

R&D WHITE PAPER

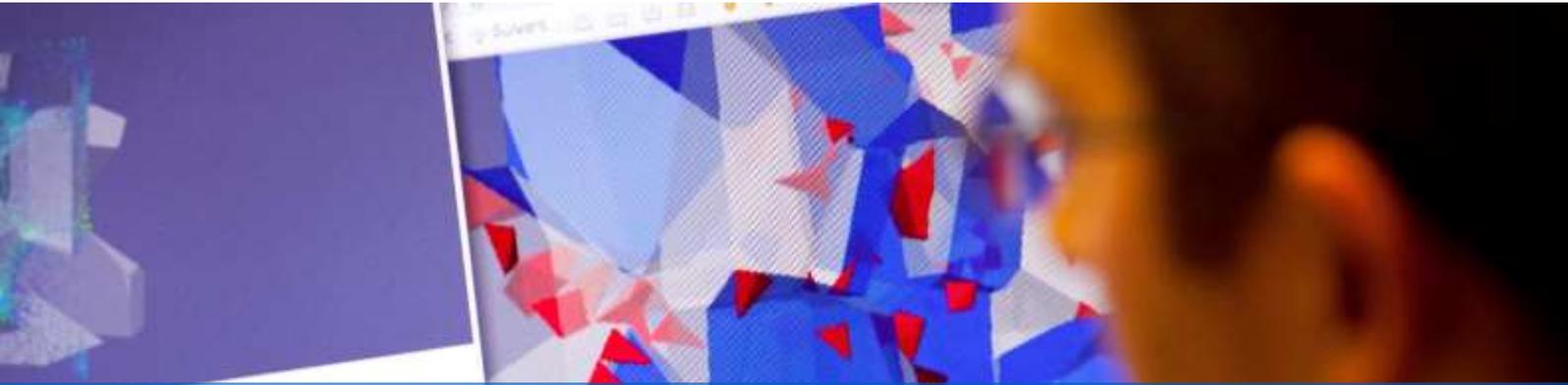
Logiciels Open Source d'EDF

Solutions et Opportunités

Ce Livre Blanc est publié par **EDF R&D**, la division Recherche et Développement d'EDF (Electricité de France). Il présente la **stratégie Open Source pour les logiciels**.

L'objectif est de **partager l'expertise de la R&D en innovation numérique à travers sa politique de développement de logiciels Open Source**.

Ce document présente cinq codes et logiciels Open Source développés par la R&D, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.



Codes Open Source de simulation numérique

Contexte, enjeux et stratégie

La R&D d'EDF dispose d'une puissance de calcul qui la place parmi les principaux centres de recherche industriels mondiaux. Les codes et logiciels Open Source développés par EDF R&D sont employés dans de nombreux secteurs industriels.

A titre d'exemple dans le domaine mécanique, **Code_Aster** est utilisé par l'industrie automobile pour simuler le refroidissement des moteurs et améliorer leur efficacité énergétique. Autre exemple : **Code TELEMAC** est utilisé dans le secteur de la construction pour modéliser les flux hydrauliques autour des ponts et des barrages, garantissant ainsi leur stabilité et leur durabilité. Le **Code OpenTURNS** est quant à lui utilisé dans l'industrie aérospatiale pour évaluer la fiabilité des composants et des systèmes critiques, ainsi que pour optimiser la conception des véhicules spatiaux et des avions.

On peut noter qu'un code comme **Code_Saturne** est aujourd'hui un des plus parallélisés dans sa catégorie. On peut également mentionner que la nouvelle version HPC de **Code_Aster** exploite désormais efficacement les calculateurs parallèles en particulier pour les justifications de tenue au séisme des ouvrages, avec des possibilités d'études que nous n'avions pas il y a encore quelques années en mécanique des structures.

Dans un monde où la collaboration et le partage de connaissances sont devenus essentiels pour relever les défis technologiques, EDF R&D s'impose comme un pionnier de

l'innovation numérique. À travers sa politique de développement de logiciels Open Source, EDF R&D est un acteur majeur dans le domaine de la simulation numérique.

Depuis plus de 20 ans, la politique Open Source d'EDF R&D a permis de partager ses codes avec une communauté académique et industrielle en constante expansion. Des codes comme Code_Saturne, Code_Aster ou Télémac-Mascaret sont aujourd'hui reconnus dans leur communauté respective pour être des codes à l'état de l'art et conçus pour réaliser du parallélisme massif.

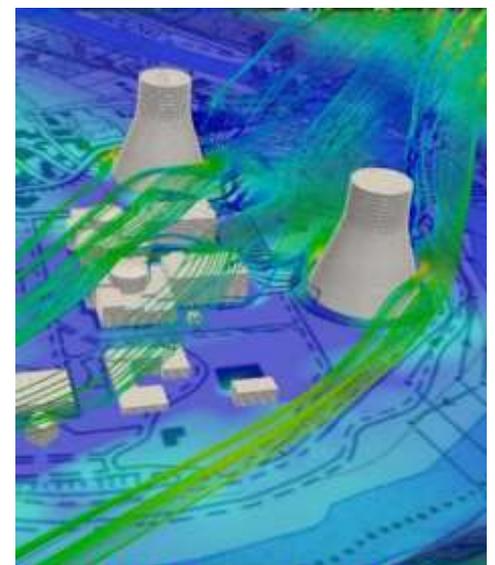
EDF R&D assure une transparence totale et est reconnu par une large communauté scientifique. Les utilisateurs ont un accès complet au code source des logiciels, ce qui favorise la confiance dans les résultats obtenus et permet une validation rigoureuse des modèles. La publication des codes source des logiciels permet à la communauté scientifique de vérifier et de valider les performances des logiciels, renforçant ainsi sa crédibilité et sa fiabilité.

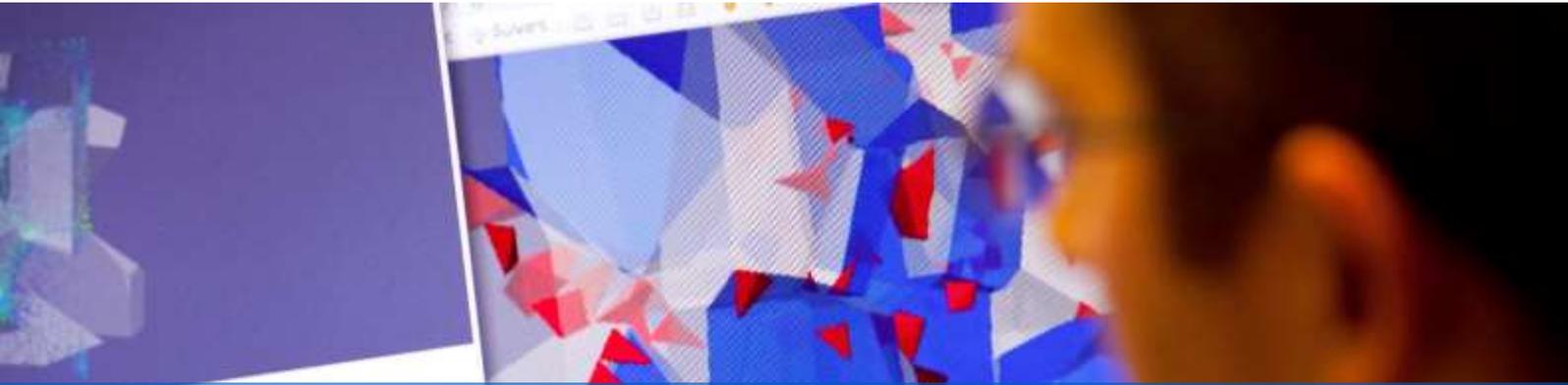
La démultiplication du nombre d'utilisateurs et leurs retours sur la détection des erreurs, les limites de validations des modèles, les benchmarks, etc., facilite l'amélioration continue des codes. EDF R&D maîtrise l'utilisation des codes et leur développement ce qui offre une grande flexibilité. En effet, ces derniers sont développés en continu au regard des besoins

industriels identifiés. La maîtrise des développements et de l'utilisation conduit à capitaliser les savoir-faire en simulation et modélisation accumulés depuis plusieurs dizaines d'années au plus près de l'état de l'art.

Les codes Open Source d'EDF R&D renforcent la souveraineté européenne en termes d'outils numériques. Ils permettent de disposer de solutions logicielles autonomes et sécurisées, indépendantes des fournisseurs commerciaux.

Les codes Open Source d'EDF offrent transparence, flexibilité et collaboration dans le domaine de la simulation numérique. En adoptant une approche ouverte et collaborative, EDF contribue activement à façonner l'avenir de la simulation numérique et de l'ingénierie, tout en consolidant sa position sur le marché mondial.





Codes Open Source de simulation numérique

Contexte, enjeux et stratégie

Sur le plan économique, le développement et la diffusion des codes Open Source d'EDF stimulent l'innovation et la compétitivité de l'industrie nationale. Par exemple, en 2023, le coût moyen d'acquisition d'un logiciel propriétaire de simulation numérique est estimé à plusieurs millions d'euros, alors que l'utilisation des codes Open Source d'EDF permet de réduire significativement ces coûts, favorisant ainsi l'essor des entreprises et de l'économie nationale.

Le calcul intensif ou HPC (High Performance Computing) poursuit sa course en avant et offre sans cesse de nouvelles puissances de calcul permettant de nouvelles opportunités d'études jusqu'alors irréalisables : évolution des méthodologies d'études, démocratisation des

approches probabilistes et du calcul paramétrique, et ce quels que soit les domaines d'études. Les codes 3D à physique des champs utilisent largement ces nouvelles puissances pour améliorer la qualité des études, descendre à des échelles spatiales plus représentatives des phénomènes physiques observés, étudier une diversité de scénarii en fonction de multiples paramètres.

D'autres avancées significatives ont été observées ces dernières années, impactant très fortement les stratégies de simulation. Des solutions sans cesse plus puissantes se basent sur l'augmentation continue de la puissance de calcul des supercalculateurs, en offrant de nouvelles possibilités d'études. Des technologies innovantes de Réalité Augmentée (RA) ou de Réalité

Virtuelle (RV) permettent de faciliter la compréhension des phénomènes physiques complexes, ou encore une généralisation de l'usage du Cloud qui amènent à concevoir autrement les infrastructures autour de la simulation.

La simulation numérique est très impactée par ces nouvelles technologies qui offrent de nouvelles opportunités telles que des opportunités de couplage entre simulation et intelligence artificielle pour accroître la productivité des études, ou encore des opportunités de couplage en temps réel simulation et expérimental à travers le développement de jumeaux numériques notamment.



Etude sismique / CNPE de CRUAS (DT), simulation code_aster

2021 : 34 jours pour un calcul complet

2022 : 7 minutes de calcul



Code Aster

La Puissance de l'Open Source pour la Simulation Numérique et la Mécanique des structures

#1

Caractéristiques techniques et fonctionnalités

Code_aster est un logiciel Open Source développé par la R&D d'EDF pour la simulation numérique généraliste de la mécanique du solide. Il répond à des problèmes d'ingénierie complexe dans des secteurs tels que le génie civil, l'aéronautique, l'automobile et l'énergie, dont le nucléaire. Sa qualité et sa fiabilité, validées par les standards du nucléaire, assurent une modélisation et une analyse précises des structures et matériaux sous diverses sollicitations. Avec une architecture modulaire et évolutive, Code_aster propose une suite complète d'outils pour la modélisation, l'analyse et l'optimisation des structures mécaniques, et la résolution de problèmes thermo-mécaniques.

Développé par les experts en simulation de la R&D d'EDF, Code_aster est reconnu pour sa **fiabilité** et sa **précision** dans la modélisation des comportements physiques les plus complexes. Il est

validé par plus de 4000 tests, dont la moitié avec des références externes.

Il dispose ainsi d'une **flexibilité exceptionnelle** et permet de s'adapter à une variété de cas d'utilisation, des problèmes linéaires simples aux simulations non linéaires complexes. L'intégration de Code_aster avec Salome dans Salome_meca offre une plateforme modulaire dédiée à la modélisation, à l'analyse numérique et au post-traitement. Elle facilite le traitement automatique des données issues de simulations de Code_aster. De plus, grâce à son interface python enrichie, Code_aster se couple aisément avec tous types d'outils d'ingénierie.

En tant que logiciel ouvert, Code_aster se base sur l'accessibilité, le retour d'expérience et les échanges avec la communauté scientifique internationale pour se maintenir à l'état de l'art.

Code_aster est particulièrement riche en lois de comportement, en éléments finis, en types de chargements. Il propose une suite exhaustive de fonctionnalités adaptées à divers besoins en simulation, allant de l'analyse structurale à la thermique, en passant par d'autres spécialités d'ingénierie. Cette polyvalence garantit une solution complète pour toute exigence de simulation.



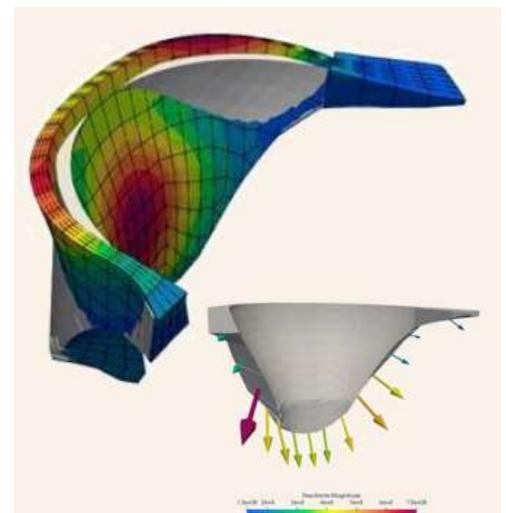
Code_aster en chiffres

- **Plus de 35 ans d'expertise** dans la mécanique des structures
- **Plus de 4 200 cas-tests** pour la vérification, ainsi que des études de validation couvrant divers domaines de la mécanique.
- **Plus de 2940 publications**

Source : Google Scholar

Domaines d'application

Types d'applications	Types d'analyses
<ul style="list-style-type: none"> • Tenue statique non-linéaire des équipements • Tenue statique et vieillissement des ouvrages • Tenue au séisme des ouvrage • Tenue au séisme des équipements • Fatigue et rupture des composants métalliques • Géomécanique • Structures périodiques • Métallurgie, mise en forme, • Soudage, procédés de fabrication additive • Analyse vibratoire, machines tournantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul thermique, thermo-hydratation ou métallurgie • Calcul modal, spectral ou dynamique linéaire • Calcul mécanique et thermo-mécanique statique non linéaire • Analyse statique linéaire • Calcul dynamique non-linéaire • Calcul thermo-hydro-mécanique • Calcul de rupture, fatigue et analyse limite



Etude la tenue au séisme d'un barrage avec modélisation de l'interaction fluide-structures et frontières absorbantes sur les fondations.



Code Saturne

La référence Open Source en mécanique des fluides

#2

Caractéristiques techniques et fonctionnalités

Code_saturne, développé par la R&D d'EDF depuis plus de 20 ans, est un logiciel libre de simulation en mécanique des fluides conçu pour des analyses détaillées d'écoulements fluides ou gazeux, de transfert de chaleur, et de réactions chimiques.

Avec son extension **neptune_cfd** pour la simulation d'écoulements diphasiques, il permet une modélisation précise des mouvements fluides en résolvant les équations de Navier-Stokes à une échelle fine. Il repose sur la méthode des volumes finis qui divise l'espace en petits volumes, facilitant le suivi précis de la vitesse, de la pression, de la température, et de la composition chimique à tout moment et en tout point.

Code_saturne est notamment utilisé dans le domaine nucléaire pour

garantir le bon fonctionnement des centrales, en aéronautique pour effectuer des simulations de qualité de l'air, ainsi que dans d'autres secteurs tels que la défense, l'aéronautique, la construction navale et les infrastructures portuaires.

Code_saturne est **accessible** pour tout utilisateur grâce à son interface graphique et facilitant des utilisations avancées grâce à la possibilité d'écriture de routines utilisateurs spécifiques. Sa **polyvalence** lui permet de gérer une vaste gamme de problématique en mécanique des fluides, incluant les écoulements turbulents et incompressibles, ainsi que des phénomènes multiphysiques. De plus, Code_saturne est **hautement parallélisé** pour exploiter au maximum les performances des supercalculateurs modernes (avec des tests effectués sur des dizaines

de milliers de cœurs et des milliards de cellules).

Code_saturne s'intègre facilement dans des workflows comprenant d'autres outils de simulation et systèmes de CAO, notamment avec la plateforme SALOME_cfd. Cette collaboration permet une modélisation, simulation, et analyse de données cohérente et efficace. Son développement est appuyé par un rigoureux processus de vérification et de validation mené quotidiennement, ce qui garantit sa fiabilité.

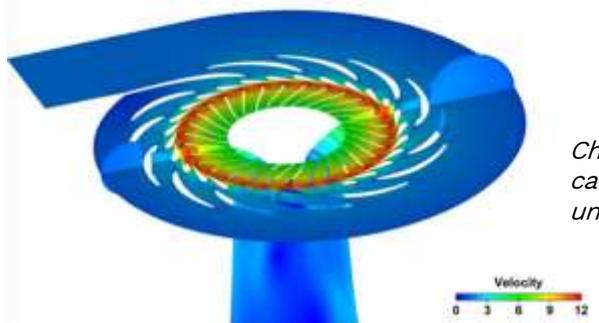
 **Code_saturne en chiffres**

- **Plus de 500 ingénieurs et chercheurs** l'utilisent
- **Plus de 1 000 exécutions testées** chaque jour
- **Plus de 246 publications scientifiques.** Source : Scopus

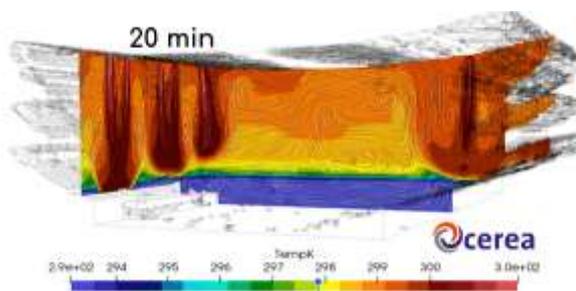
Domaines d'application

Code_Saturne contient de nombreux modèles de turbulence, que ce soit avec l'approche moyennée au sens de Reynolds (RANS) ou la simulation aux grandes échelles (LES). Il inclut également différents modules permettant de modéliser de nombreuses physiques comme :

- Écoulements homogènes ou stratifiés
- Écoulements atmosphériques
- Écoulements souterrains
- Incendies (combustions, rayonnement)
- Suivi d'interfaces (méthodes ALE et VoF)
- Suivi de particules (Lagrangien)
- Arcs électriques



Champ de vitesse dans un calcul turbomachine pour une turbine Francis99.



Champ de température dans un stade sportif ventilé.



openTELEMAC

Le logiciel Open Source en Modélisation numérique de l'Hydraulique Environnementale

#3

Caractéristiques techniques et fonctionnalités

Le système TELEMAC est développé par la R&D d'EDF en **collaboration avec des partenaires français, européens et internationaux** depuis plus de trente-cinq ans. Il s'agit d'une suite de codes de calcul scientifique, couplés et parallélisés, destinée à la modélisation de l'hydraulique environnementale à surface libre. Ce système englobe des modèles en 1D, 2D et 3D, eulériens et lagrangiens, qui permettent de prédire une vaste gamme de phénomènes liés à l'écoulement de l'eau dans le milieu naturel : hydrodynamique à surface libre, transformation des vagues, transport sédimentaire, qualité de l'eau et formation de glace. Cette modélisation peut s'appliquer aux réservoirs, rivières, lacs, mers et océans. Les principales caractéristiques de ce logiciel sont, d'une part, le choix d'une discrétisation en espace basée sur la méthode des éléments finis qui est adaptée pour les maillages non-structurés (le choix de la méthode des volumes finis est également

disponible en 2D) et, d'autre part, la parallélisation par décomposition de domaines qui permet de hautes performances sur clusters de calculs (technologie MPI).

openTELEMAC est **spécialisé en hydrodynamique et modélisation environnementale**. Il est reconnu pour sa capacité à effectuer des simulations précises et de qualité. Il est particulièrement efficace pour la modélisation de processus physiques complexes et couplés tels que la dynamique des dunes sous-marines, l'évolution du littoral sous l'action des vagues et des courants, l'étude d'impacts du changement climatique, la stratification thermique et saline, et les interactions avec les infrastructures civiles et ouvrages hydrauliques.

Le logiciel peut être aisément **intégré à d'autres outils et logiciels** de modélisation, ce qui permet une approche plus complète et intégrée de la modélisation environnementale

et hydraulique. De plus, openTELEMAC est compatible avec Linux et Windows, ce qui facilite son intégration dans divers environnements de développement et systèmes informatiques, y compris les systèmes embarqués, ou les jumeaux numériques.

Etant donné sa nature libre, openTELEMAC est **flexible, transparent** et soutenu par une communauté internationale d'experts qui contribue à son développement continu.



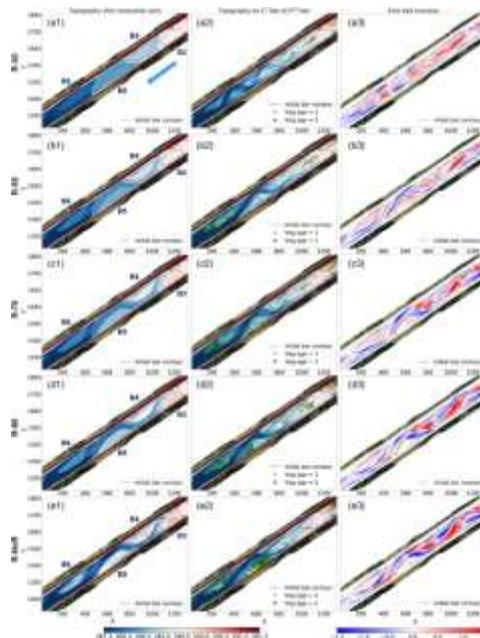
openTELEMAC en chiffres

- Depuis 2010, distribué en Open Source
- **Plus de 2600 utilisateurs** inscrits
- Regroupant des codes **1D, 2D et 3D**, eulérien et lagrangien
- Un **consortium de 9 partenaires** : ARTELIA, BAW, CEREMA, CERFACS, ENPC, HR Wallingford, IMDC, STFC et EDF

Domaines d'application

openTELEMAC couvre une large gamme d'applications telles que :

- Conception de structures offshore, portuaires et côtières
- Etudes d'impact de travaux de dragage ou de réhabilitation
- Etudes d'impact environnemental de rejets thermiques, salins et de polluants
- Etudes d'inondations, de surverses, de surcotes, de bris de barrages, et impact et opération d'ouvrages hydrauliques
- Etudes d'impact du changement climatique sur les cours d'eau et le littoral, sur la gestion des réservoirs, ou autres infrastructures



Interactions entre l'hydrodynamique, le transport des sédiments et les processus végétaux dans la rivière Isère (France) :

Élévation initiale du lit après les travaux de restauration, élévation finale du lit et distribution de la végétation. D'après Li et al. (2023).



SALOME

La Plateforme Open Source de simulation numérique, de la CAO à la visualisation

#4

Caractéristiques techniques et fonctionnalités

SALOME est une plateforme Open Source dédiée à la simulation numérique, conçue pour faciliter chaque étape d'une étude : de la création du modèle CAO et du maillage jusqu'au post-traitement et à la visualisation des résultats, en incluant l'enchaînement des schémas de calcul.

L'application propose une gamme étendue de fonctionnalités, comprenant un modèleur CAO paramétrique avancé, un module pour la génération et l'édition de maillages doté de nombreux algorithmes, un superviseur de calcul, ainsi que plusieurs outils d'analyse et de traitement des données dont l'assimilation de données, le calage de paramètre de calcul des incertitudes et la manipulation de champs.

SALOME se démarque comme une

plateforme Open Source, permettant de sélectionner les bibliothèques à l'état de l'art et d'intégrer les versions les plus à jour. Cette approche assure une accessibilité et une flexibilité maximale pour la personnalisation et le développement collaboratif de simulations numériques.

SALOME offre de nombreuses fonctionnalités incluant un modèleur CAO paramétrique performant, un module de génération et d'édition de maillages incluant de nombreux algorithmes, un superviseur de calcul et de nombreux outils d'analyse et traitement des données.

SALOME est facilement **extensible** et permet d'intégrer des codes de calcul pour les associer aux outils de pré- et post-traitement fournis par la plateforme. Plusieurs plateformes disciplinaires sont ainsi disponibles

comme `salome_meca` (avec `code_aster`), `salome_cfd` (avec `code_saturne`) et SALOME-HYDRO (avec TELEMAC-MASCARET).

Grâce à l'**interopérabilité** entre ses modules, SALOME se distingue par sa capacité à fournir des services à haute valeur ajoutée. Cette plateforme offre des fonctionnalités **personnalisables**, conçues pour s'adapter avec précision aux besoins uniques des différentes applications physiques.



SALOME en chiffres

- Plus de 150000 téléchargements par an
- Plus de 5000 tests de vérifications
- Plus de 120000 visiteurs par an

Exemples d'applications pratiques

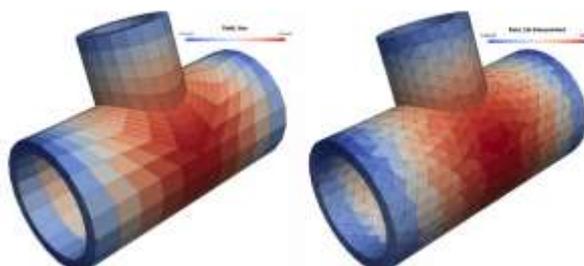
SALOME MECA : Avec `code_aster` pour l'analyse sismique, allant de l'étude des milieux poreux à l'acoustique, en passant par la fatigue et la dynamique stochastique.

SALOME CFD : Avec `code_saturne` pour l'analyse des écoulements en 2D, 2D-axisymétriques, ou 3D, qu'ils soient permanents ou transitoires. Les écoulements analysés peuvent être laminaires ou turbulents, incompressibles ou légèrement compressibles, isothermes ou non, et peuvent inclure le transport d'un scalaire.

SALOME Hydro : avec openTELEMAC pour la réalisation d'études d'hydraulique à surface libre.



Exemple de posttraitement d'une simulation sur un bâtiment réacteur dans `salome_cfd`



Exemple d'une projection de champ 3D depuis un maillage source vers un maillage cible



openTURNS

Le logiciel Open Source de modélisation des incertitudes

#5

Caractéristiques techniques et fonctionnalités

openTURNS est un logiciel Open Source qui permet de modéliser des incertitudes, de les propager à travers un code de calcul, d'en hiérarchiser les impacts sur une grandeur de sortie. Il est adossé à la Méthodologie de Traitement des Incertitudes développée par EDF R&D et enrichie par nos partenaires depuis les années 2000.

openTURNS propose des services de complexités diverses, permettant de réaliser toutes les étapes de traitement des incertitudes :

- La modélisation probabiliste d'un vecteur repose sur la donnée d'une loi multivariée dont la structure de dépendance est une copule. Un mécanisme de composition de distributions permet d'augmenter les capacités de modélisation de l'outil, notamment pour le traitement des grandes

dimensions. openTURNS permet aussi la modélisation des processus et des champs (processus gaussiens, ARMA, ...). Les lois multivariées et les processus peuvent être construits à partir de données grâce à de nombreuses fonctionnalités de traitements statistiques (ajustements paramétriques et non paramétriques, tests d'adéquation, graphes de visualisation des données, ...).

- La propagation des incertitudes est assurée par des algorithmes dédiés, reposant sur de la simulation massive (méthodes de Monte Carlo et méthodes de réduction de variance), des méthodes d'optimisation ou d'intégration, ou le calcul analytique dès que possible (utilisant l'algèbre des fonctions à l'ordre 2).
- La hiérarchisation est quantifiée

par de nombreux indices propres aux algorithmes de propagation (indices de Sobol, indices FORM, ...).

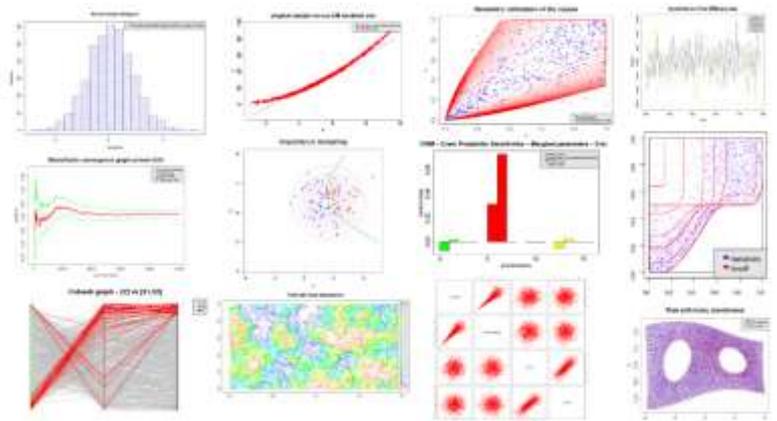
- Le code de calcul peut être remplacé par un méta modèle construit à partir de techniques déterministes (régression, ...) ou probabilistes (polynômes de chaos, krigeage, ...).

La flexibilité d'openTURNS lui permet de se coupler à tout code de calcul, écrit dans n'importe quel langage et de toute complexité (python, C, C++, FORTRAN ou autre langage).

Quelques contextes d'application industrielles

openTURNS couvre une large gamme d'applications telles que :

- Estimation de courbes de probabilité de détection de défaut pour la qualification de procédé de contrôle non destructif
- Calibration/validation de modèles de thermique des bâtiments
- Modélisation par inversion du coefficient de Strickler
- Estimation de quantile de crue en chaque point du cours d'eau



OpenTURNS en graphiques

EDF R&D offers a **wide range of services and training courses** for international partners and clients, professionals or scientists.

Several areas of research are open to customers willing to **benefit from EDF R&D analysis, expertise or lab testing**. EDF R&D services span across three major domains: **Smart Home, Regions and Companies and Low Carbon Generation**.

The **Institute for Technology Transfer (ITech)** is a training organization to share practices, expertise, and innovations based on EDF R&D activities.

Various training courses are available on **renewable integration, smart grid solutions, microgrids, grid integration, energy storage, energy efficiency, control and communication technologies, etc** (see **EDF R&D ITECH catalogue**). Training is provided by EDF R&D leading experts in these key domains.



EDF R&D BROCHURE OF SERVICES

Consult the interactive document by clicking on the picture opposite



EDF R&D ITECH CATALOGUE OF TRAINING COURSES

Consult the interactive document by clicking on the picture opposite



EDF R&D: DARE TO LOOK TOWARDS THE FUTURE AND INNOVATE AT PRESENT

EDF R&D carries out **research for all EDF Group entities**, helping them improve performance and prepare the future integrating innovative technologies and solutions.

EDF R&D has **three Labs in France, six abroad** (China, Germany, Italy, Singapore, UK, USA) and a **R&D representative office in Brussels**.

OUR 4 SCIENTIFIC PRIORITIES

- 1 **DECARBONISING OUR CLIENTS' USES THANKS TO ELECTRICITY**
- 2 **STRENGTHENING THE PERFORMANCE OF OUR GENERATION ASSETS**
- 3 **INVENTING TOMORROW'S ENERGY SYSTEMS**
- 4 **ACCELERATING DIGITAL TRANSFORMATION**



EDF Lab's facilities in Saclay, one of EDF R&D research centers.

© @EPA Paris-Saclay / DronePress

*All elements contained in this document are for information only.
EDF will not be liable for the consequences of using the information presented in this white paper.*

EDF SA
22-30 avenue de Wagram
75282 Paris cedex 08
France
www.edf.com

EDF Research and Development
EDF Lab Paris-Saclay
7 boulevard Gaspard Monge
91120 Palaiseau - France

Contact:
EDF R&D
International & Partnerships
ret-d-enquiries@edf.fr