l'optimisation de produits. Cette activité de R&D intervient le plus souvent, non pas à l'amont de la conception mais à l'aval.

1.2 Les objectifs pour la simulation numérique

La simulation numérique joue un rôle essentiel pour évaluer des événements non prévus à la conception, l'impact du vieillissement des matériaux et des composants, les interventions liées à la maintenance ou l'installation de nouveaux composants. L'obligation de respecter de nouvelles règles pour la protection de l'environnement conduisent à réévaluer les marges de sécurité en mettant en oeuvre des méthodes de simulation non linéaires, alors que la conception initiale avait été conduite en simulation linéaire.

Les outils de simulation doivent permettre sur de longues périodes :

- la **capitalisation des connaissances** pour la simulation numérique de phénomènes complexes,
- le recours à des **ordinateurs de haute performance** pour augmenter la taille et la précision des modèles,
- le meilleur niveau de supervision des incertitudes pour donner confiance dans les résultats,
- de garantir la qualité des études par la validation et la qualification des logiciels et des méthodes.

1.3 Une politique des logiciels adaptée

EDF a choisi en 1989 de systématiser une politique de développement « domestique » pour programmer et capitaliser ses travaux de recherche et des modèles numériques dédiés dans un logiciel unique de mécanique et thermo-mécanique, le *Code_Aster*. Ce projet mis en place un processus de validation et de qualification des méthodes, avec des transferts rapides de la R&D à l'Ingénierie opérationnelle.

2. Un logiciel industriel général

Une **architecture modulaire** a permis de mutualiser pour l'ensemble des formulations un gestionnaire de mémoire, un moteur de gestion des éléments finis, des bibliothèques d'analyse numérique pour l'optimisation des temps de calcul sur des machines mono processeur et multi processeurs.

Une méthode de **développement coopératif** entre les différentes équipes spécialisées dans les différentes technologies (machines tournantes, chaudronnerie nucléaire, processus de soudages, tuyauteries et échangeurs, digues et barrages, ouvrages de génie civil) et les disciplines physiques (mécanique de la rupture, métallurgie, vibrations et acoustique, thermo-mécanique, géomécanique, matériau béton ...) a permis de rendre le logiciel utilisable rapidement pour une grande variété de problèmes.

L'éventail de modélisations concerne [2] [3] :

- La thermique et la mécanique,
- Les analyses statiques et dynamiques, linéaires ou non,
- L'analyse modale transitoire, harmonique ou aléatoire et l'analyse sismique,
- 400 modèles d'éléments finis : 3D, 2D ; coques et plaques, poutres et câbles, tuyaux ...
- Un grand spectre de chargements,
- Interactions avec d'autres formulations physiques (couplées ou non) : fluide-structure, sol-structure ...

Ces fonctionnalités générales sont complétées de divers modèles spécifiques et de formulations non linéaires :

- Contact et frottement,
- Grands déplacements et grandes déformations,
- Modèles de matériaux (près de 200 lois de comportement),
- Mécanique de la rupture, dommage et fatigue, soudage et écrouissage,
- Géo matériaux et milieux poreux ...

Pour mutualiser le développement et la maintenance des outils nécessaires à la mise en œuvre de la méthode des éléments finis et à la visualisation des résultats en mécanique du solide et à la mécanique des fluides, il est apparu judicieux d'engager le développement coopératif (EDF – CEA – Euriware) d'une plateforme interopérable de simulation [4] :

- CAO – Importation et exportation, réparation et nettoyage, création ou modification de géométries
- MODELISATION – Affectation de propriétés physiques et numériques sur la géométrie,
- MAILLAGE – Importation et exportation, contrôle de qualité, raffinement et adaptation,
- GESTION de la simulation : transferts de données, enchainement des calculs, couplage de solveurs,
- VISUALISATION et post traitement des résultats.

Cette plateforme est notamment utilisée avec **Code_Aster** (Mécanique), **Code_Saturne** et **Syrthes** (CFD), **Openturns** (gestion des Incertitudes).

AsterStudy est la nouvelle interface graphique de **Code_Aster** dans Salome-Meca. Elle permet l'unification des outils de mise en données et de lancement d'études mécaniques au sein de la plateforme SALOME. **L'ensemble du langage de commande de Code_Aster peut être complété**, pour définir des enchainements spécifiques (études paramétriques, optimisation et ajustement de modèles) par des instructions **en langage Python**.

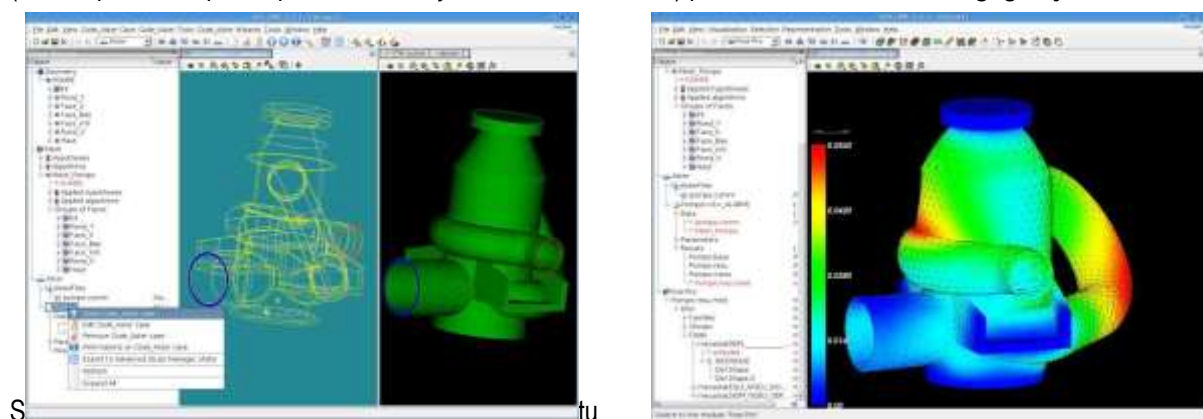


Figure 2. La Plateforme SALOME – MECA

3. Comment traduire les exigences de qualité

Les exigences de qualité du projet ont nécessité de prévoir des dispositions d'organisation sur l'ensemble du cycle de vie du logiciel. Le fait d'avoir un processus se déroulant sur une très longue période (près de 30 ans aujourd'hui) nécessite de traduire le traditionnel cycle en V de l'organisation de la qualité, utilisé pour la conception d'un équipement particulier, pour l'adapter au développement continu, à la mise en service de versions industrielles et au traitement du retour d'expérience.

3.1 Le processus de développement

La première règle définie a été l'unicité de la bibliothèque source à laquelle sont intégrés tous les développements et toutes les corrections d'anomalies. Celle-ci évolue chaque semaine et est soumise à une méthodologie de Vérification (respect des règles de programmation – présentation de la justification des choix du programmeur, devant ses pairs, avec conservation de l'historique des interventions ...). Cette version est la **version testing**, stabilisée tous les six mois.

Une version d'exploitation, la **version stable**, mise en exploitation tous les deux ans, fera uniquement l'objet de corrections d'anomalies résiduelles, sans modification des fonctionnalités.

3.2 La documentation

La version d'exploitation est accompagnée d'une **documentation de 23.000 pages** pour la version 13.

La **documentation d'utilisation** classique (253 documents) qui détaille toutes les commandes utilisables et la signification des paramètres de modélisation ou de calcul. Aucun système d'unité n'est caché dans le logiciel ; l'utilisateur est seul responsable du choix de son système d'unité et de sa cohérence.

Un autre volet est constitué par la **documentation de Référence** (213 documents), qui décrit avec précision les **modèles effectivement implantés** (équations, paramètres de résolution ...). Il ne suffit pas de dire que l'on a implanté le modèle de x ou y et de renvoyer à une bibliographie (plus ou moins accessible) : l'utilisateur doit pouvoir comprendre le niveau d'approximation disponible et la notoriété du modèle ne suffit pas à justifier sa pertinence.

La **documentation de développement** (111 documents) fournit tous les éléments d'architecture et les procédures pour l'abandon d'un nouveau type d'élément fini, d'un nouveau type de comportement de matériau ...

3.3 Le processus de Vérification et de Validation

Pour apporter des preuves de la pertinence du logiciel un très grand nombre de cas test sont gérés en configuration et documentés dans la **documentation de Validation** (1.260 documents), Aucun nouveau développement ne peut être intégré dans le logiciel sans un ou plusieurs cas test prouvant la qualité numérique des résultats. Pour valider certains domaines de modélisation, l'équipe de développement a mis en place un **processus de validation indépendante**, réalisée par d'autres que les développeurs et en général externes à l'Entreprise.

Pour vérifier la qualité globale du logiciel l'ensemble des cas tests disponibles sont exécutés à chaque évolution du contenu du source. La vérification automatisée des résultats, par rapport à des valeurs de référence justifiées dans la documentation du cas test, permet de garantir que chaque évolution du logiciel est validée et n'a entraîné aucune régression.

A ce jour la base documentaire des tests de validation est riche de plus de **3.600 cas tests différents**, qui constituent autant d'outils de formation pour l'auto apprentissage au logiciel.

3.4 La qualification des outils

Les déclarations des fournisseurs ne suffisent pas à garantir une utilisation de qualité. Les utilisateurs ont une responsabilité essentielle dans la mise en exploitation industrielle des logiciels et la garantie de la qualité des résultats qu'ils produisent. **La gestion des compétences et la formation à une bonne utilisation sont déterminantes.**

Il importe que l'utilisateur soit capable de définir un cadre d'exigences réalistes pour les différents domaines d'usage. Il doit s'assurer qu'il dispose des éléments d'appréciation pour assumer ses responsabilités sans risques. Cela suppose qu'il qualifie la pertinence du logiciel ou partie de logiciel qu'il utilise.

Le processus de qualité impose une bonne gestion des ressources humaines et une capitalisation des savoirs.

4. Comment partager les développements internes

La priorité d'EDF était de satisfaire cette démarche de la qualité pour les équipes chargées des études et celles en charge du développement qui jouent le rôle de fournisseurs de services internes (formation, assistance, développement à façon).

4.1 Pourquoi étendre la diffusion ?

- Multiplier de façon significative le **nombre d'utilisateurs** et la **diversification des usages** pour **assurer une qualité suffisante** (des inter comparaisons sur les performances, étendre le processus de validation indépendante des modélisations ...) ;
- **Ne pas tout faire tout seul** en utilisant les bonnes bibliothèques numériques et en s'appuyant sur des standards d'échange ;
- **Faciliter l'émergence de fournisseurs de services compétents** pour la réalisation d'études pour EDF ou d'autres industriels ;
- **Favoriser les projets coopératifs** avec le monde académique (capitalisation des thèses, utilisation en formation et avec le monde industriel et la R&D sous contrat pour des partenariats industriels et scientifiques).

4.2 Le modèle économique des logiciels de simulation numérique

L'analyse du modèle économique des logiciels commerciaux, initié au siècle dernier, fait apparaître certains mécanismes qui nuisent aux transferts de technologies entre recherche, université et industrie. Les transferts de connaissances et le partage de savoir-faire sont perturbés par la démarche commerciale.

Pour répondre à ses objectifs EDF a choisi en 2001 de diffuser *Code_Aster* en logiciel libre sous la licence GNU Public Licence. [1]

La liberté d'usage permet de simplifier la qualification par tierce partie, la capitalisation des thèses, les échanges université – industrie et les développements coopératif.

5. Ce qui est mis à la disposition de la Communauté

5.1 Les différentes distributions

Pour le **Code_Aster**, la **distribution de référence**, est sur le site www.code-aster.org. Elle comprend l'ensemble des sources de la version validée utilisée par les équipes EDF : c'est la **version stable** dont le contenu est invariant pendant deux ans. Les prérequis pour la compilation et la production d'un code exécutable sont clairement définis. Le système d'exploitation de référence est Linux. Pour la mise en œuvre du calcul parallèle, les bibliothèques nécessaires sont également open source. Pour les équipes souhaitant suivre les évolutions du logiciel la **version testing est mise à disposition tous les six mois**. Elle deviendra la version stable au bout d'un cycle de deux ans.

Pour la **plateforme Salomé Méca**, un paquet exécutable sur Linux et sous Windows 64 bits est mis à disposition tous les ans, avec les outils de modélisation géométrique, de maillage et de visualisation.

5.2 Un corpus documentaire sous la licence GNU FDL

Tous les documents constitutifs de la preuve de la Qualité que nous avons décrits sont accessibles en français et en traduction automatique en anglais soit plus de 23.000 pages..L'ensemble des documents de formation, utilisés par EDF sont également diffusés en anglais. [5].

Au cours des dernières années plusieurs tutoriaux et ouvrages libres ont été publiés par des membres de la Communauté [6] et maintenant sur You Tube et Linked IN. Rappelons que l'ensemble des 3.600 cas tests de validation constituent autant d'outils pour l'auto apprentissage.

5.3 Un forum des utilisateurs

Des dizaines de milliers de téléchargements, avec plus d'un millier d'utilisateurs très fidèles qui actualisent leur version du logiciel tous les six mois, se retrouvent dans le Forum public. Ces membres de la Communauté ou des développeurs assurent une assistance efficace. Aucun engagement de délai de réponse aux questions posées n'est garanti, mais le dynamisme du Forum apporte une solution d'assistance gratuite et efficace.

5.4 Des contributions significatives

Les outils de « forge » standard mis à disposition de la Communauté ont permis d'intégrer plusieurs développements nouveaux au logiciel. La diversification des usages permet de soumettre très rapidement ces évolutions à des épreuves significatives.

Chaque année une vingtaine de thèses ou de projets collaboratifs s'appuient sur *Code_Aster Open source*, avec ou sans participation des développeurs EDF. Ce travail de recherche, sans contrainte de licence commerciale, prolonge le processus de capitalisation de l'innovation et des savoirs..

5.5 Open source ne veut pas dire Open data

La distribution Open source publie les modèles utilisés, notamment pour les matériaux, et la documentation décrit la signification des paramètres, mais aucune valeur particulière n'est incluse dans le logiciel. Les données et les unités utilisées dans les cas test sont Open data, mais chaque utilisateur est responsable de la propriété des données utilisées. Lorsque des outils dédiés sont construits, dans *Salomé Méca* ou à partir de *Code_Aster*, avec un savoir-faire confidentiel, la licence de redistribution du logiciel doit préciser la propriété des données.

6. Un réseau professionnel international

La spontanéité et le dynamisme des jeunes utilisateurs ont largement contribué à la réussite de cette diffusion Open source. Néanmoins l'anonymat des intervenants ne suffisent pas à développer les échanges entre les organismes utilisateurs.

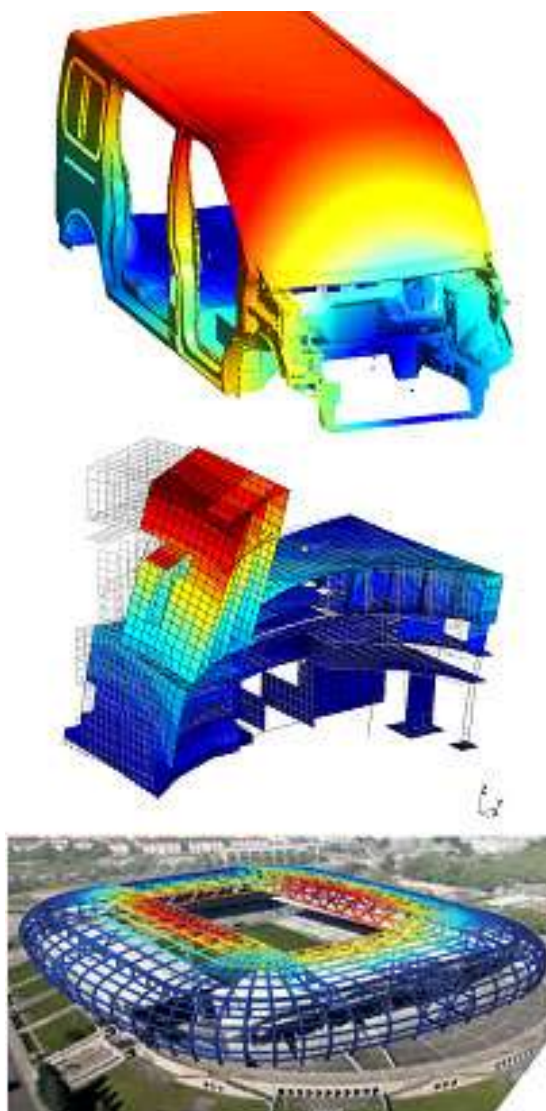
Ceci a conduit à la création du **Code_Aster Professional Network**. Celui-ci permet de mettre en relation les acteurs de la communauté au-delà des échanges techniques et ponctuels du forum.

L'adhésion à ce Réseau est libre dans le cadre du respect des droits et devoirs définis dans une charte qui précise que l'adhésion au Réseau suppose un engagement de chaque membre pour l'amélioration de la distribution de **Code_Aster Open source** et de la plateforme **Salomé Méca**, sans préoccupations commerciales.

Ce réseau réunit plus de **85 membres de 21 pays différents**. Ils sont issus du **monde industriel et d'organismes publics** (grands groupes, PME et ETI, Bureaux d'étude et Organismes de recherche sous contrat), des **fournisseurs de services** pour l'utilisation (formation, distribution de packages spéciaux, assistance, adaptation à des usages particuliers, co-développement) et des **enseignants** utilisant **Code_Aster** dans différents cursus.

Les domaines de modélisation représentés par les membres du réseau concernent l'aéronautique, l'industrie horlogère, les machines tournantes hydrauliques, le bâtiment et le génie civil et, dans une moindre mesure, l'industrie automobile et les équipements aéronautiques.

Depuis juin 2015, un bulletin d'information; en langue anglaise, sur les activités du Réseau et des exemples d'applications significatives est distribué à plus de 600 membres de la Communauté dans 25 pays différents [7]



7. Projet de simulation numérique au Maghreb

7.1 Contexte et Objectifs généraux

Ce projet a été mis en place suite à des échanges avec l'Association Franco-Maghrébine de Mécanique et Matériaux (Jet 2016), l'Association Tunisienne de Mécanique et lors de séminaires à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran et à l'Université Moulay Ismaïl de Meknès.

Tout en constatant les efforts faits par les enseignants et responsables d'équipes de recherche pour conserver le meilleur niveau de la formation et de leurs activités dans un contexte de ressources financières en diminution, nous voulons retenir deux constats largement partagés :

- la difficulté **d'offrir des débouchés professionnels dans leurs pays de formation** aux nombreux doctorants et ingénieurs diplômés au Maghreb. La qualité de leurs compétences est reconnue par de nombreux pays développés qui ne manquent pas de les accueillir pour développer leurs activités propres. Ce transfert de « main d'œuvre formée » est loin de favoriser les activités industrielles orientées vers la création d'emploi et les possibilités de développement des pays d'origine.
- la dispersion des solutions utilisées pour la **maîtrise de la simulation numérique** (accès aux logiciels, coût des services d'accompagnement) ne facilitent pas le transfert des résultats de l'université vers le tissu industriel local.

Pour apporter une contribution concrète au développement d'une coopération renforcée entre les Etablissements d'Enseignement supérieur de chaque pays du Maghreb, nous avons engagé **une action coopérative et un partage de compétences dans le domaine de la simulation numérique en mécanique**. Cette démarche peut être une contribution et un soutien dans deux secteurs :

- la création de bureaux d'études, de sociétés de services, de bureaux de contrôle locaux offrant des emplois aux étudiants de chaque pays au service du développement régional,
- le développement de la formation en alternance avec les entreprises régionales.

Cette démarche s'appuie sur le déploiement du logiciel industriel « libre » et « open source », le *Code_Aster* et la plateforme *SALOME Méca*.

Aucune contrepartie financière à court et long terme n'est associée à cette opération pour les utilisateurs de l'enseignement supérieur et de l'industrie, puisque la licence d'utilisation garantit la gratuité des versions actuelles et futures. Il appartient à chaque organisme utilisateur d'investir, à son propre rythme, dans la maîtrise de ces outils et le développement de ses compétences en simulation numérique pour atteindre ses propres objectifs d'enseignement, de recherche ou d'exploitation industrielle.

7.2 Contenu du programme

Ce projet est organisé par le **Réseau Professionnel Code_Aster Open Source** en deux étapes à court terme :

- une **installation coordonnée dans plusieurs Etablissements** (Ecole, Université, Laboratoire) dans chaque pays de la version stable du **Code_Aster** et **Salomé Méca** sur un ou plusieurs serveurs Linux ; cette installation sera validée par les procédures qualité en vigueur.
- immédiatement après cette installation, organisation d'une **session de formation de formateurs** d'un même pays avec travaux pratiques dans un des centres déjà équipés.

Ces deux opérations sont réalisées par une société de service française, membre du *Réseau Code_Aster ProNet*, dont le financement sera pris en charge par les établissements bénéficiaires ou par des aides locales.

Les **relations avec les établissements bénéficiaires** (cooptation et engagement, calendrier des opérations, voies de financement ...) sont prises en charge par des **correspondants régionaux**.

Deux actions à moyen terme sont envisagées :

- une **réunion de synthèse**, dans chaque pays, pour initier de nouvelles pistes de collaboration autour de cette distribution,
- une école d'été ou d'automne, sous l'égide de plusieurs associations de mécanique et du Réseau Méditerranéen des Ecoles d'Ingénieurs (RMEI), pour faire émerger des projets de développement.

Plusieurs actions concrètes sont maintenant engagées en Tunisie, au Maroc et en Algérie.

8. Conclusion

En racontant ce processus pour maîtriser la simulation numérique en milieu industriel nous avons voulu attirer l'attention sur plusieurs ingrédients du développement durable en ingénierie.

La **pertinence des outils de simulation n'est pas acquise indéfiniment** et doit être renforcée en permanence par les innovations et des travaux de recherche dans les disciplines qui permettent d'assumer efficacement la responsabilité d'une conception ou d'un dimensionnement.

La **qualité d'un logiciel n'est pas uniquement prouvée par la réputation** de son interface utilisateur et les raccourcis accessibles à la souris. L'automatisation du choix des paramètres de calcul peut s'avérer source d'erreur et un gain de productivité illusoire pour de bonnes prises de décision.

La **qualité des études de simulation suppose une formation approfondie des utilisateurs** pour poser avec pertinence les problèmes étudiés, pour comprendre les modélisations sous jacentes aux calculs réalisés et pouvoir vérifier à chaque instant les ordres de grandeur des résultats numériques obtenus.

La **capitalisation du savoirs faire de la recherche appliquée et le transfert de compétences** entre l'université et l'industrie n'est pas forcément compatible avec la logique commerciale de certains éditeurs.

Pour un bureau d'étude ou une entreprise **l'économie des coûts de licence peut avantageusement dégager des ressources** pour approfondir la formation des utilisateurs, la qualification et l'adaptation des outils aux enjeux de la simulation numérique.

9. Bibliographie

- [1] Wikipédia, L'encyclopédie Libre. – GNU General Public License
https://fr.wikipedia.org/wiki/Licence_publicue_générale_GNU
- [2] EDF-R&D – Code_Aster web site. 2016 – <https://www.code-aster.org/V2/spip.php?rubrique1>
- [3] EDF-R&D – Plaquette Code_Aster – http://code-aster.org/UPLOAD/DOC/Presentation/plaquette_aster_fr.pdf
- [4] DURAND Christophe – Plateforme Salomé Méca
http://web-code-aster.org/UPLOAD/DOC/Presentation/2008_Manchester.pdf
- [5] EDF-R&D – Tutoriaux de formation à l'utilisation de Code_Aster – <https://www.code-aster.org/V2/spip.php?rubrique67>
- [6] AUBRY Jean-Pierre – *Beginning with Code_Aster. A Practical Introduction to Finite Element Method Using Code_Aster, Gmsh and Salome* – Framabook, 2013 – ISBN 979-10-92674-03-3 – http://framabook.org/beginning-with-code_aster/
- [7] ProNeT – Lettre trimestrielle PRONET UPDATE – <http://web-code-aster.org/spip.php?article889>

