



Forum Teratec 2022

Les grand enjeux de la transition
vers la neutralité carbone et rôle
de la transformation numérique

Jean-paul CHABARD

Directeur Scientifique - EDF R&D

EDF « RAISON D'ÊTRE » a guide to action

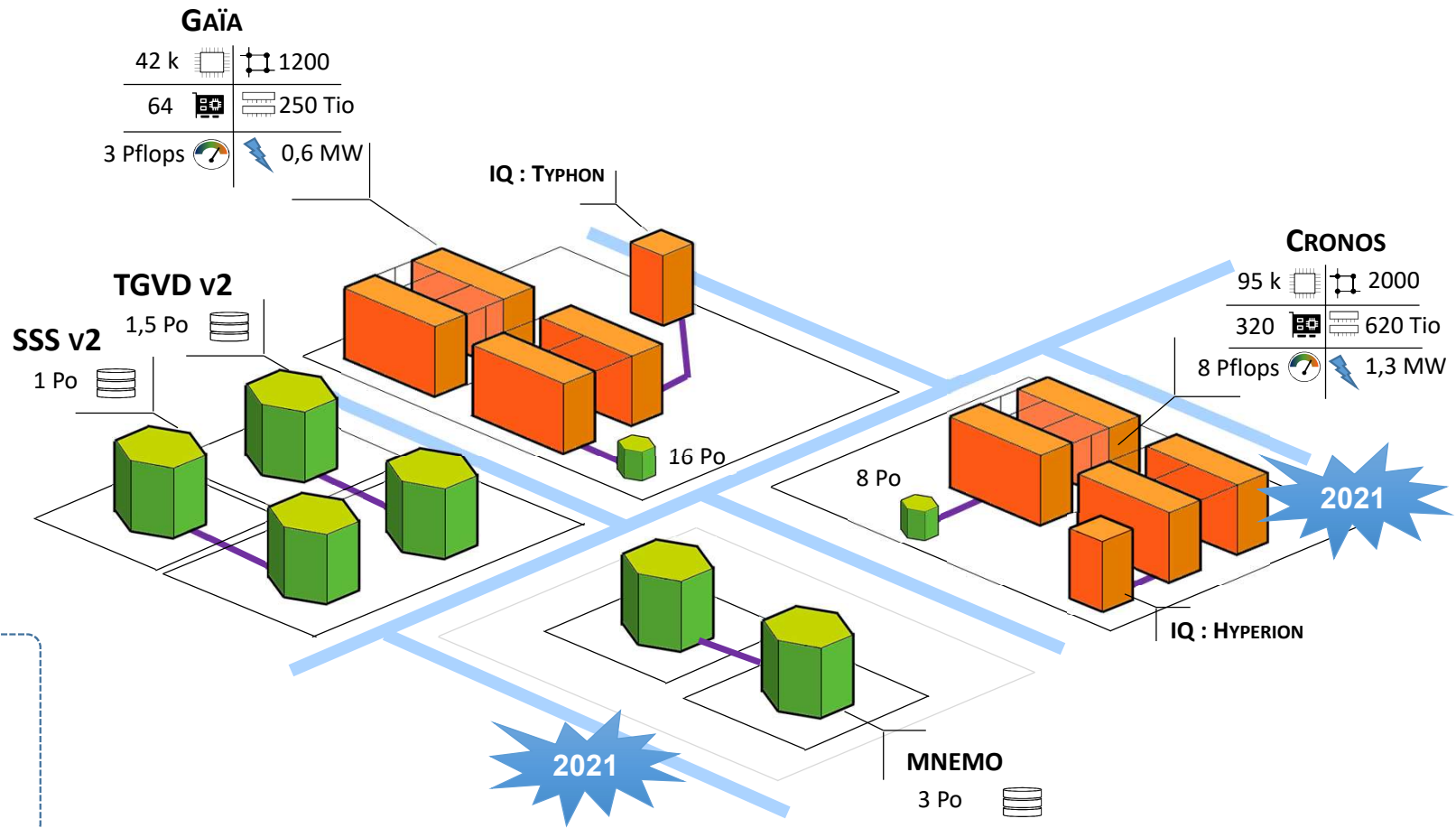
“to build a net zero energy future with electricity and innovative solutions and services, to help save the planet and drive wellbeing and economic development.”

LA R&D EN CHIFFRES



Many scientific and technical challenges to be met, to decarbonize society and meet the challenges of climate change, for which science and the use of High Performance Computing is crucial.

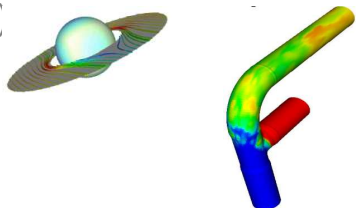
EDF High Performance Computing Facility



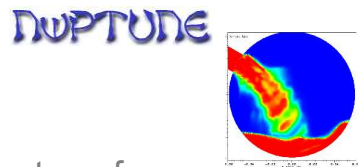
Codes developed at EDF R&D

... a know-how in the state of international art and accessible by all thanks to the Open Source !

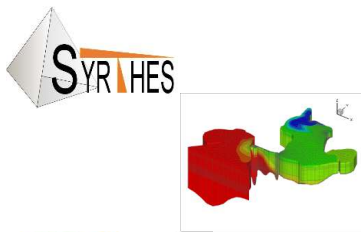
- Code_Saturne (i.e. SALOME-CFD)
 - general usage single phase CFD, plus specific physics
 - property of EDF, open source (GPL)
 - <http://www.code-saturne.org>



- NEPTUNE_CFD (i.e. SALOME-CFD)
 - multiphase CFD, esp. water/steam
 - property of EDF/CEA/AREVA/IRSN



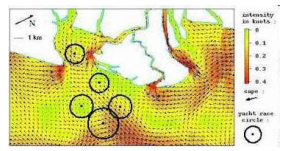
- SYRTHES
 - thermal diffusion in solid and radiative transfer
 - property of EDF, open source (GPL)
 - <http://rd.edf.com/syrthes>



- Code_Aster (i.e. SALOME-MECA)
 - general usage structure mechanics
 - property of EDF, open source (GPL)
 - <http://www.code-aster.org>



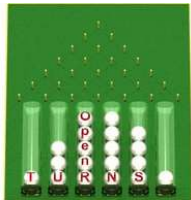
- TELEMAC system (i.e. SALOME-Hydrau)
 - free surface flows
 - Many partners, mostly open source (GPL, LGPL)
 - <http://www.opentelemac.org>



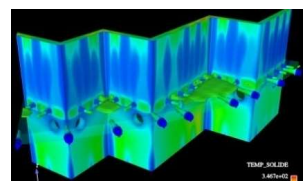
- SALOME platform
 - integration platform (CAD, meshing, post-processing, code coupling)
 - property of EDF/CEA/OpenCascade, open source (LGPL)
 - <http://www.salome-platform.org>



- Open TURNS
 - tool for uncertainty treatment and reliability analysis
 - property of EDF/CEA/Phimeca, open source (LGPL)
 - <http://trac.openturns.org>



- and many others...
 - Neutronics, electromagnetism
 - Component codes, system codes
 - Optimization codes,...

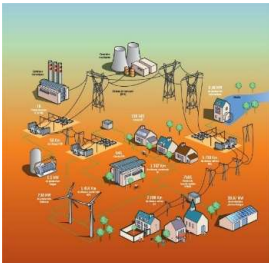


Principaux Domaines d'application du HPC (de la simulation des phénomènes physiques à l'analyse de données)

Main Domains of HPC application (both Physical Simulation and Data Analysis)



Production d'énergie (Nucléaire, renouvelable, Hydraulique, Thermique, Environnement..)
ENERGY PRODUCTION (Nuclear, Renewable, Hydraulic, Thermal, Environment)



Réseau / Intelligents (réseaux et villes intelligentes)
Network / Smarties (smart-grids, smart-cities)



Marketing



Gestion de l'énergie
Energy Management

Nucléaire : un domaine particulier
Nuclear : a particular domain

Etanchéité de l'enceinte
 Tightness of the containment vessel

Résistance à l'impact
 Resistance to impact (projectiles)

Analyse Sismique
 Seismic Analysis

Comportement des turbines
 Behaviour of turbines

Etanchéité des lignes primaires
 Tightness of the primary loop

comportement de la cuve
 Behaviour of the pressure vessel

Contrôle de la réaction nucléaire
 Control of nuclear reactions

Démantèlement et stockage des déchets
 Dismantling Waste Storage

Environmental impacts
 Analyse Sismique

Bénéfice du HPC Benefits of the HPC :

- ✓ Less simplifying assumptions / moins d'hypothèses simplificatrices
- ✓ More information / davantage d'informations
- ✓ More calculation scenarios / davantage de scénarios calculés
- ✓ Take into account incertainties / prise en compte des incertitudes

- **Guarantee safety (sûreté)**
- **Improve performances/costs (améliorer la performance/coûts)**
- **Maintain assets (maintien des actifs)**
- **Face unexpected events (événements non prévus)**
- **Ageing issues...(questions liées au vieillissement)**



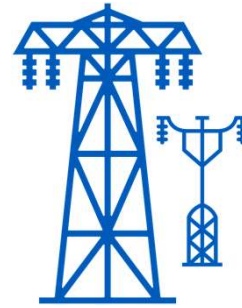
AXIS 1

**DECARBONISING
OUR CLIENTS'
USES THANKS TO
ELECTRICITY**



AXIS 2

**STRENGTHENING
THE PERFORMANCE
OF GENERATION
ASSETS**



AXIS 3

**INVENTING
TOMORROW'S
ENERGY SYSTEMS**



AXIS 4

**ACCELERATING
DIGITAL
TRANSFORMATION**



AXIS 1

**DECARBONISING
OUR CLIENTS' USES
THANKS TO
ELECTRICITY**

- Technological solutions towards carbon neutrality
- Alternative energy vectors to fossil energies
- A carbon-free mobility
- New low-carbon offers for our clients
- Clients and territories confident in the quality of our services and facilities

SIMULATION of the human activity

SMACH code simulate the human activity and the loading curves of the energy.

Applications : Autoconsumption, Electric Vehicles, New rate offers...)



SIMULATION OF REALISTIC HOUSEHOLD'S ELECTRICAL CONSUMPTIONS

Objectives :

- Anticipate the energy impact of products and services
- Describe family profiles
- Simulate their behavior in their households to evaluate their electricity impact

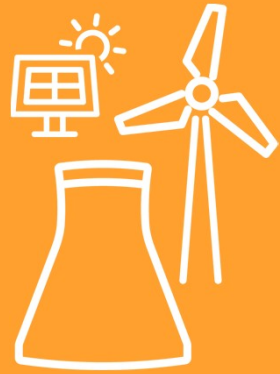
How ?

A Multi System Agent modeling using :

- Composition of the family
- Nature of the household and its electrical equipment
- Geographical location

Outputs :

- Simulation of energy performance of buildings or residential equipment
- Asses the effects of public energy policies on consumption
- Simulation of the impact of external events on power consumption,
- ... and many others

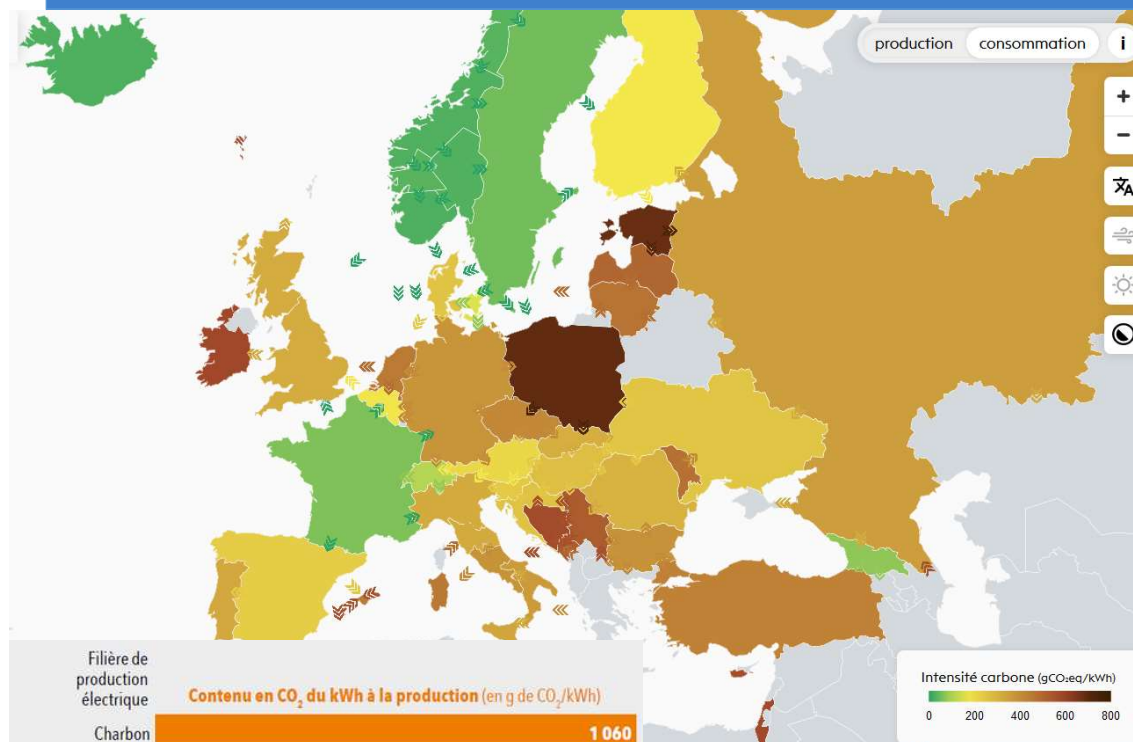


AXIS 2

STRENGTHENING THE PERFORMANCE OF GENERATION ASSETS

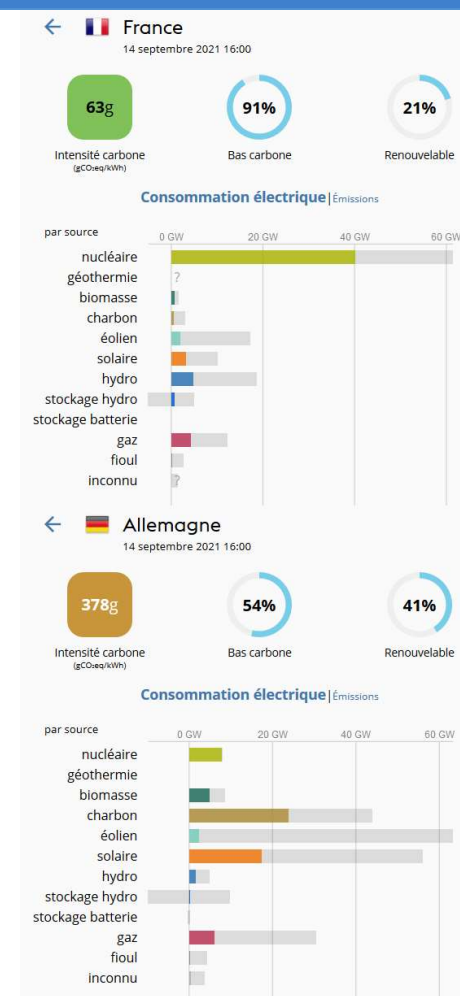
- New competitive power generation
- Power generation preserving the planet
- Sustainable and safe generation assets

Carbon intensity of electricity generated in Europe on September 14th, 2021 at 16:00 www.electricitymap.org



Filière de production électrique	Contenu en CO ₂ du kWh à la production (en g de CO ₂ /kWh)
Charbon	1 060
Fioul	730
Gaz	418
Photovoltaïque	55
Géothermie	45
Éolien	7
Nucléaire	6
Hydraulique	6

Tableau 1 : Contenu en CO₂ du kWh à la production selon les filières - Source : Base carbone Ademe. Nota : Ces chiffres intègrent les émissions directes et indirectes à la production.

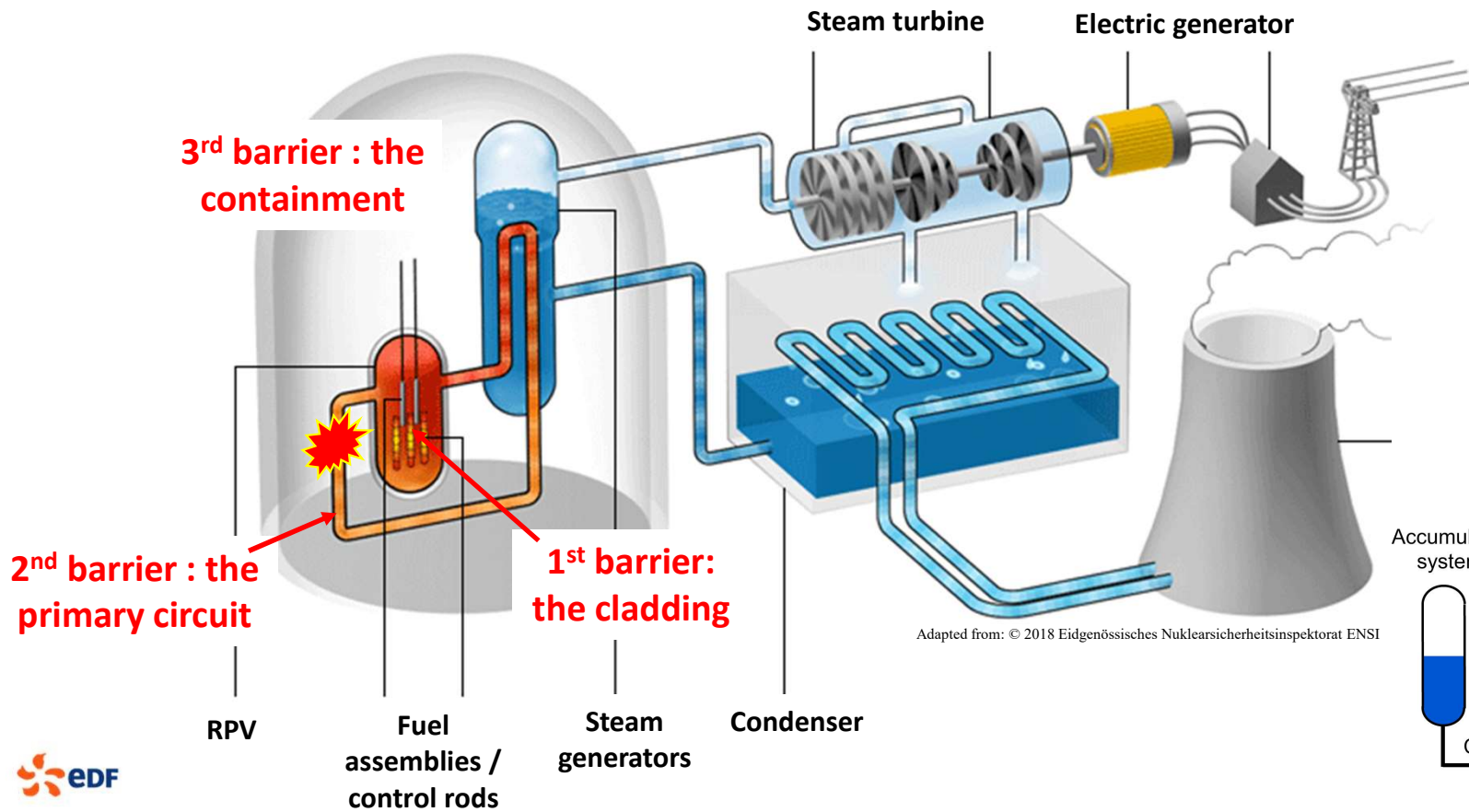


Intermediate-Break Loss Of Coolant Accident

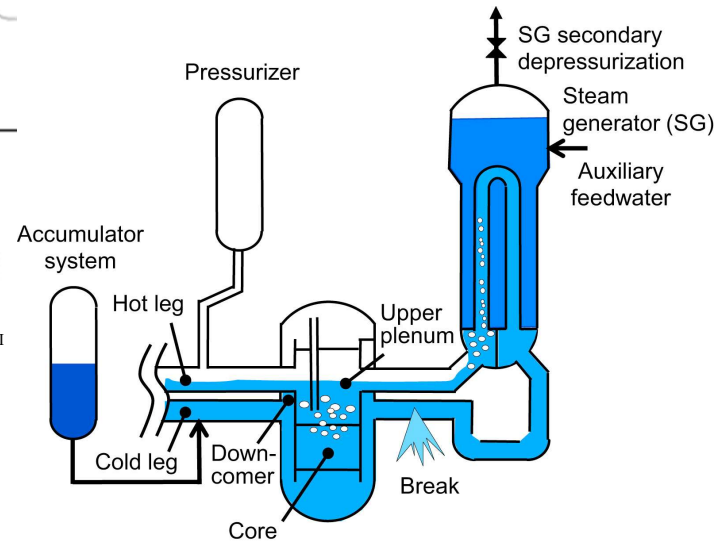
Break on the primary circuit: 2nd barrier failure & risk of damage to the 1st barrier

- Mechanical solicitations: component damages
- Water inventory loss: partial uncovering of the nuclear core (clad rupture ?)
- T & P increase in the containment + radiological consequences

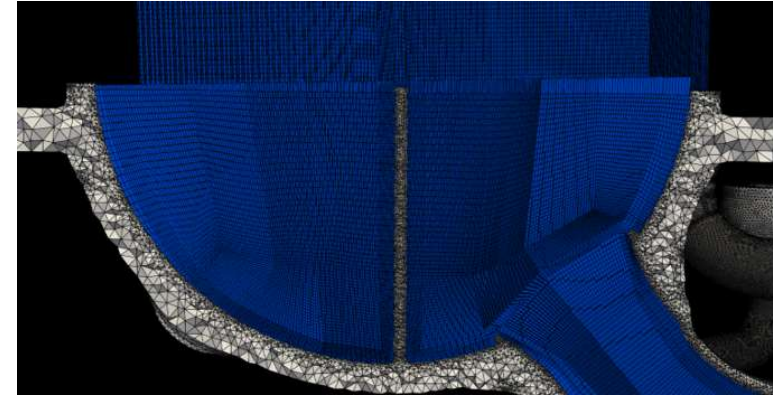
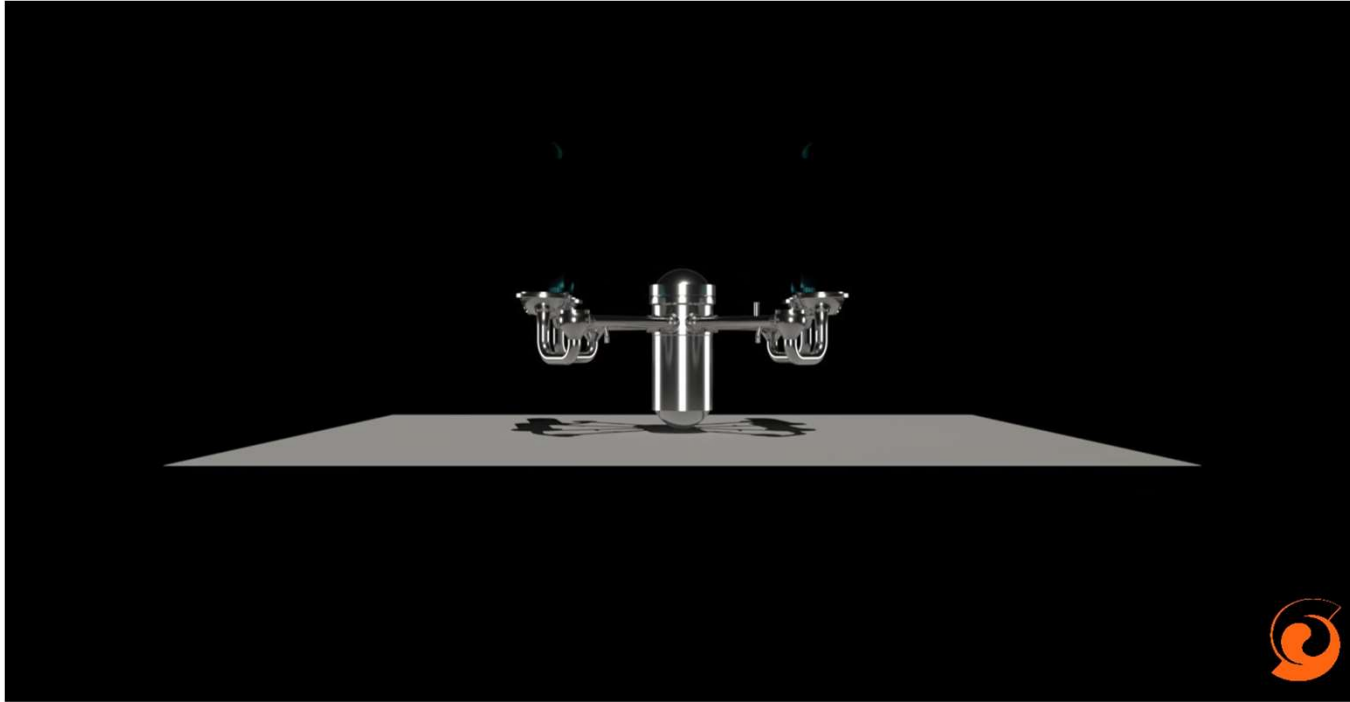
- Needs of better physical understanding
- Support for on-going 1D-2D modeling approach (CATHARE)
- Better knowledge of two-phase flows in the downcomer under accidental situations (with all-flow regimes transitions)



Adapted from: © 2018 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

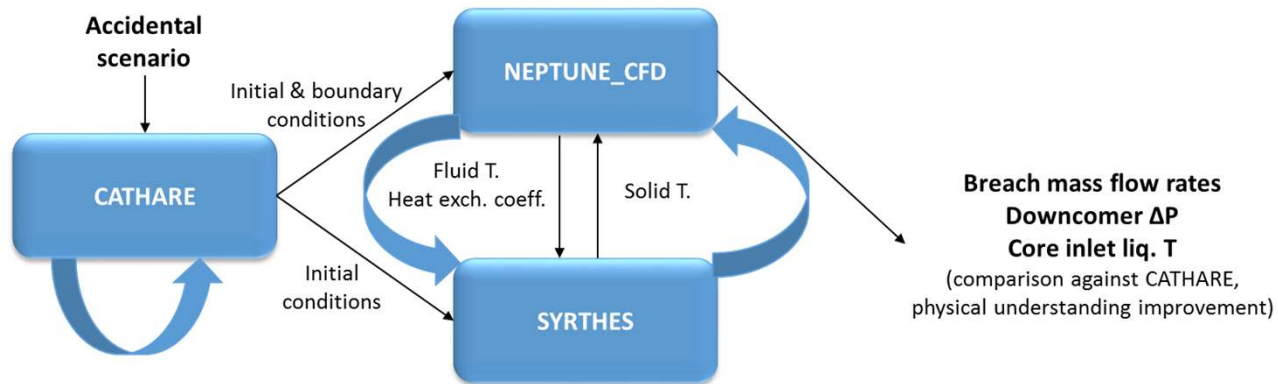


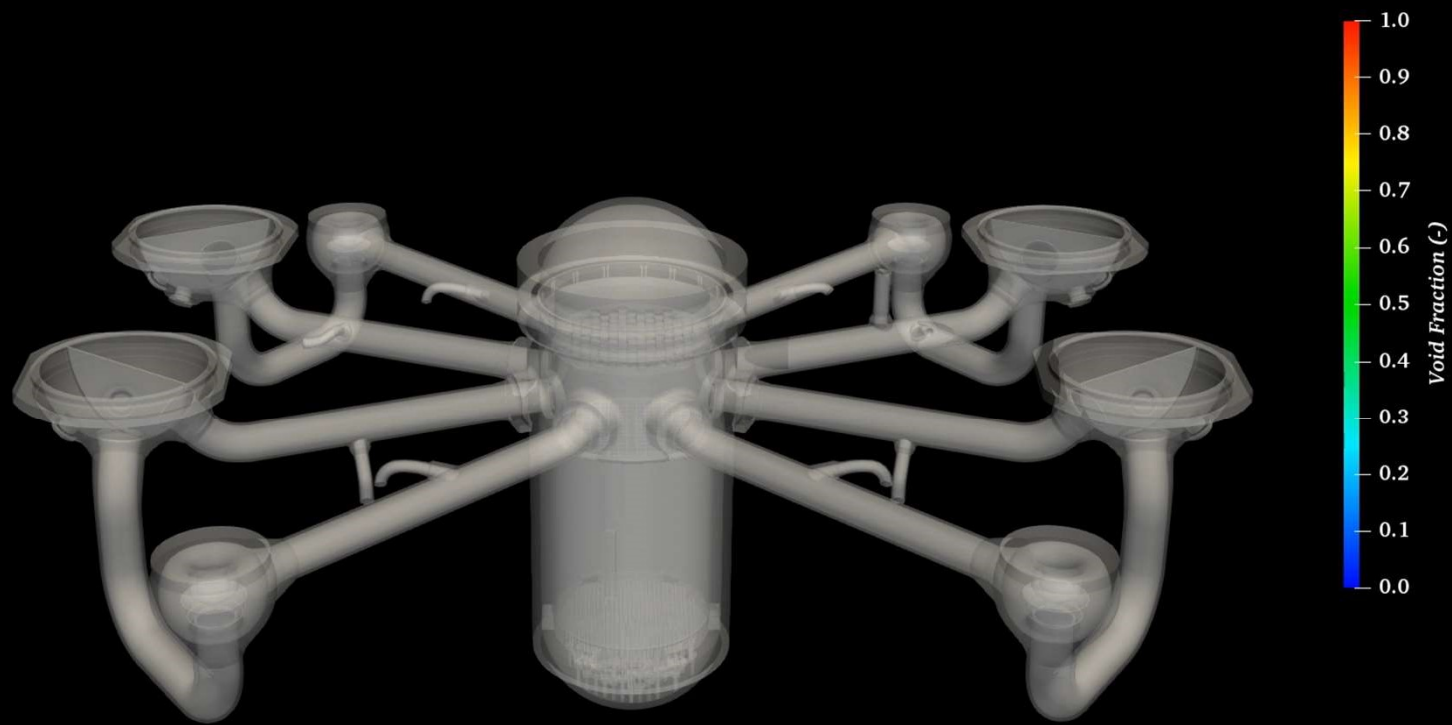
Computational domains & meshes



Fluid domain:
120 M of
hexahedral cells

Solid domain:
140 M of tetrahedral
cells

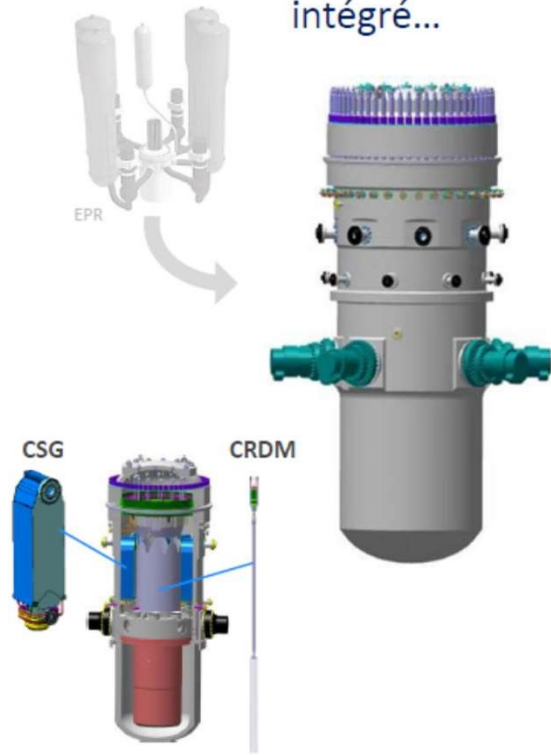




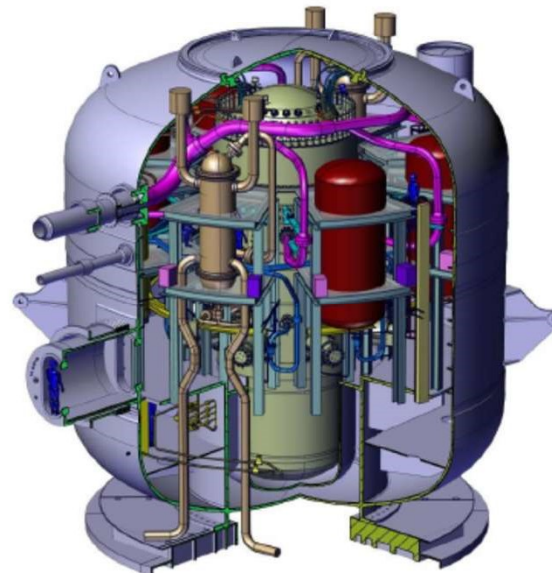
Time: -5.25 s

Description du produit NUWARD™

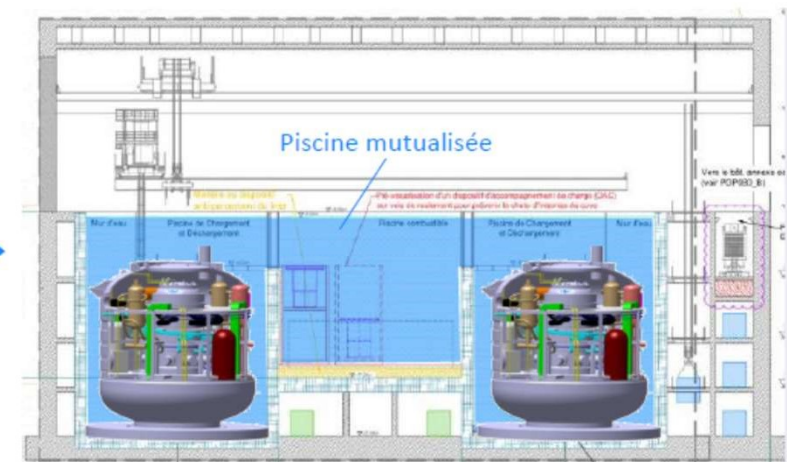
Un réacteur intégré...



...installé dans une enceinte métallique immergée dans un bassin d'eau



... placé dans un îlot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170MWe et une piscine d'entreposage



Une centrale semi-enterrée de 340 MWe comprenant 2 réacteurs intégrés

Offshore wind farms

• Contexte

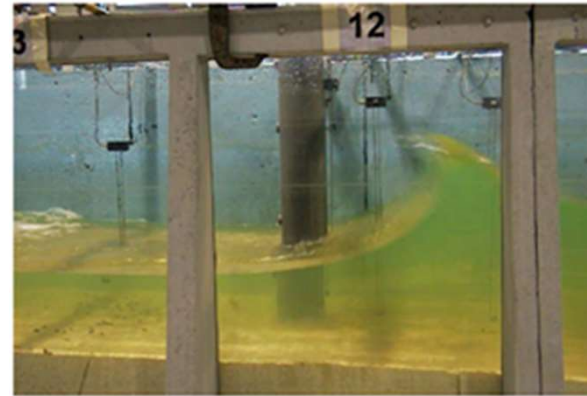
- ✓ Développement de l'éolien en mer en France, appels d'offre posés et flottants prévus dans la PPE (dont 2 fermes flottantes en Méditerranée)
- ✓ Plusieurs projets éoliens en mer à EDF Renouvelables (Posé : Saint-Nazaire, Fécamp, Courceulles, Dunkerque ; Flottant : Provence Grand Large au large de Fos/Mer)

• Enjeux pour EDF

- ✓ Maîtrise des risques techniques sur des technologies innovantes
- ✓ Evaluation des efforts hydrodynamiques, en particulier pour les effets non-linéaires
- ✓ Evaluation des efforts aérodynamiques, sur une turbine en mouvement

• Projet R&D concerné et collaborations/partenariats

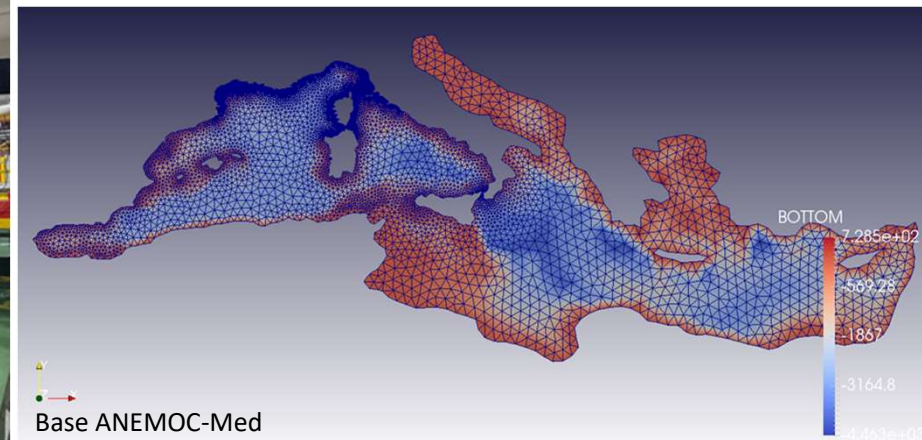
- ✓ Projet POWER (Profitable Offshore Wind), dédié à l'éolien offshore.
- ✓ Collaboration avec l'Ecole Centrale de Marseille sur l'hydrodynamique et les interactions vagues-structure.
- ✓ Travaux expérimentaux et numériques sur le dimensionnement des éoliennes fixes et flottantes.
- ✓ Ré-analyse des états de mer, base ANEMOC
- ✓ Collaboration avec France Energies Marines, Divers projets européens (Flagship, HIPERWIND)



Bassins d'essai EDF - Chatou



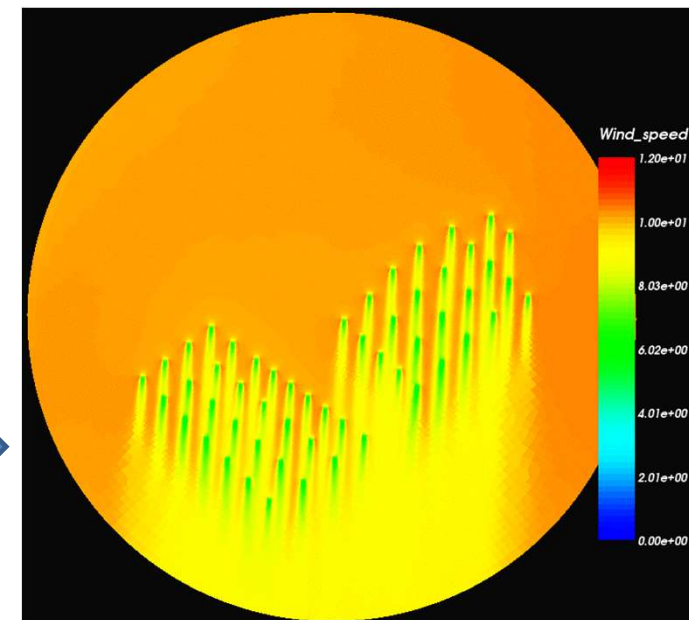
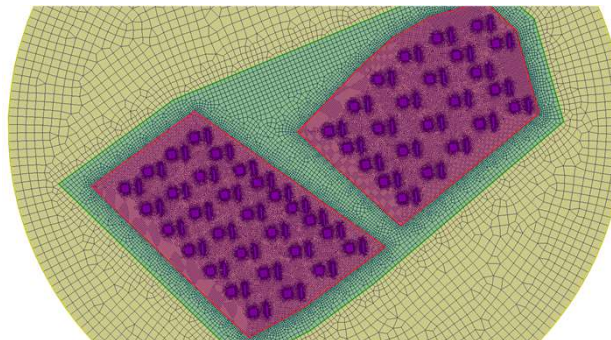
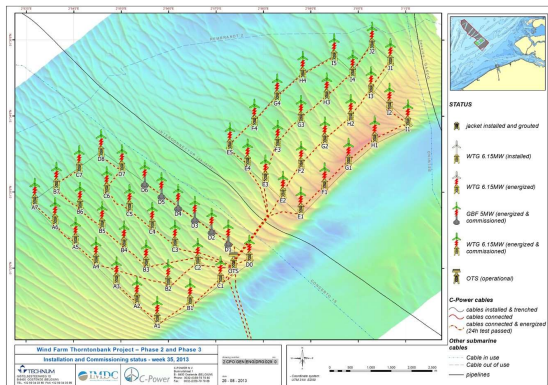
Simulation Numérique des éoliennes flottantes



Development of a multi-scale modeling of the output of a wind farm

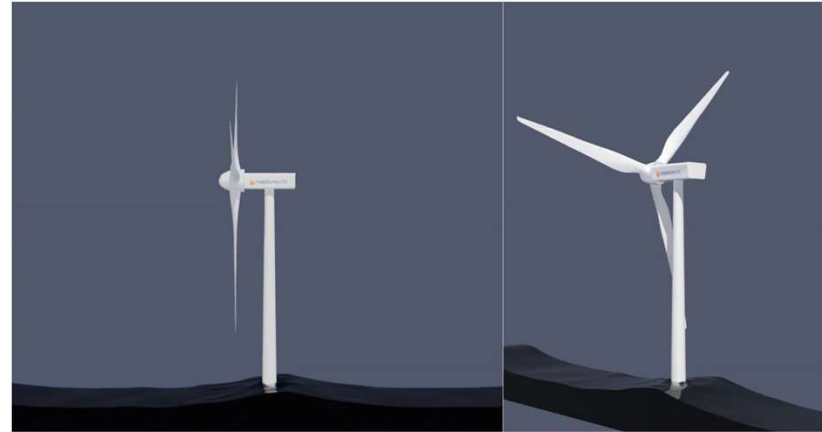
- Modélisation du productible brut (hors sillages) avec un modèle météo à échelle régionale (WRF)
- Modélisation des effets de sillage avec un code de CFD (code_saturne) imbriqué avec le modèle météo
- Nécessité de simuler un ensemble de conditions météorologiques représentatif de la durée de vie d'un parc (~ 20 ans)
 - ✓ Sélection de ces situations avec une méthode de classification
 - ✓ Plusieurs centaines de calculs CFD à réaliser avec un maillage > 10 millions de mailles

Vitesse du vent à hauteur de moyeu modélisée pour une ferme offshore pour différentes directions du vent



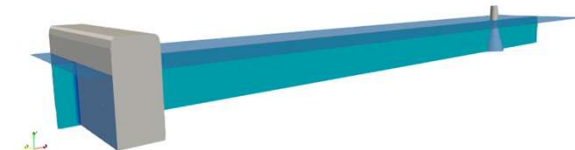
Other CFD applications for offshore wind energy

- **Développement et études pour l'éolien offshore**
 - **Projet Fécamp** : Modélisation en cas de tempête de l'écoulement au sein d'une fondation gravitaire ainsi que de l'agitation sédimentaire.
 - **Eolien flottant** : mise en place d'un outil de 2nd niveau de précision utilisant neptune_cfd pour les études fines (tempête ou maintenance). Validation et mise en place du modèle sur des cas de la littérature.
 - **Affouillement** : modélisation du transport sédimentaire au voisinage d'une structure offshore. Les protections anti affouillement représente actuellement un coût non négligeable des parcs offshore.
 - **Modélisation de la houle** : des travaux vise à améliorer et valider la modélisation de houle régulière/irrégulière avec ou sans déferment dans le but d'être le plus réaliste possible.



neptune.cfd

Time: 0.271024



Utilisation du HPC :
1500 processeurs pendant 5 heures

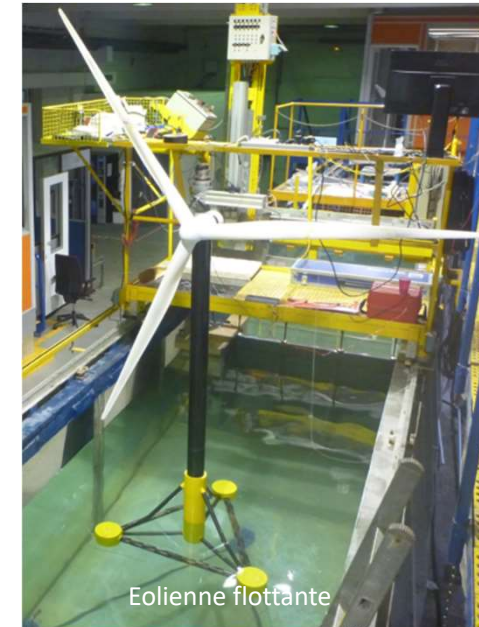
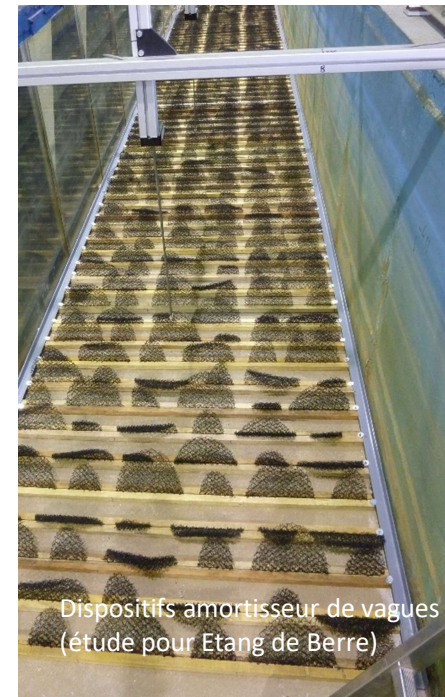
Fluid mechanics of free surface flows – Physical modelling

• Contexte

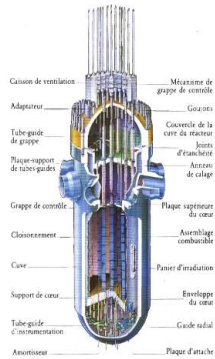
- ✓ Les essais sur modèles physiques permettent de reproduire le comportement d'un ouvrage dans un environnement contrôlé.
- ✓ Ils sont incontournables lorsqu'il s'agit d'aller sur des domaines où les modèles analytiques et numériques ne sont pas validés.
- ✓ Les modèles physiques permettent de valider le périmètre d'applicabilité des modèles analytiques et numériques, et contribuent à les étendre en améliorant notre connaissance des phénomènes physiques.

• Enjeux pour EDF

- ✓ Sécurité du parc de production hydraulique et nucléaire,
- ✓ Performance des ouvrages (nucléaire, hydraulique, éolien flottant)
- ✓ Maîtrise des impacts environnementaux.



CUVE DU RÉACTEUR



m^3
40 ans

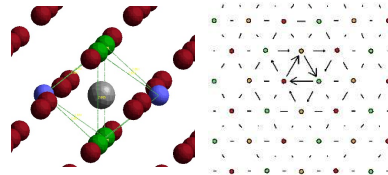
$1nm^3$

0 - ps

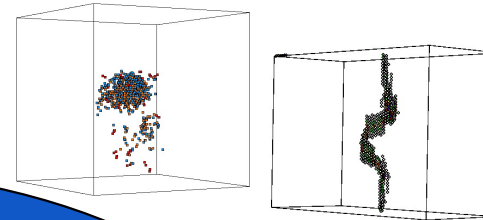
$(10-30nm)^3$

ns

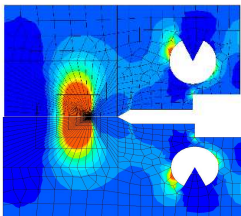
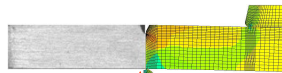
ab initio



Dynamique moléculaire

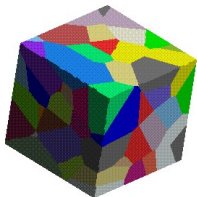


Eléments finis

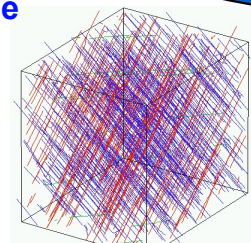


cm^3

Micro-macro-mécanique

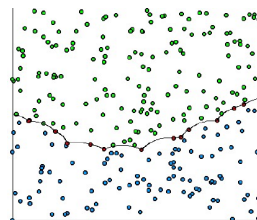
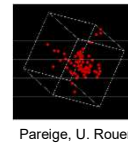
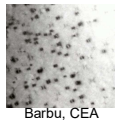


μm^3



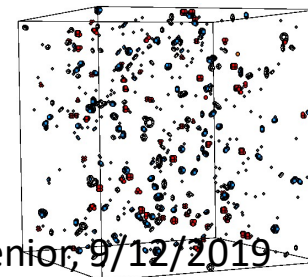
Dynamique des dislocations

Modélisation multi-échelles



Mésoscopique

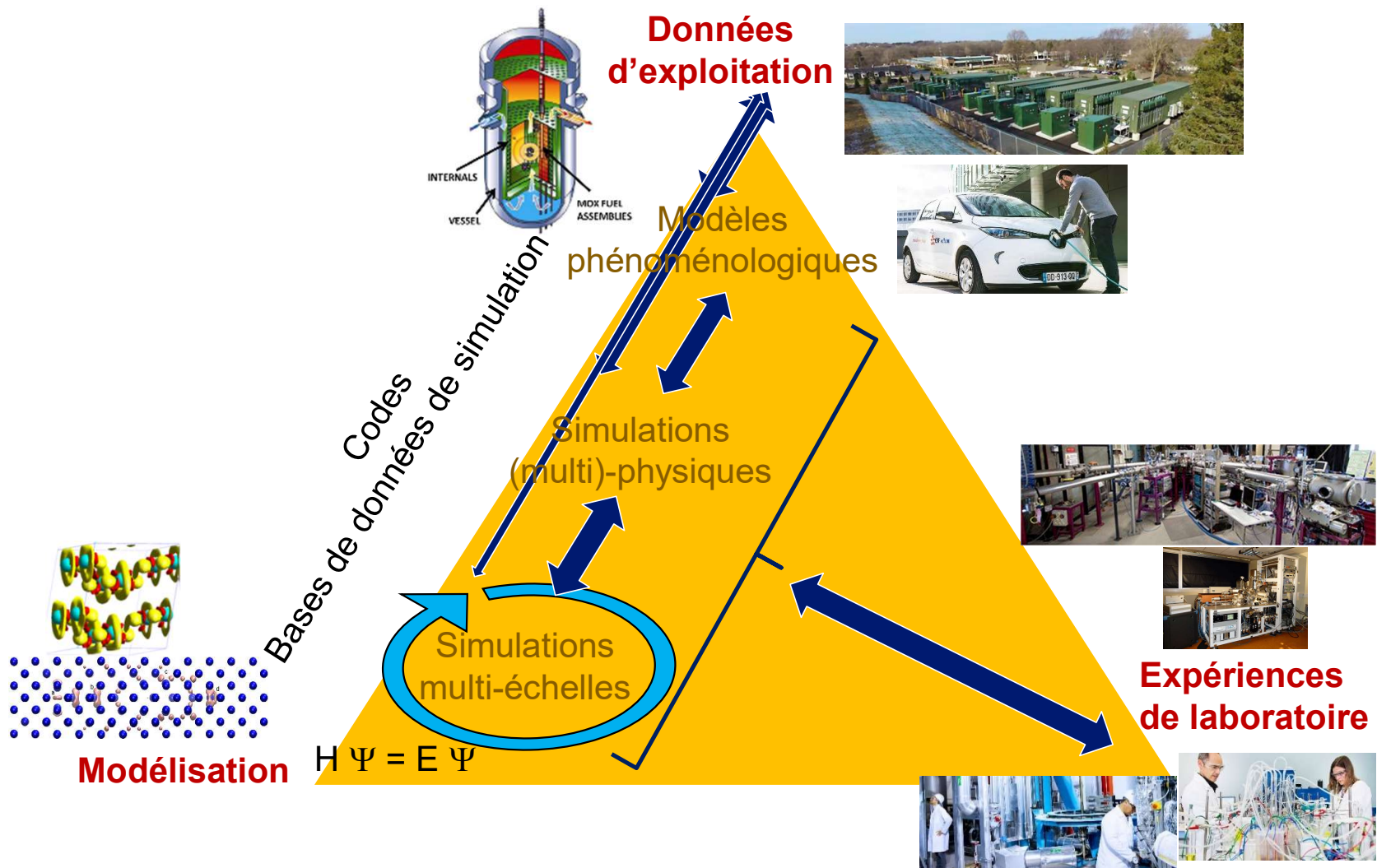
Monte Carlo cinétique



$(30-100nm)^3$

h-année

s - h



Approche "ICME : Integrated Computational Materials Engineering"

LE VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX DES ENR

Contexte / enjeux

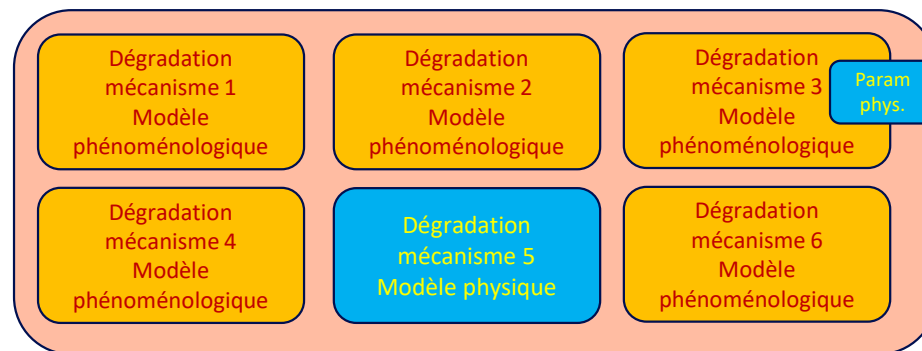
- Déterminer l'évolution des performances des batteries / panneaux photovoltaïques / piles à combustible
- Secteur en évolution rapide : matériaux / technologies

Modèles actuellement développés :

- Modèles phénoménologiques du système
 - Détermination des différents modes de dégradation
 - Ajustement de loi empiriques à base physique ou statistique

Objectif :

- Apporter des briques à base physique / physico-chimique

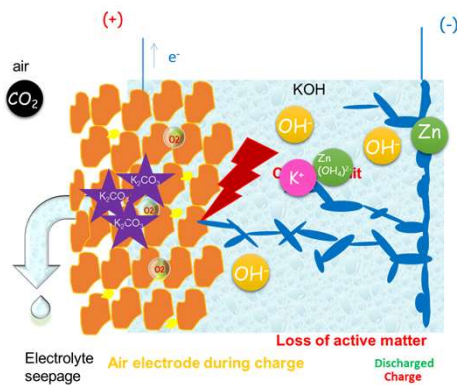


LE VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX DES ENR

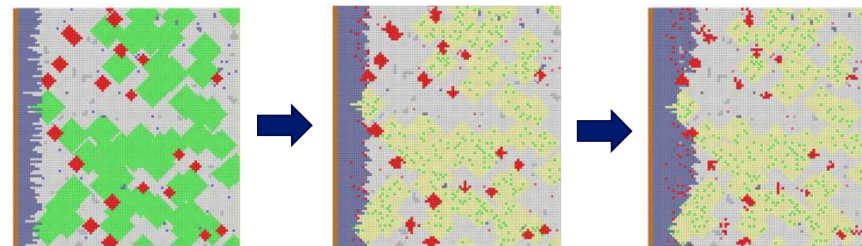
Enjeux/objectifs :

- Evolution de l'électrode de Zn des batteries Zn-air
 - Formation de dendrites

Résultats : Premier modèle d'une électrode de Zn de batterie Zn-air



Développement d'un modèle mésoscopique (automates cellulaires)

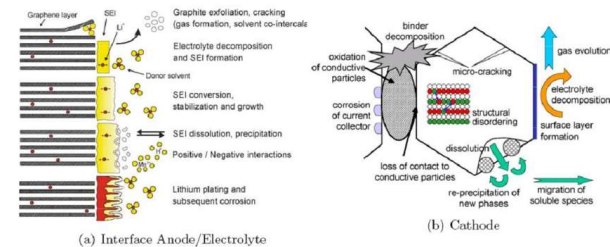


Perspectives :

- Vieillessement des batteries Li-ion

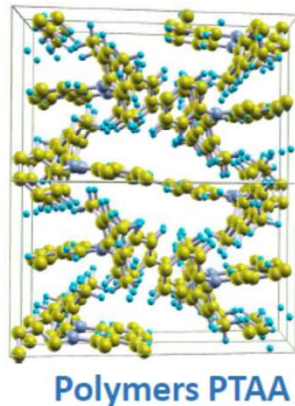
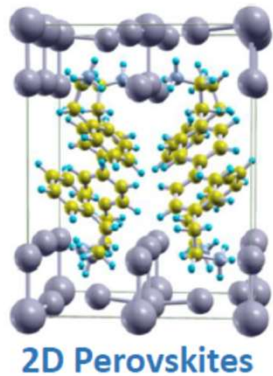
Valorisation :

- Contribution au vieillissement des matériaux
 - Prédiction de l'évolution en fonction du cyclage
 - Exploitation des vieillissements accélérés / « stress tests »

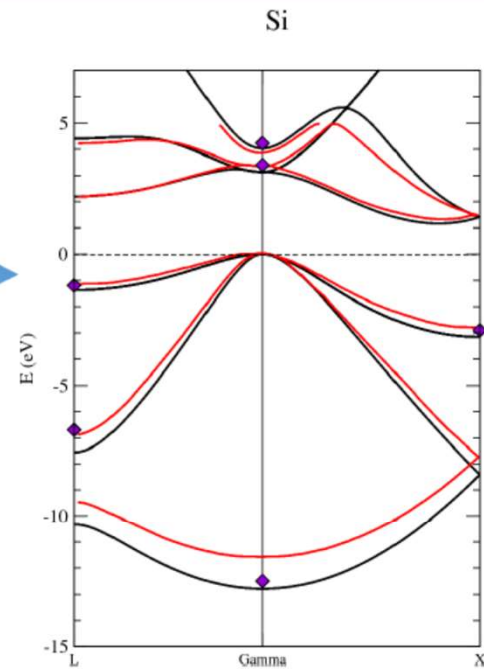


LE VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX DES ENR

Development simple models
of complex materials

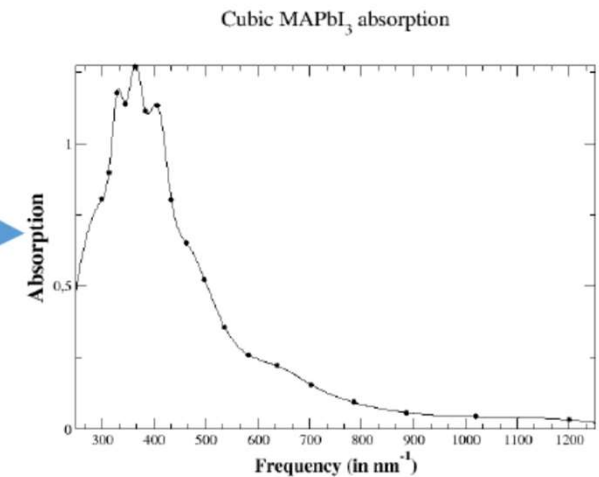


Study of the electronic and dynamical
properties of bulk materials and
interfaces



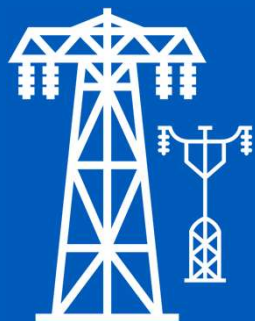
--- Hybrid
--- GW + spin coupling [3]
◆ Exp. [4]

Determination of the properties of
interest for photovoltaic



Application to:

- Band alignment at the interfaces
- Work function
- Electronic affinity
- Surfaces and interfaces stability



AXIS 3

INVENTING TOMORROW'S ENERGY SYSTEMS

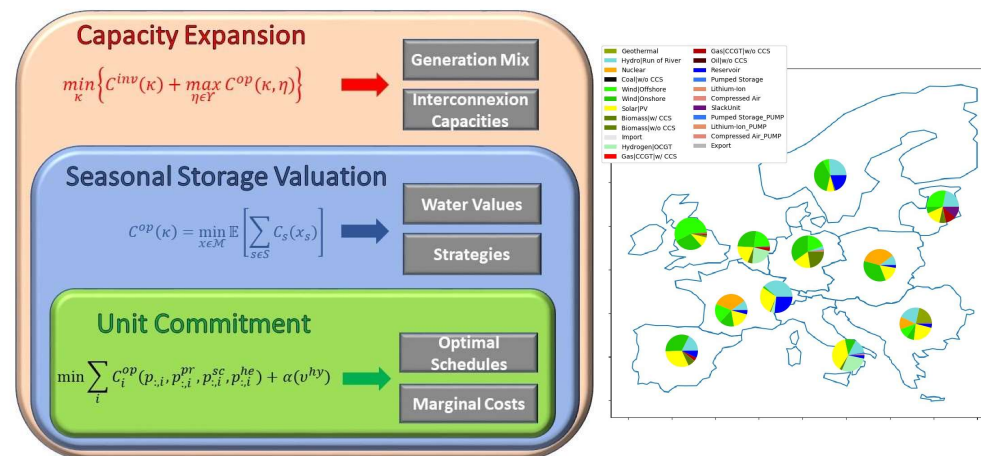
- Energy transition and societal transformation
- Electricity markets
- Robust and flexible power system
- Electric grids of the future



Studies for the transition of the European electricity system Etudes pour la transition du système électrique européen

Une toolbox implémentée via le Programme Gaspard Monge pour l'Optimisation et le projet européen plan4res:

- **La librairie de modélisation SMS++**, pour résoudre des grands problèmes d'optimisation décomposables, intégrant des **méthodes d'optimisation à l'état de l'art**, gérant la **parallélisation et l'utilisation du HPC**, incluse dans un **containeur**.
- La suite de modèles **plan4EU** implémentée avec SMS++, pour **simuler et optimiser le système électrique européen**



Objectif des études:

- Evaluer la **faisabilité et le coût d'un mix électrique** issu de scénarii externes;
- **Valoriser des flexibilités** (usages résidentiels, véhicule électrique....)
- **Optimiser le mix électrique futur** (quels investissements en production/réseau/stockage?)

La résolution d'un grand problème stochastique (ex: ~2000 « assets », 8760 pas de temps, 50 scénarii, soit ~1. 10⁹ variables) est possible grâce à l'usage combiné d'une **modélisation adaptée**, des meilleurs **algorithmes d'optimisation**, de techniques de **parallélisation** et de moyens de **calcul de haute performance**





Gestion de la production d'électricité au moyen-terme dans les systèmes électriques insulaires

2 TENDANCES

Azur
Émeraude

9 COUPES

2021 → 2038

5 CENTRES



~20000 SCENARIOS

30 minutes en Moyenne pour résoudre un scénario

- **Sans parallélisation** (traitement séquentiel des scénarios)

Temps de calcul ~ 900 000 heures (1 siècle)



- **Parallélisation sur HPC CRONOS** (traitement parallèle des scénarios sur chaque cœur disponible)



Utilisation de nœuds cn et bm pour le grand challenge : 500 nœuds de 48 cœurs disponibles durant la première phase.

Temps de calcul ~ 37,5 heures



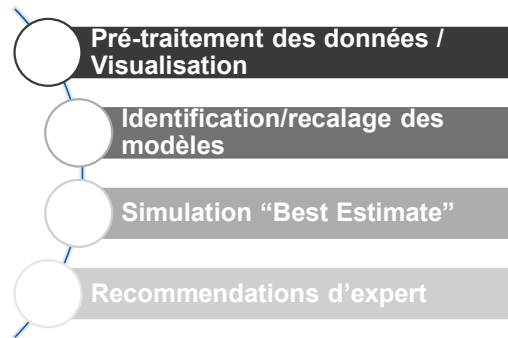
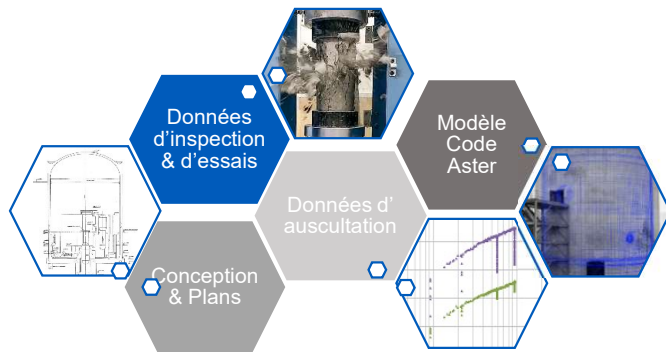
AXIS 4

ACCELERATING DIGITAL TRANSFORMATION

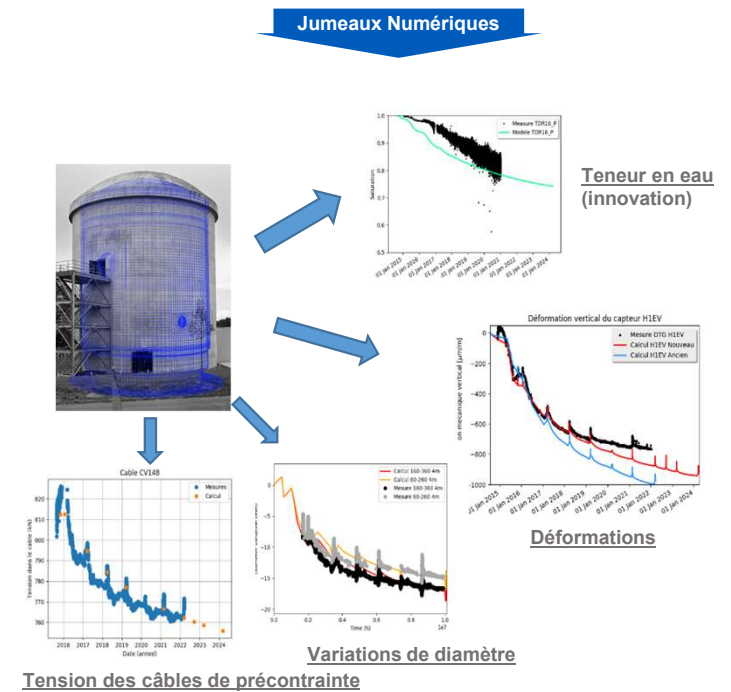
- Simulation ensuring confidence, leveraging real-time data
- Customer relationship and businesses improved by AI and IoT
- Cybersecurity: resilience and crisis management
- Strengthening and capitalizing on technical and organizational skills

Jumeaux Numériques des Enceintes de Confinement

MODELISATION DU VIEILLISSEMENT (maquette VERCORS)



Maquette VERCORS: Enceinte échelle 1/3 type palier 1300MWe- Site EDF lab des Renardières
Vieillessement accéléré « x9 »



Prédiction de la fuite en épreuve (maquette VERCORS échelle 1/3):

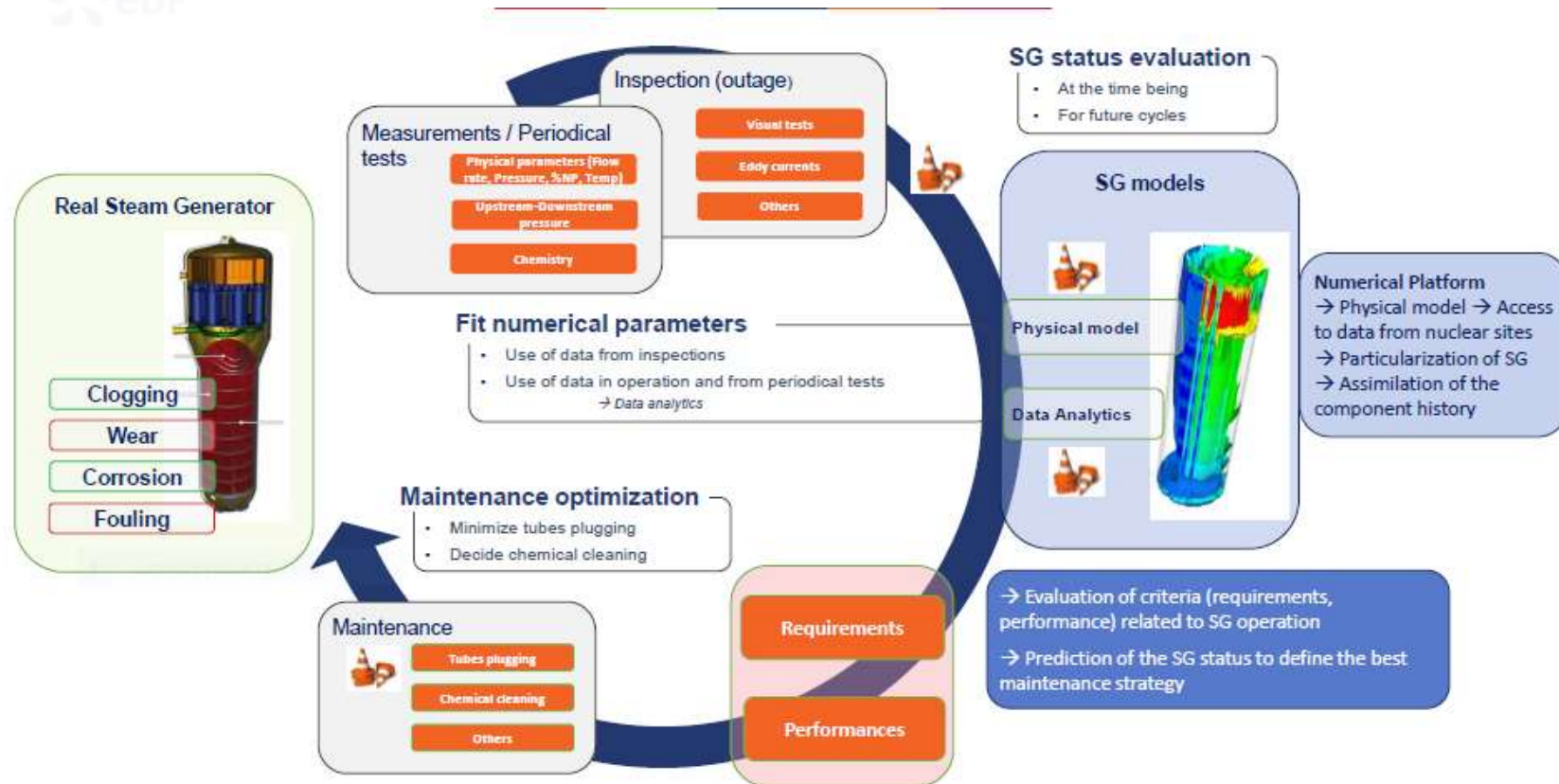
- Prédiction fuite locale : corrélation avec perte de précontrainte
- Prédiction fuite poreuse : recalage de la perméabilité
- fuite totale = fuite locale + fuite poreuse

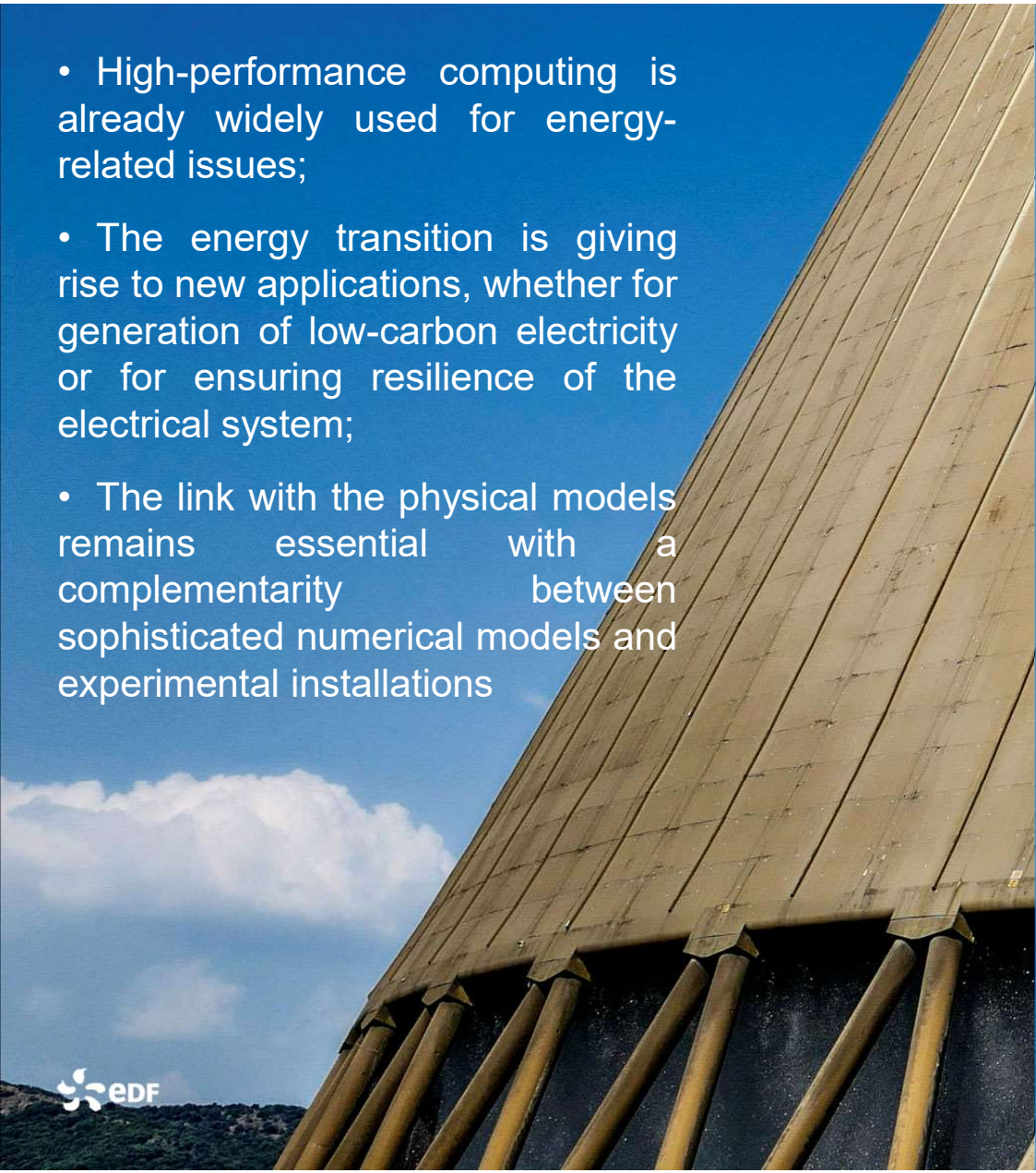


Prédiction du comportement en épreuve des enceintes du parc:

- Modélisation du vieillissement
- Modélisation et optimisation de la maintenance préventive (réduction débit de fuites).

Numerical Twin for nuclear steam generators



- 
- High-performance computing is already widely used for energy-related issues;
 - The energy transition is giving rise to new applications, whether for generation of low-carbon electricity or for ensuring resilience of the electrical system;
 - The link with the physical models remains essential with a complementarity between sophisticated numerical models and experimental installations



As a conclusion En résumé

- Le calcul hautes performances est déjà très largement utilisé pour de problématiques en lien avec l'énergie ;
- La transition énergétique fait émerger de nouvelles applications qu'il s'agisse de la production d'électricité bas carbone ou de la simulation du système électrique en vue d'en assurer la résilience ;
- Le lien avec la physique des phénomènes reste indispensable avec une complémentarité entre les modèles numériques sophistiqués et les installations expérimentales



Merci

www.edf.fr

