

An aerial photograph of a large concrete dam with a reservoir. The water in the reservoir is a vibrant turquoise color. A large, white, stylized lightbulb icon is superimposed over the center of the reservoir. The surrounding landscape is rugged and mountainous, with green vegetation on the slopes.

Journées de l'AUM 2014

Le pluridisciplinaire au service des technologies

Quelques exemples d'études multiphysiques dans le développement des moyens de production d'électricité

Stéphane ANDRIEUX

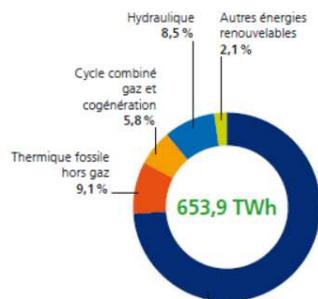
Directeur Scientifique d'EDF R&D



Positionnement d'EDF en matière de production d'électricité dans le monde

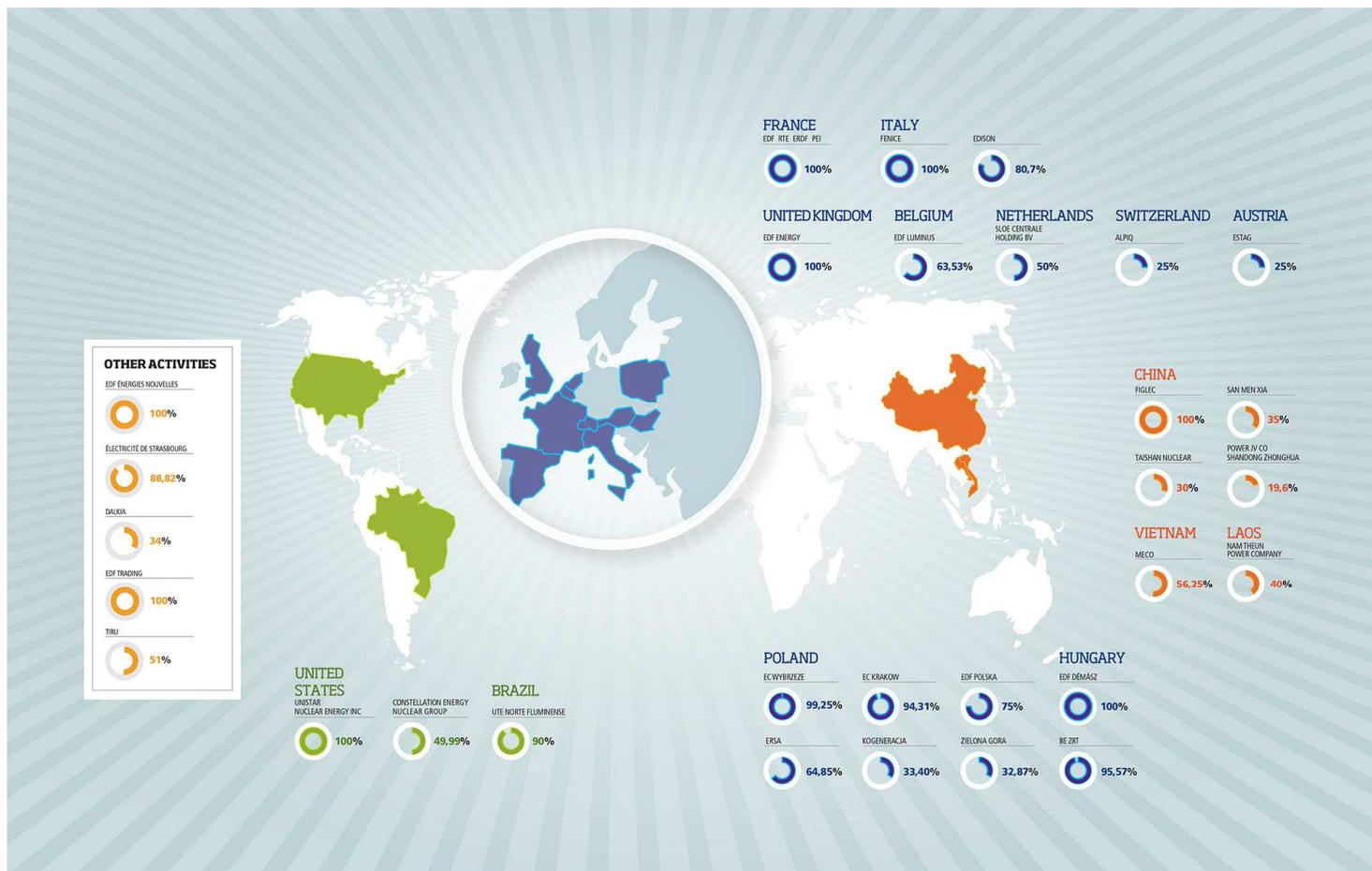
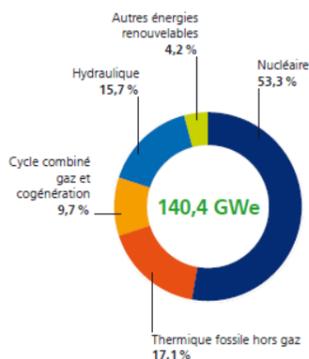
653,9 TWh

PRODUCTION



140,4 GWe

PUISSANCE INSTALLÉE



85,1%

PRODUCTION SANS CO₂

116,3 g de CO₂ par kWh produit (émissions de CO₂ dues à la production d'électricité et de chaleur du groupe EDF).

EDF : Producteur Exploitant & Architecte ensemble

Sûreté, Accidents graves, agressions externes
Vieillessement des matériaux et des structures
Conception et CND : Nouveaux réacteurs et Génération IV,
Small Modular reactors
Démonstration de sûreté, conception pour la gestion de
l'aval du cycle du combustible nucléaire

Nucléaire

Energies marines

Optimisation du placement et
espacement
Conception (houloporteur,
hydroliennes)
Tenue mécanique (LT et
agressions)

Gestion du patrimoine, Vieillessement, agressions
externes (séisme, crues, évacuateur de crues,)
Impact environnemental (passes à poissons,
gestion sédimentaire

Enjeux par filière de production

Hydraulique

Solaire

CSP : dimensionnement du collecteur, du fluide
caloporteur, modélisation du système
PV : prévision du productible

Thermique
classique

Capture et
stockage du CO2
Co-combustion
Biomasse

Off shore : tenue mécanique, conception (structure,
écoulements) (ex structures flottantes, ancrages, ..
Identification des coûts de maintenance
Identification et prévision du productible
Reconnaissance des sols

Eolien

Sur fond d'évolution constante de la réglementation

- ▶ Règles de sûreté, règlement nationaux et européen
- ▶ Emissions et rejets (CO₂, radiologique, chimique, biologique, Nox, acoustique)
- ▶ Qualité de l'eau, continuité des migrations
- ▶ Post Fukushima

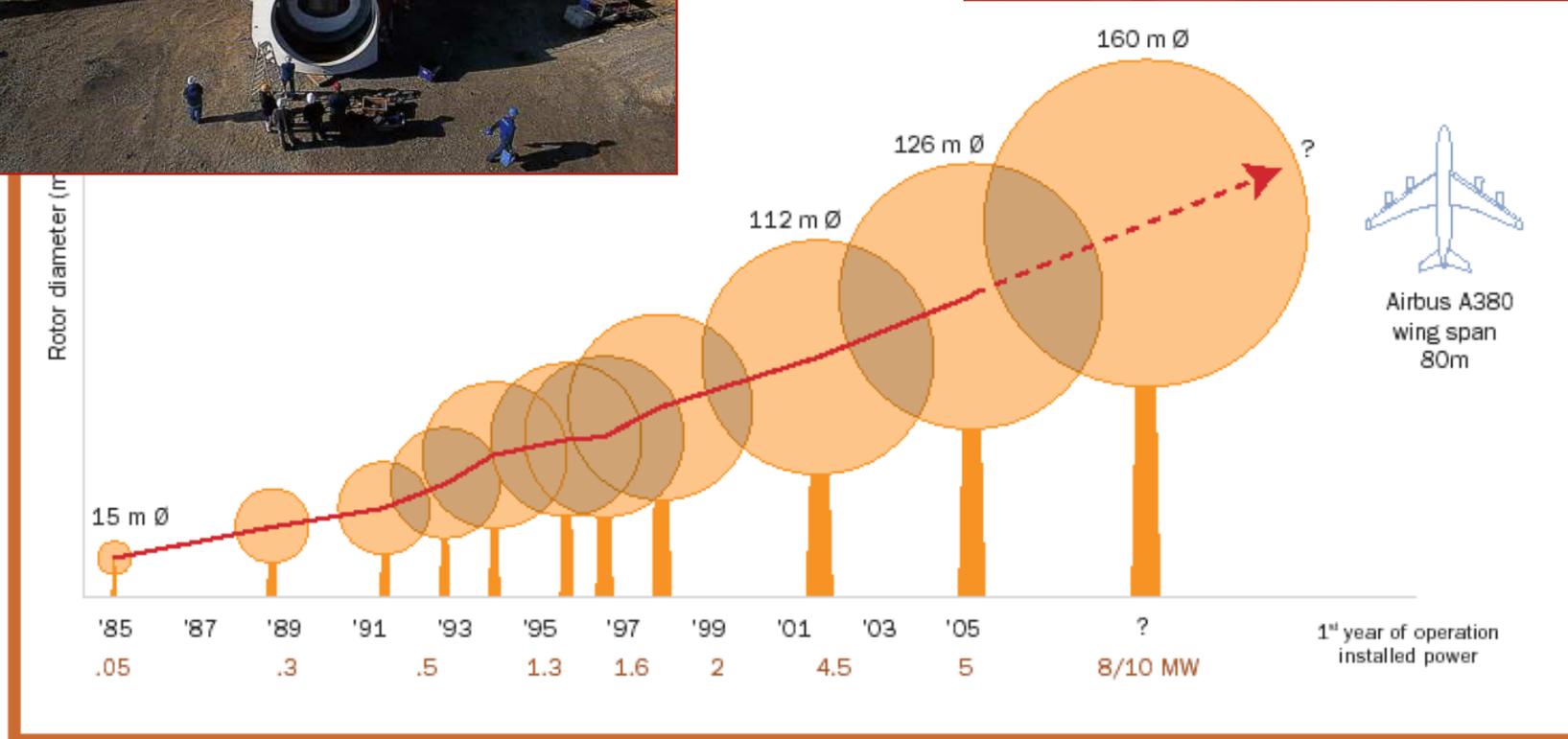
Avec de nécessaires évolutions méthodologiques

- ✓ Prise en compte des incertitudes (pour la quantification des risques)
- ✓ Recalage identification des paramètres et chargements, géométries, problèmes inverses, surveillance et suivi en service
- ✓ Montée des modélisations « atomiques » (dynamique moléculaires méthodes particulières, couplages d'échelles, ABM)
- ✓ Insertion de la simulation dans les systèmes hybrides (modèles, données, humains) : ex villes, smart grids

Mais surtout des exemples

L'éolien terrestre

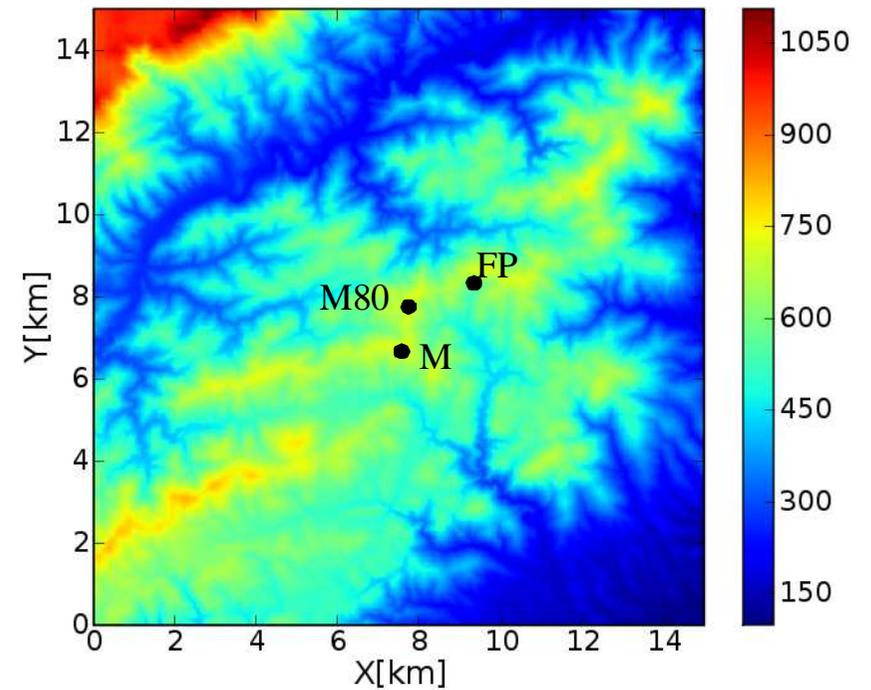
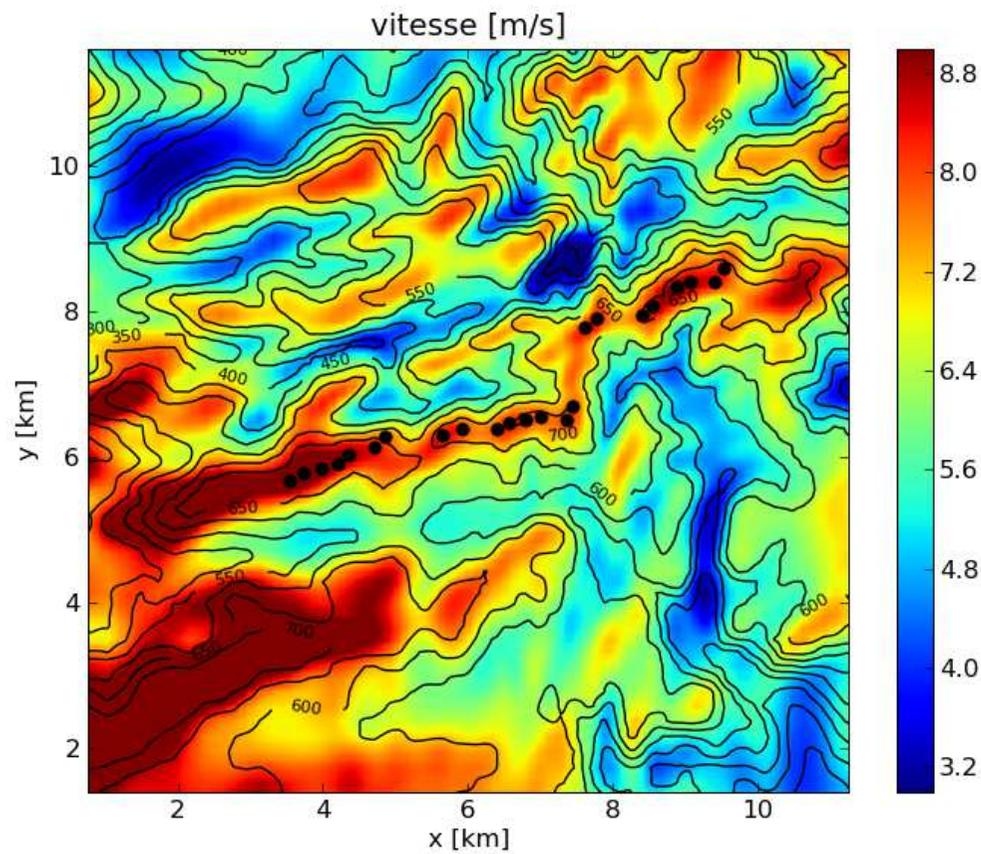
Evolution vers des puissances (et des tailles) très importantes



Source: Jos Beurskens, ECN

Machine 3 MW [Nacelle+ mat + rotor] = 300 t \approx 1 TGV (385t) à 80 m de hauteur

L'éolien terrestre : Prédiction du productible d'un site



Calcul couplé d'écoulements atmosphériques à deux échelles
Assimilation de données (météo et locales)

L'éolien off-shore proche : technologie mature mais des interrogations sur les coûts (construction, maintenance)

Technologie « plantée »

Proche de l'éolien terrestre mais problèmes spécifiques à la mer :

- Fondations, corrosion et tenue aux vents supérieurs,
- Capacités de maintenance (et estimation des coûts),
- Fabrication et installation

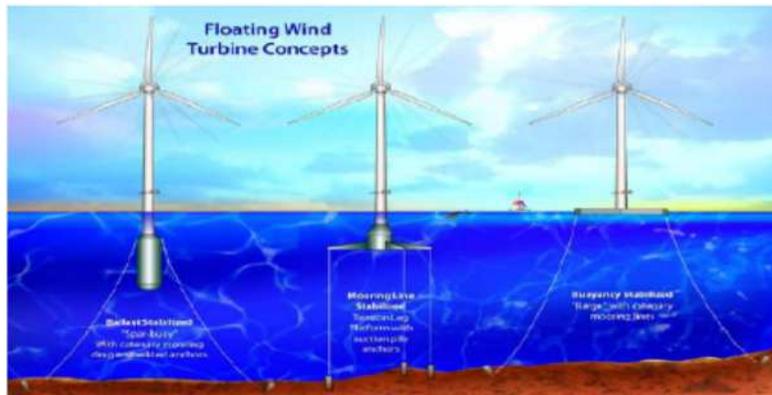
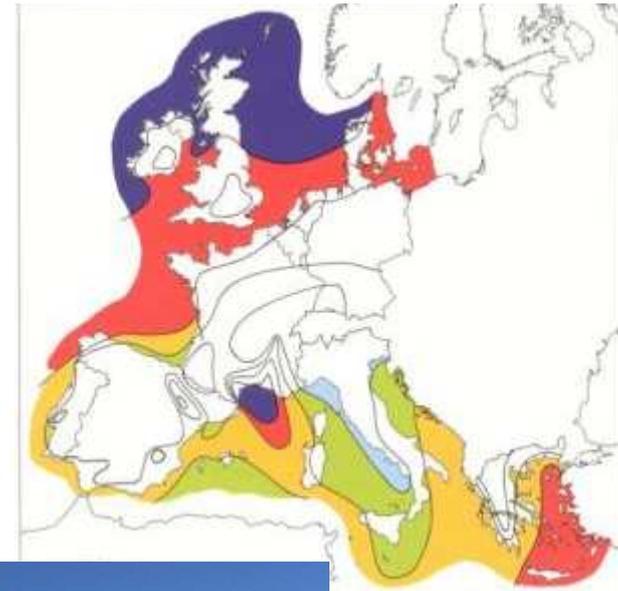


Montage des éoliennes de 2,3MW de Nysted (Danemark) par un navire spécialisé

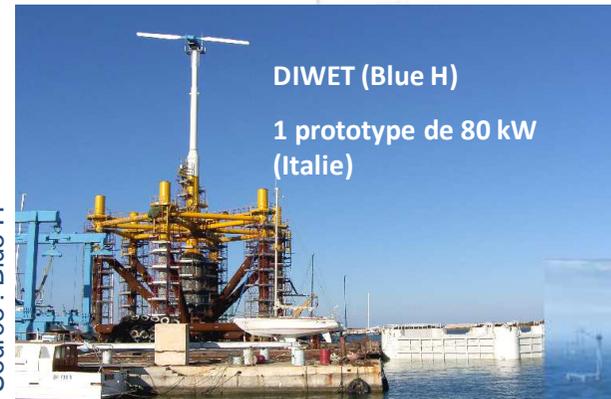
Mise en place du rotor à 80m au dessus de l'eau

L'éolien off-shore lointain : encore en conception

- Tendence à l'éloignement des côtes : Fonds importants incompatible avec les structures fixes
- Pays avec un plateau continental restreint : Norvège, Italie, Espagne, France
- Concepts économiquement et techniquement prometteurs ?



Source : NREL



DIWET (Blue H)
1 prototype de 80 kW (Italie)

Source : Blue H



Hywind (Statoil)
1 prototype de 2,3 MW (Siemens) (Norvège)

9 - EDF



Source : Statoil



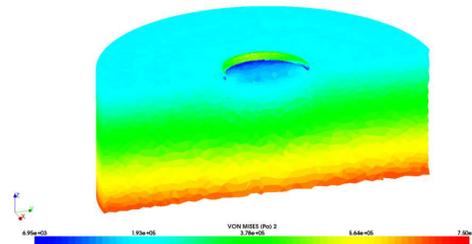
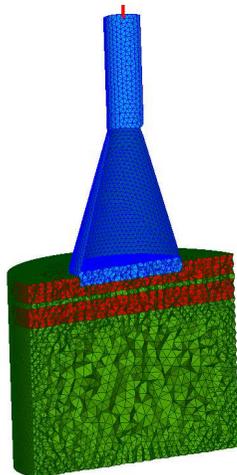
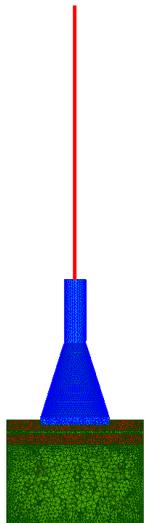
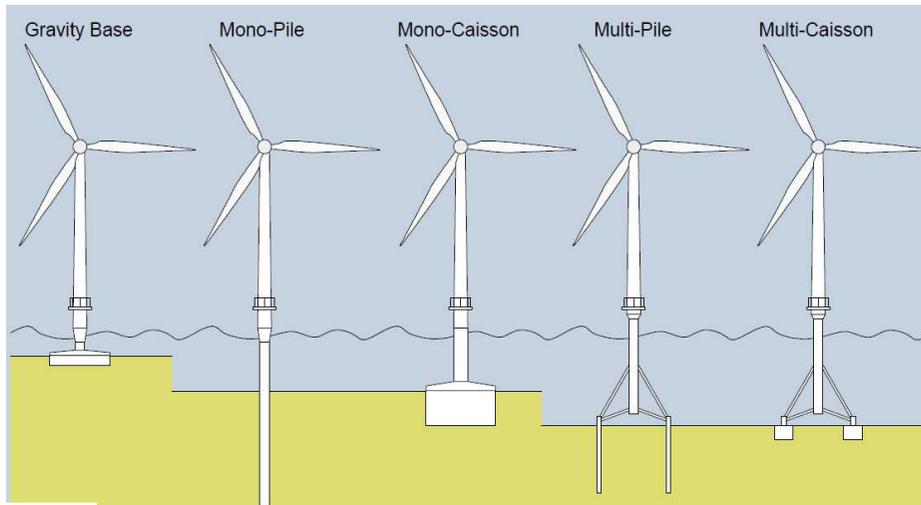
Windfloat (Principle Power)

Prototype 2MW (Vestas) Portugal (déc. 2011)

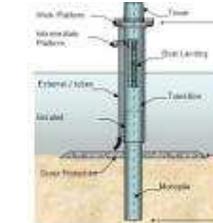
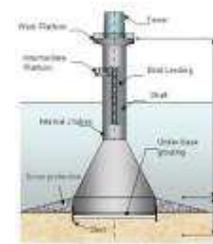
Source : Principle Power

Concevoir les machines et leurs fondations

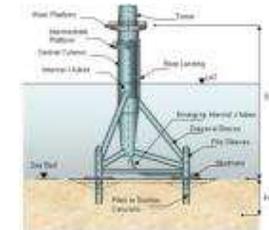
Modélisation des efforts aéro et hydrodynamiques,
Effets d'interaction , effet de la tour ,
Modélisation des sols
Fatigue, foudroiement des pales,



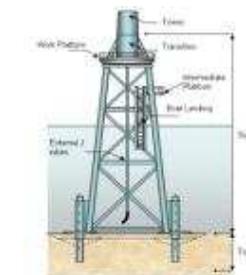
0 m
20 m
30 m
Profondeur
60 m



Monopode gravitaire ou sur pieu



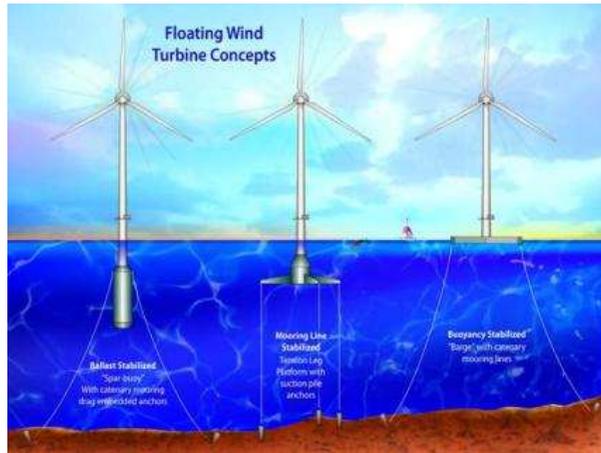
Multipodes sur pieux



Source : EWEA, 2011

Von Mises stress field in the soil, due to gravity, current and wind (initial state)

Ou les machines flottantes



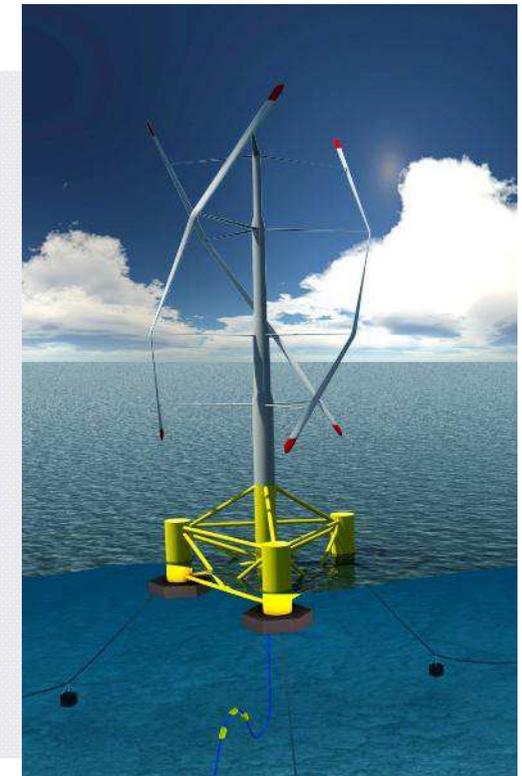
Plus de 20 concepts étudiés dans le monde



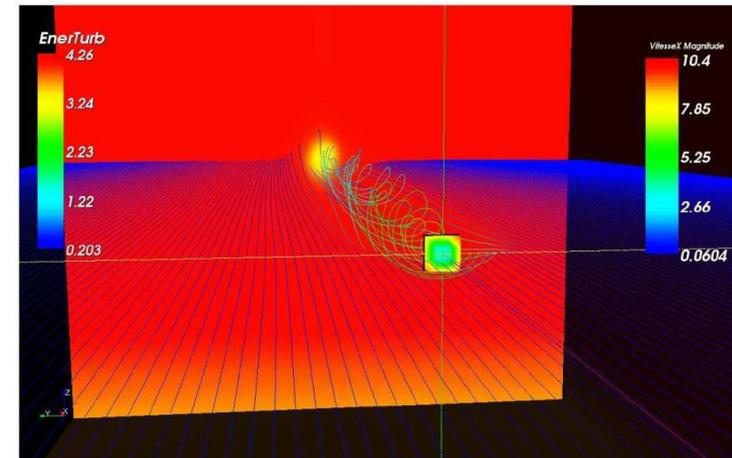
Exemple : Concept Vertiwind à axe vertical

Comportement de la structure

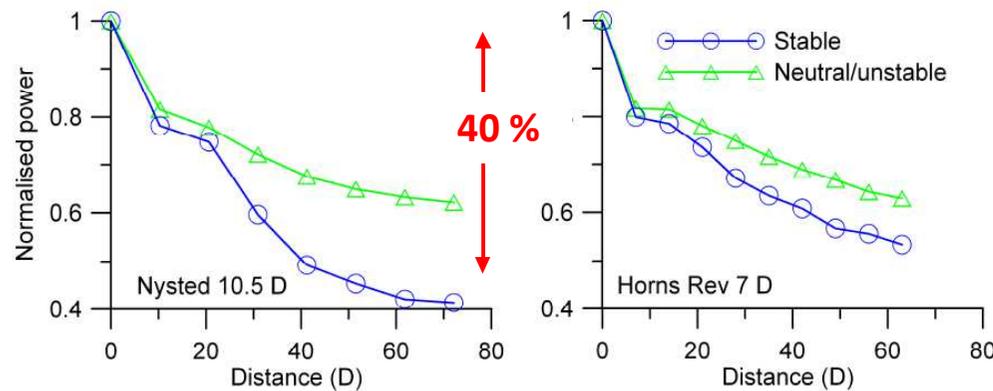
- Modélisation hydro-aéro-élastique, phénomène de flottement, stabilité
- Grands déplacements, dynamique transitoire
- Aéro : Blade Element Momentum Theory
- Hydro : Force de Morisson



Optimiser le placement d'éolienne pour éviter de dégrader le productible

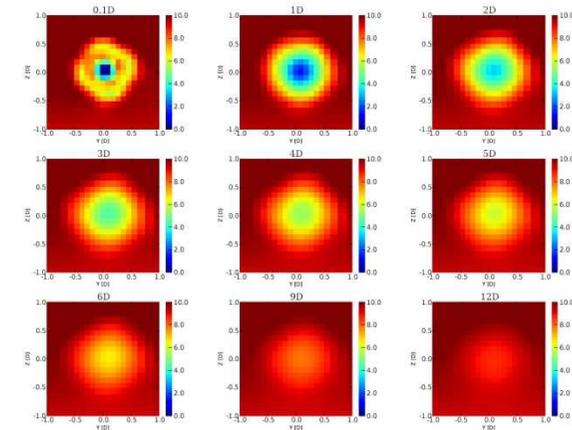


Calculs aérodynamiques d'effets de sillage et de déficit de productible (Code Saturne – EDF)

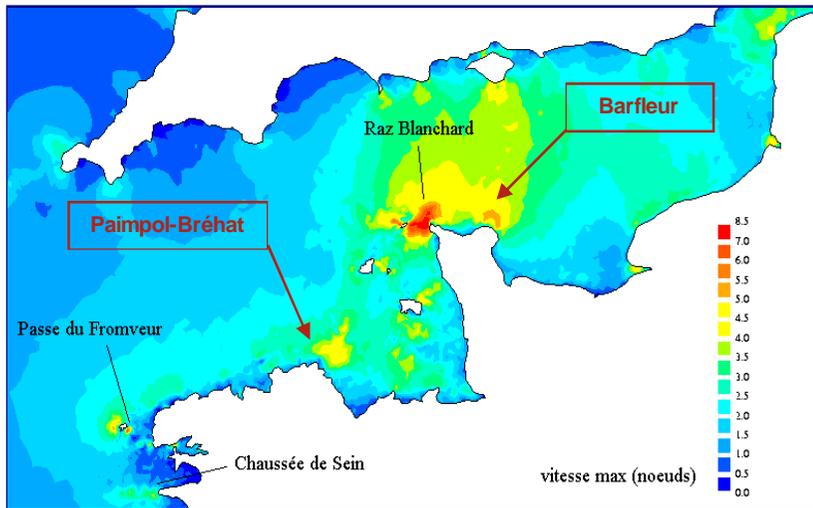


Diminution de la production par rapport à la première machine face au vent dans une ferme fonction des conditions météo

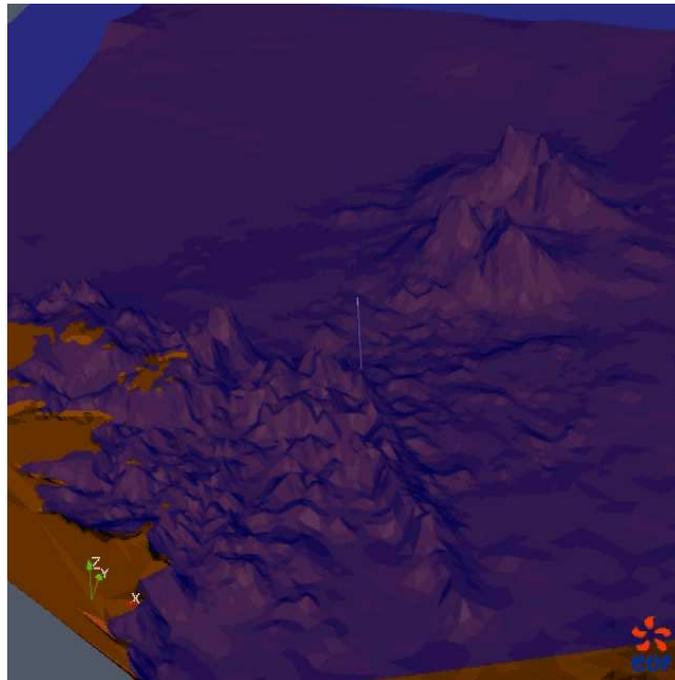
Barthelmie et al. EOW 2007
Hansen et al. WE 2007



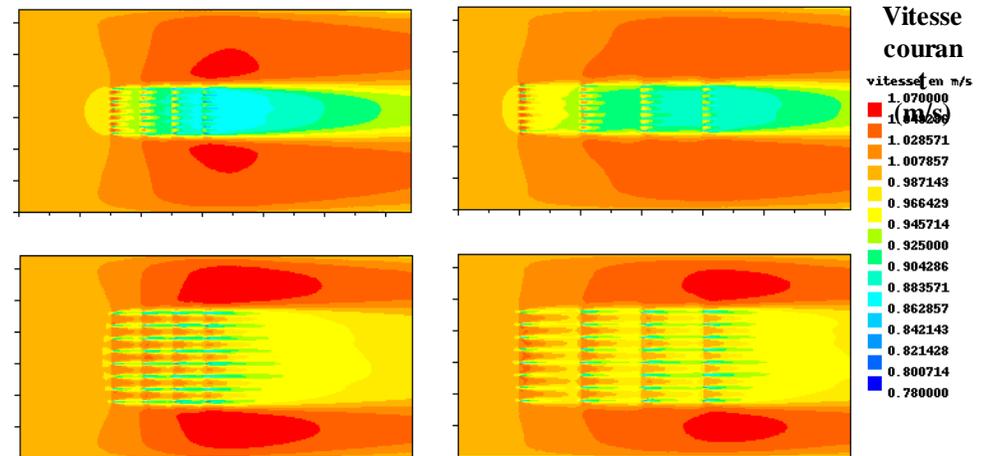
Optimiser le placement d'hydroliennes pour éviter de dégrader le productible



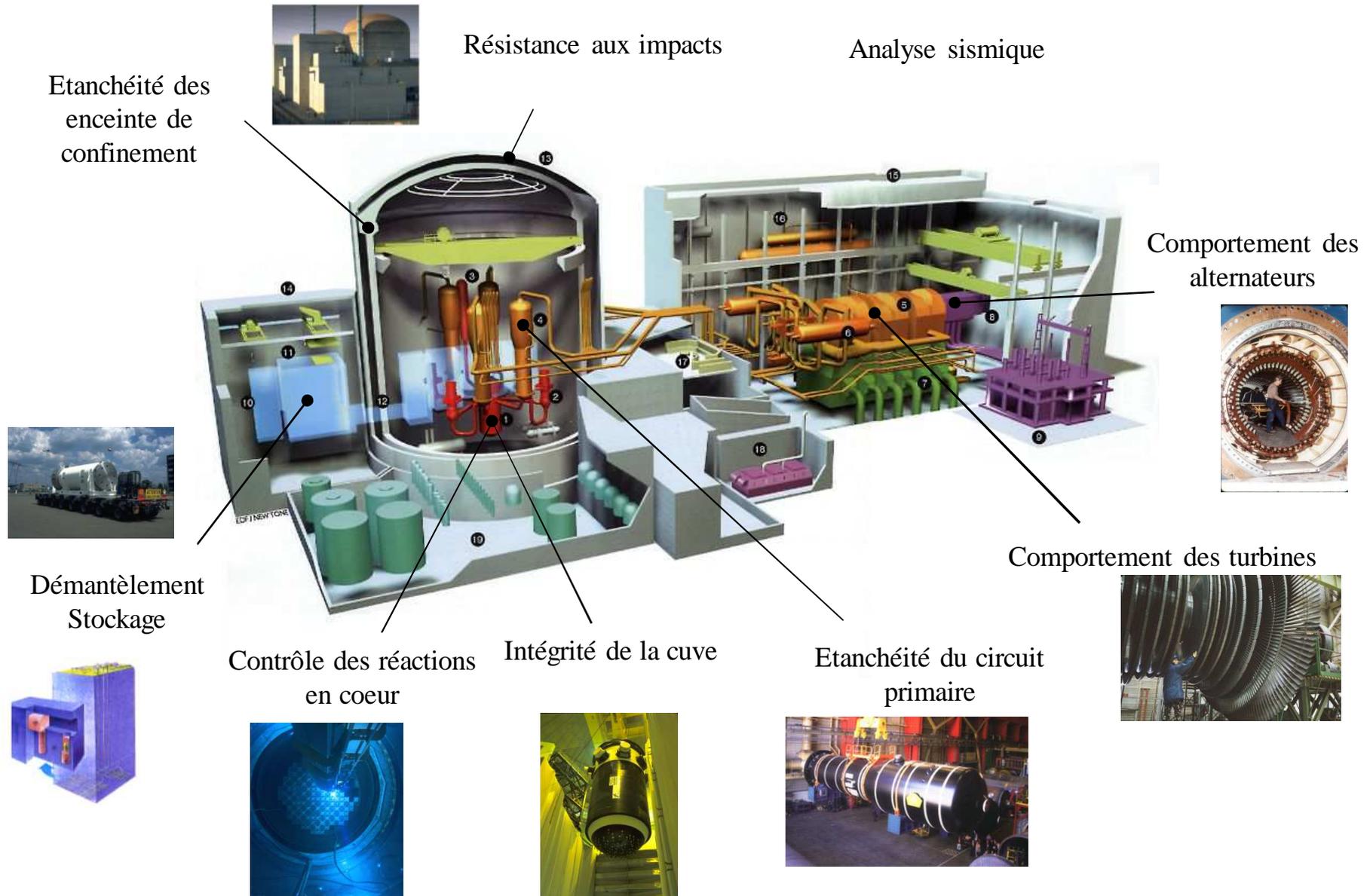
Calcul de courants



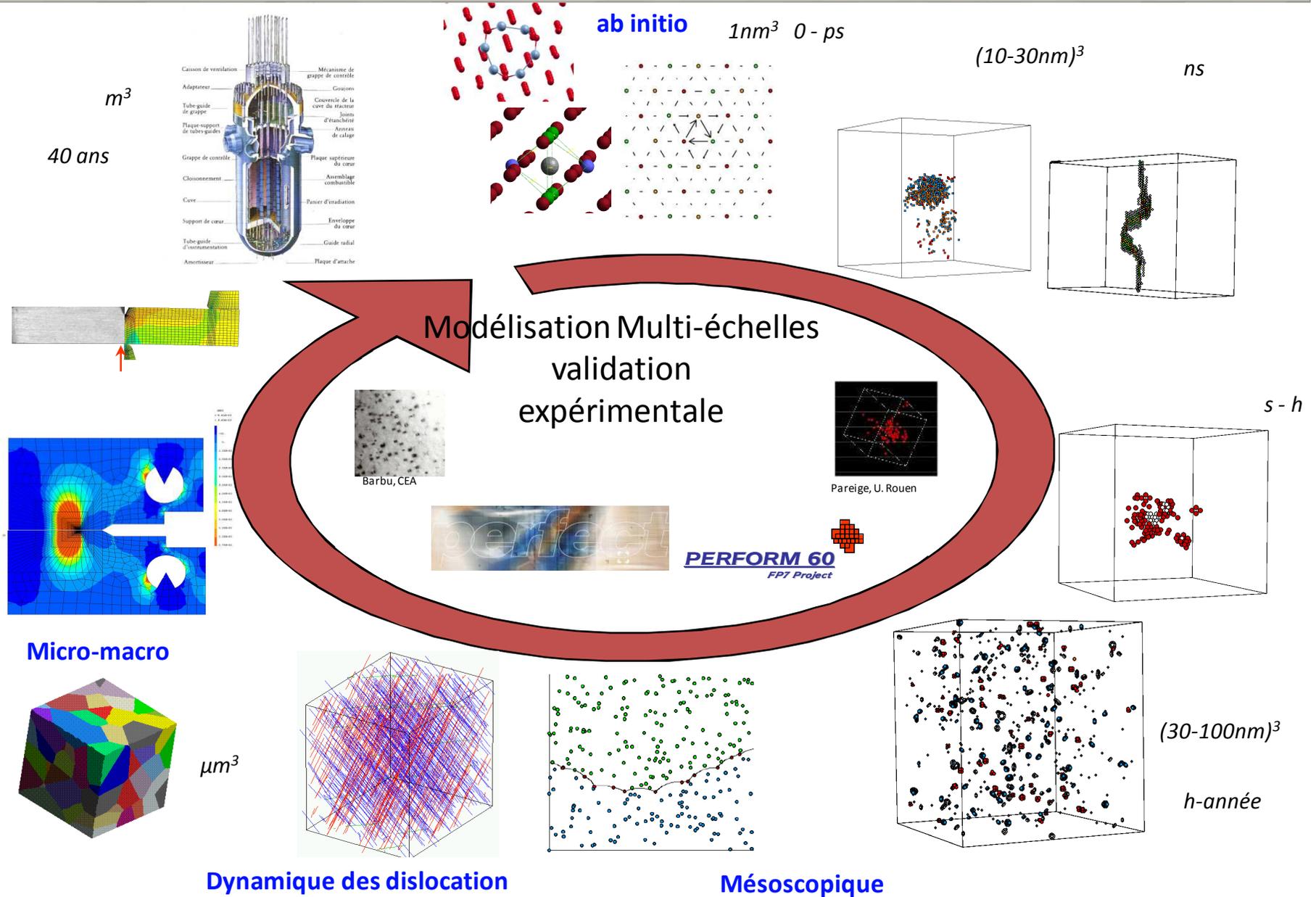
Études hydrodynamique (espacement des hydroliennes)



Le nucléaire : exploiter en sûreté



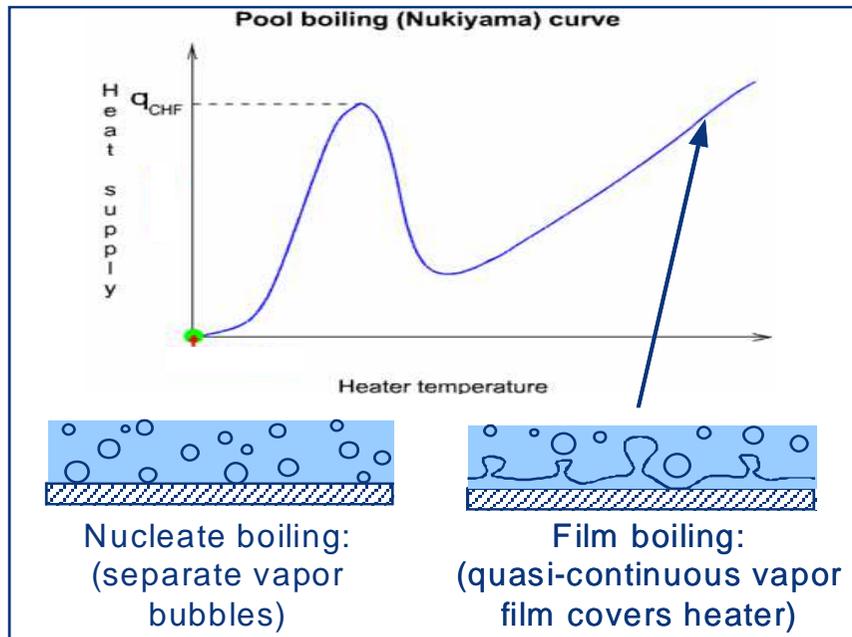
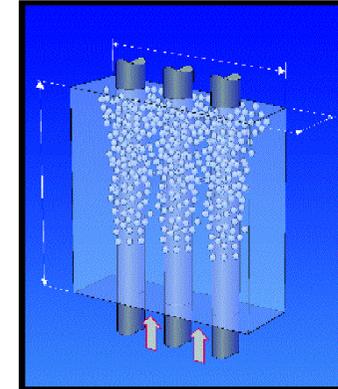
Comprendre le vieillissement sous irradiation pour justifier les prolongations d'exploitation



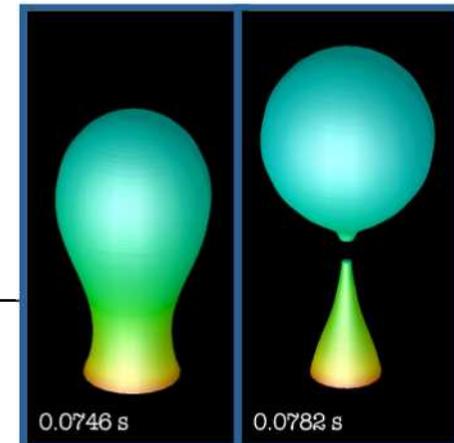
Compréhension et prédiction de la crise d'ébullition



Expérimentation



Simulation Numérique Directe



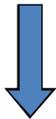
Effect of the boiling crisis on a heated rod

Comportement des enceintes en béton à 60 ans

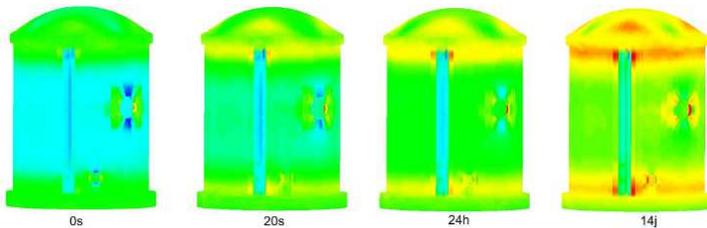
Simulation numérique non linéaire :
endommagement, fluage, hydratation,
séchage, précontrainte, armatures,
ISS...



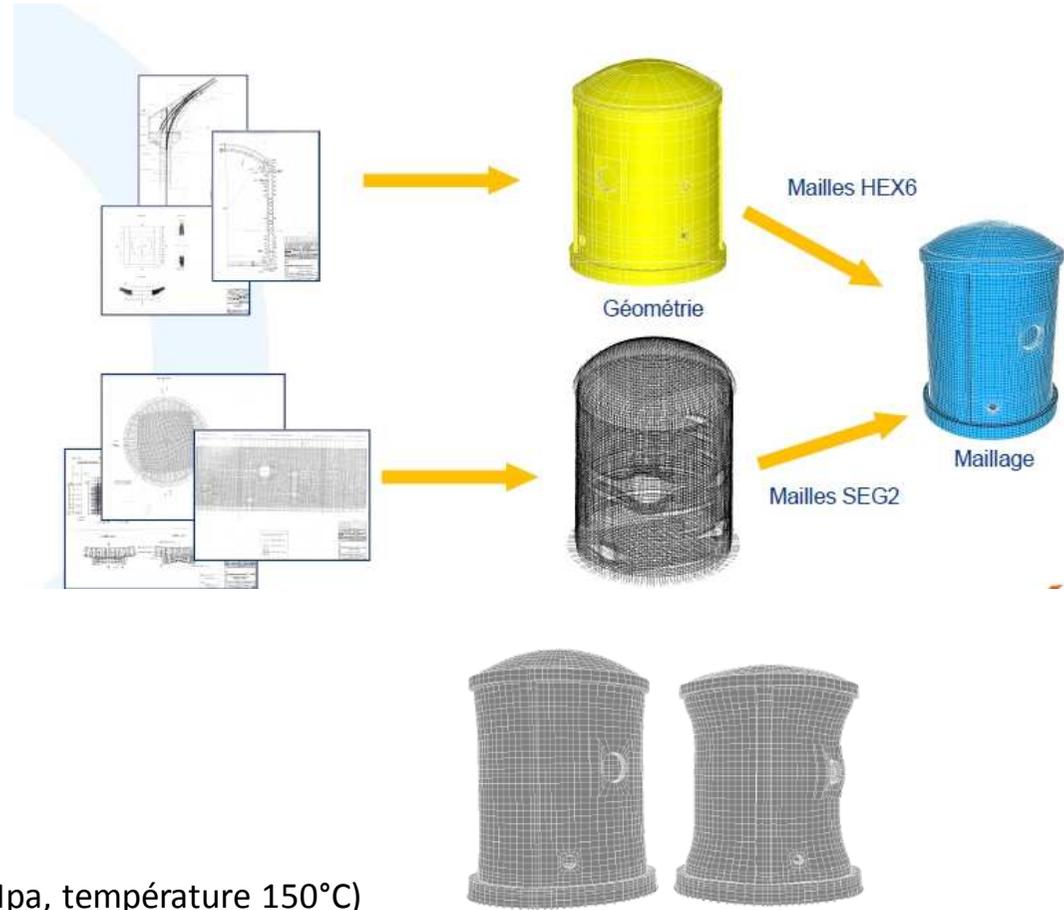
Déformation à 60 ans



Etat de contrainte en AG (pression $\sim 0,5$ Mpa, température 150°C)



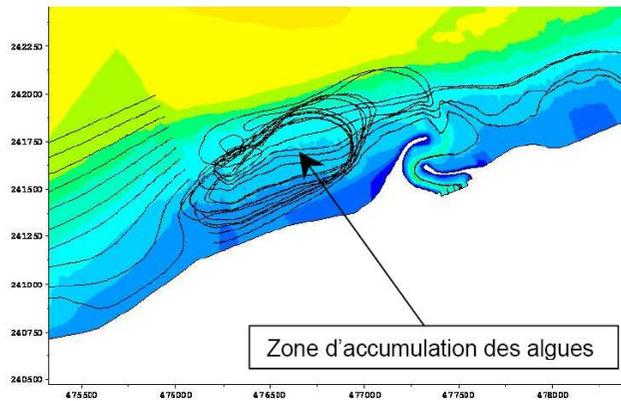
Estimation débit de fuite



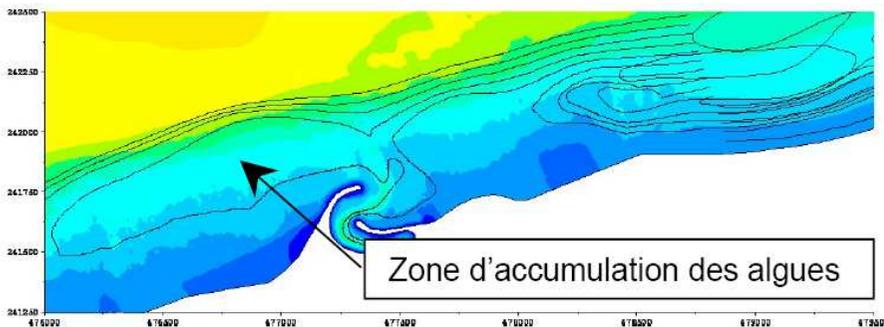
Modélisation hydro-environnementale

Simulation des entrées d'algues vertes dans un chenal de prise d'eau

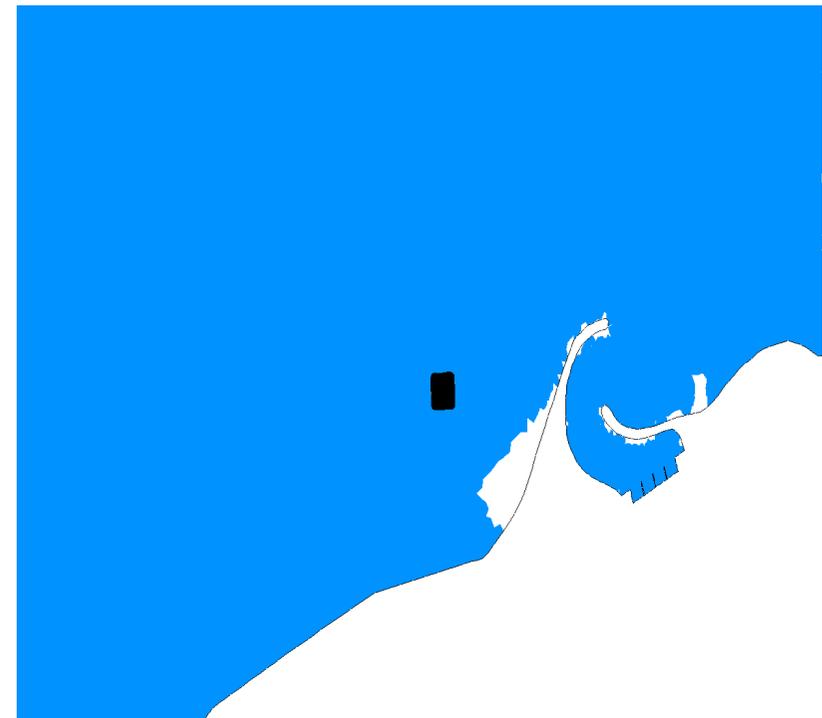
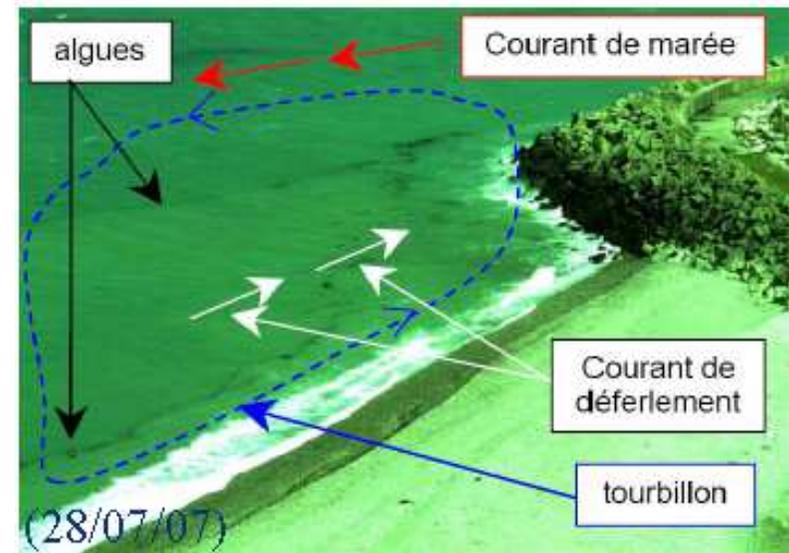
Modèle de transport lagrangien stochastique des



Algues provenant de l'est



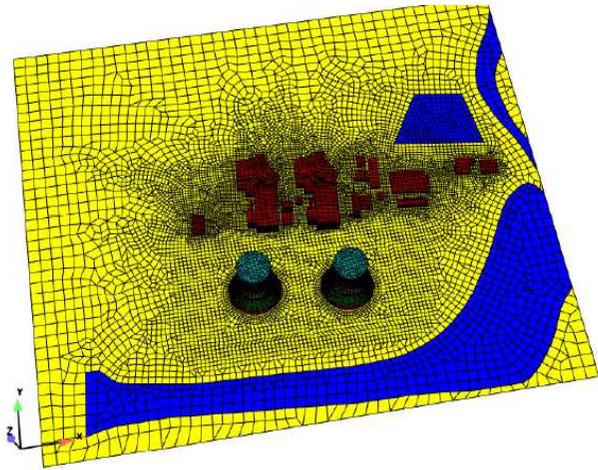
Algues provenant de l'ouest



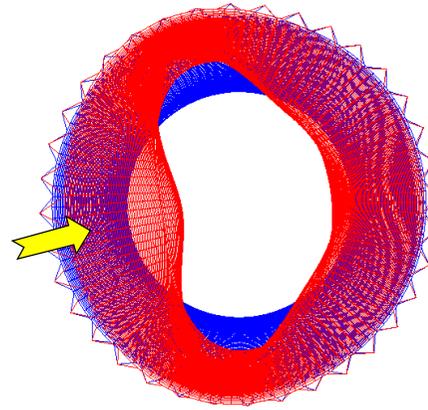
Tenue des aéro-refrigérants aux vents extrêmes

Principe de l'étude :

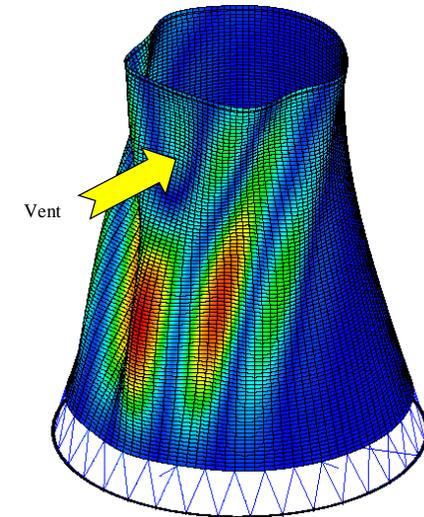
- Instrumentation d'une tour pour évaluer les chargements
- Etude mécanique de la tenue des tours aux vents extrêmes



Calcul du champs de pression lié au vent



Déformation



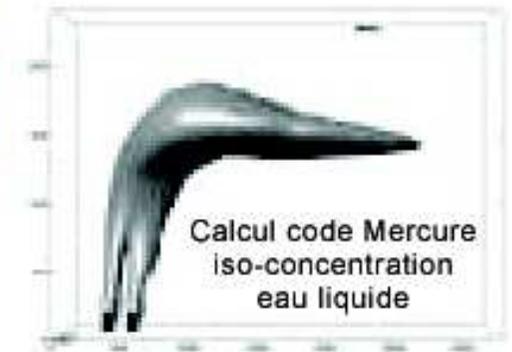
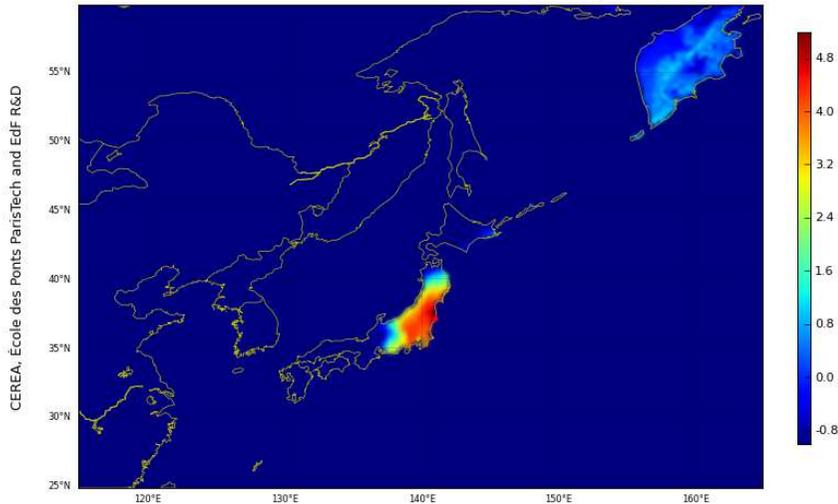
Contraintes

Conclusions :

- pas de risque d'accrochage dynamique
- si la corrosion des armatures est maîtrisée, il n'y a pas de risque de rupture en service
- une méthodologie d'étude est proposée pour le classement des tours selon leur niveau de risque

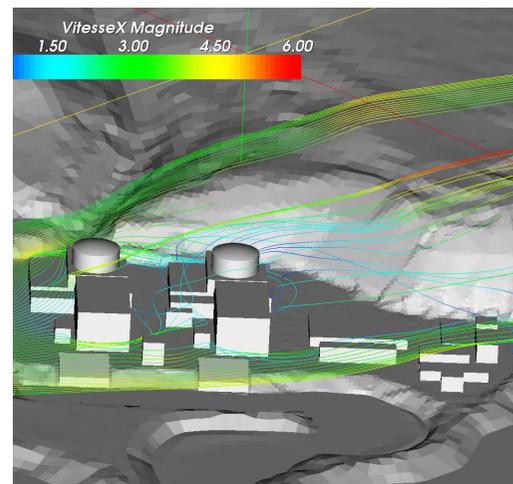
Impact environnemental : Ecoulements atmosphériques

Fukushima-Daiichi, caesium-137, 2011-03-27 00:00:00, base-10 log of total ground deposition ($Bq.m^{-2}$)



Echelle régionale à continentale (> 50 km):

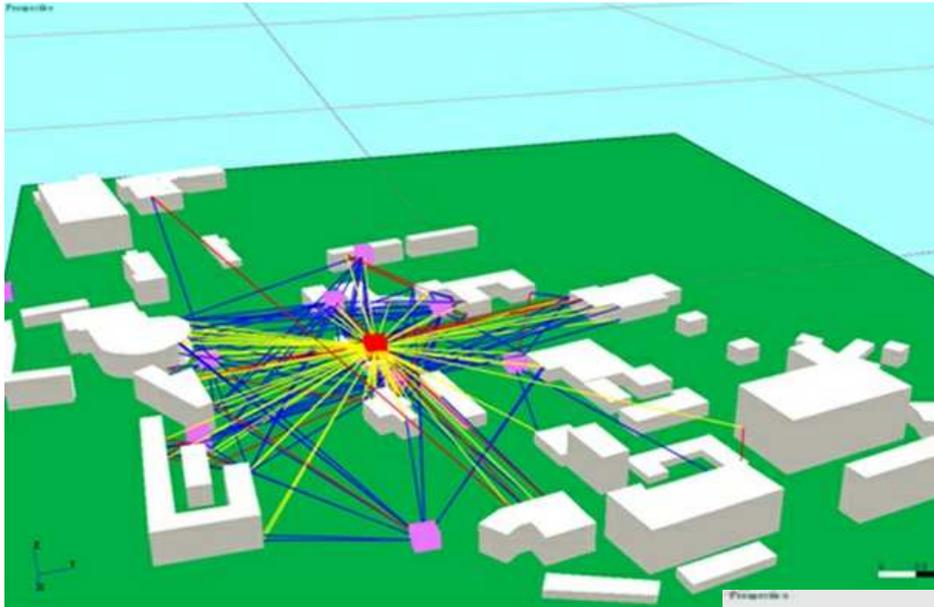
Transport + chimie + dépôts + lessivage , Champs météorologiques
fournies par modèle de grande échelle ou échelle régionale



Échelle locale (< 50 km) :

calcul des champs météo,
dispersion passive (espèces
chimiques et biologiques),
dispersion de gaz lourds

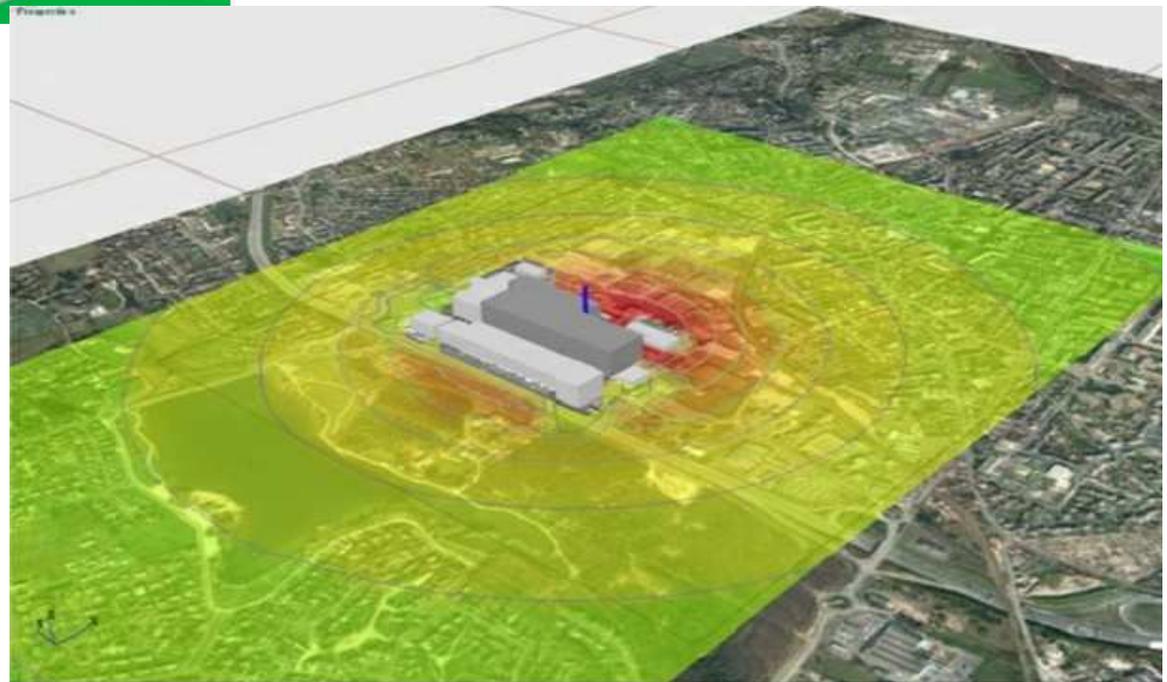
Impact environnemental : Acoustique



Réglementation, (max, moyenne sur l'année, ...)
Influence des surfaces réfléchissantes ou absorbantes, et de la météo

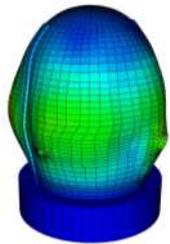
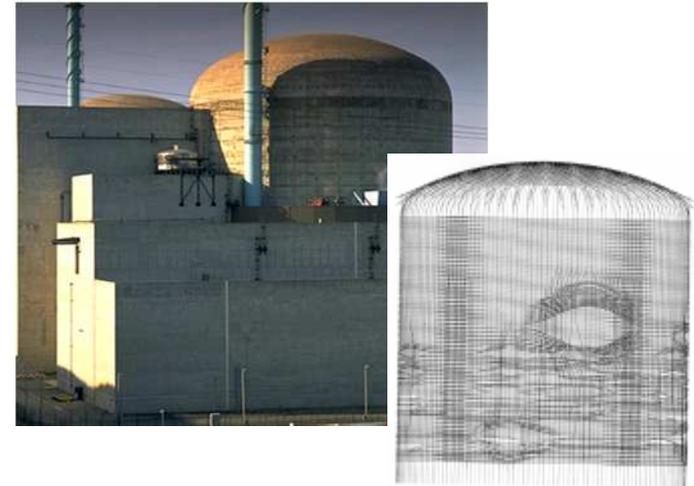
Modélisation par lancer de rayon des impacts sonore d'une source industrielle

Etude sur site industriel urbain



Développement de modélisations liées à l'expérimentation sur structures réelles à échelle réduite

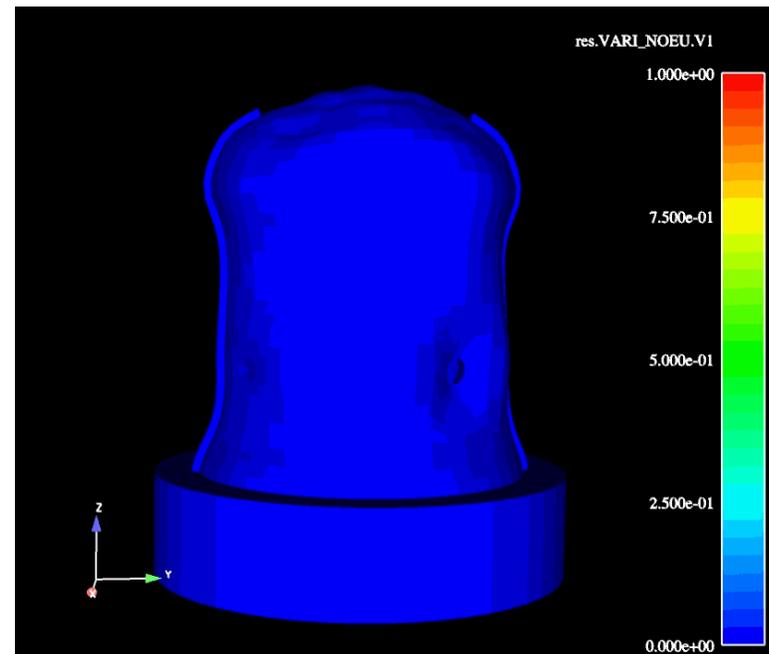
Simulation de la ruine sous surpression accidentelle d'une enceinte de confinement



Développer une capacité prédictive de simulation du comportement de structures massives en béton armé et précontraint (très fortes non linéarités, modélisation de l'endommagement jusqu'à rupture , ...) et la valider



Maquette Sandia (Los Alamos)

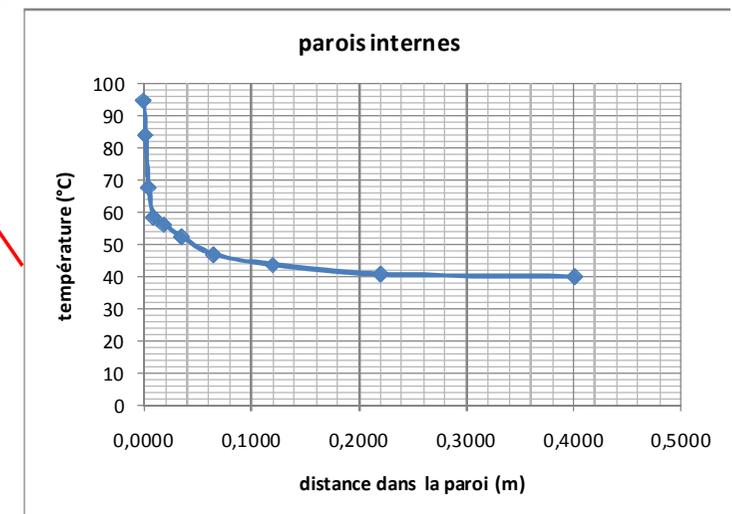
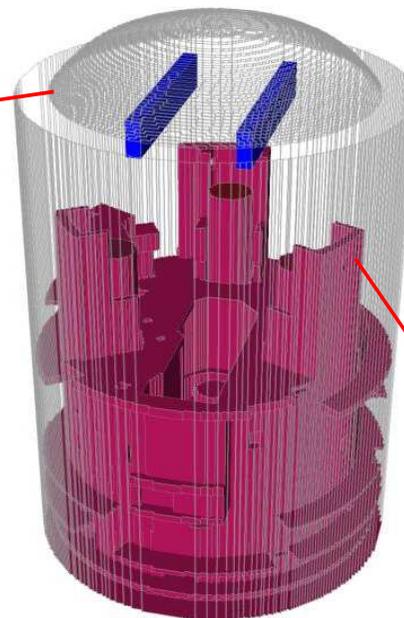
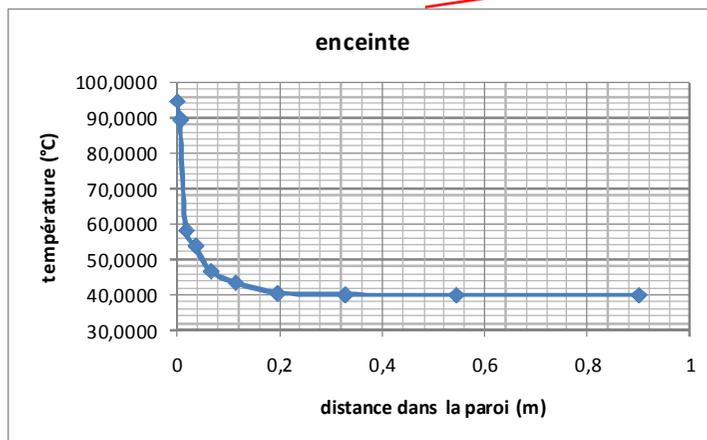
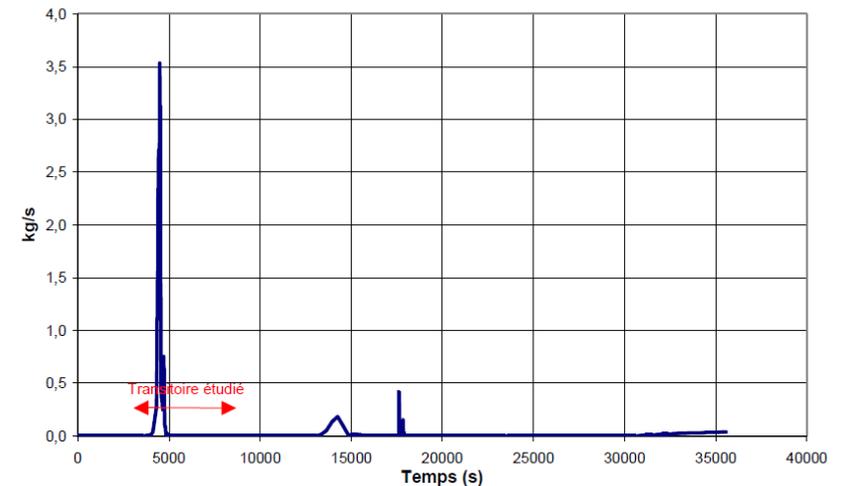


Simulation (Code_Aster EDF)

Distribution H2 dans un bâtiment réacteur en accident grave

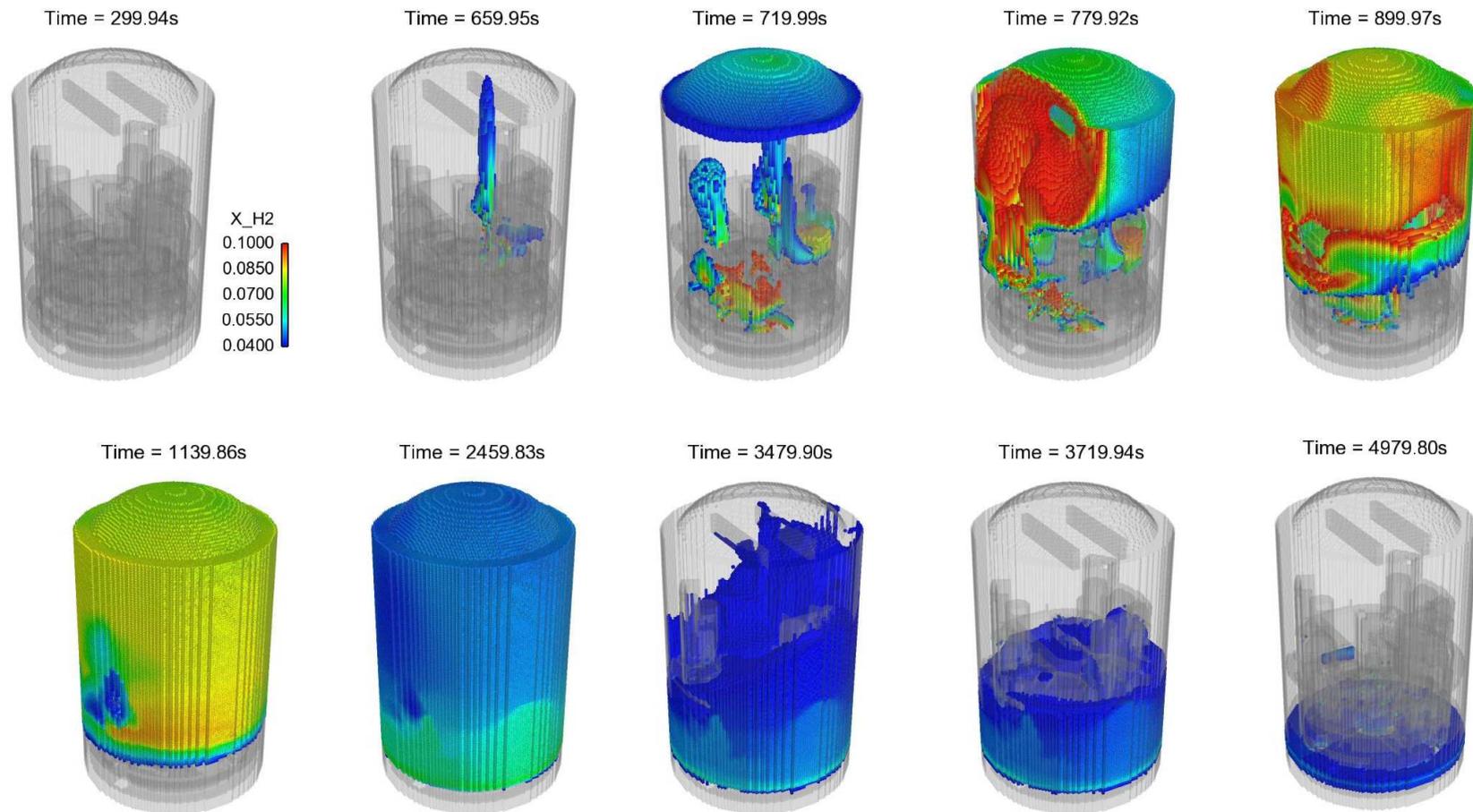
- **Phénomènes physiques à modéliser :**
 - Ségrégation et mélange des gaz
 - Augmentation de pression par ajout de matière
 - Echanges thermiques avec les murs et les matériels
 - Recombinaison de l'hydrogène par les RAP
- **Conditions limites – cas sans Asperion**
 - Termes sources pour le gaz injecté ($H_2 + H_2O$)
 - Profils de température en °C
- **Conditions initiales**
 - t_0 (*Code_Saturne*) = 6 500s Pression enceinte
 - Température moyenne
 - Fractions massiques

Débit d'H2 produit en coeur



Distribution H2 dans un bâtiment réacteur en accident grave

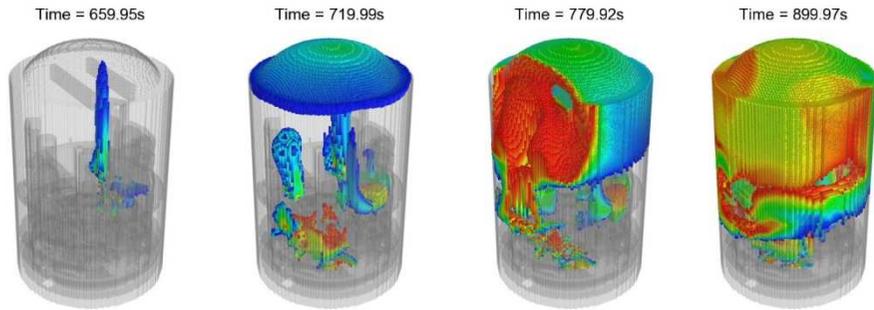
- Nuages de concentrations en Hydrogène – 4 à 10 % en fraction molaire d'H₂



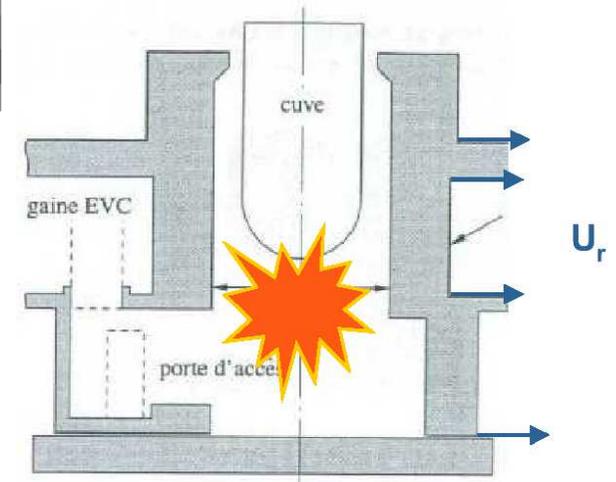
Permet d'optimiser (et de justifier) le placement de recombineurs d'hydrogènes et les procédures d'aspersion

Ainsi que de donner les conditions de chargement pour l'étude suivante

Etude d'explosion vapeur en puits de cuve

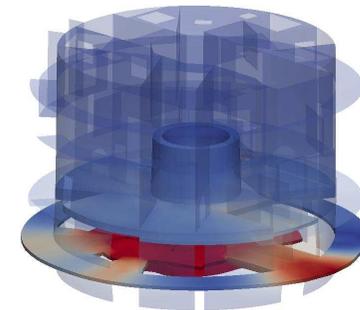


Nuages de concentrations en Hydrogène



Risque d'agression de l'enceinte par le déplacement des planchers

Déplacements de la structure 20 ms après explosion

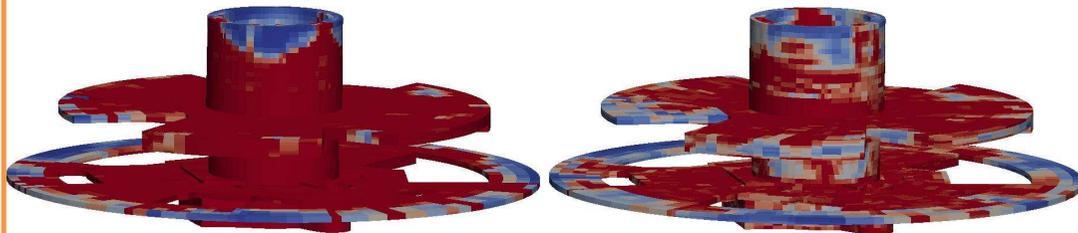


Risque de ruine de la structure

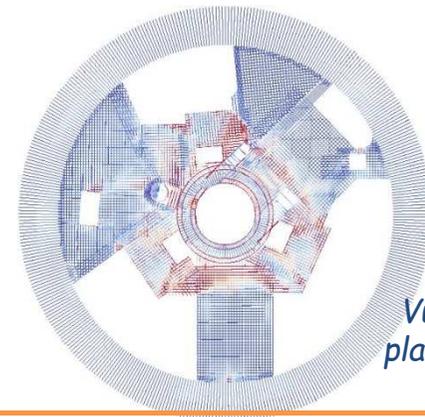
Déformation plastique finale des armatures

Sans effet de vitesse

Avec effet de vitesse : augmentation de la résistance

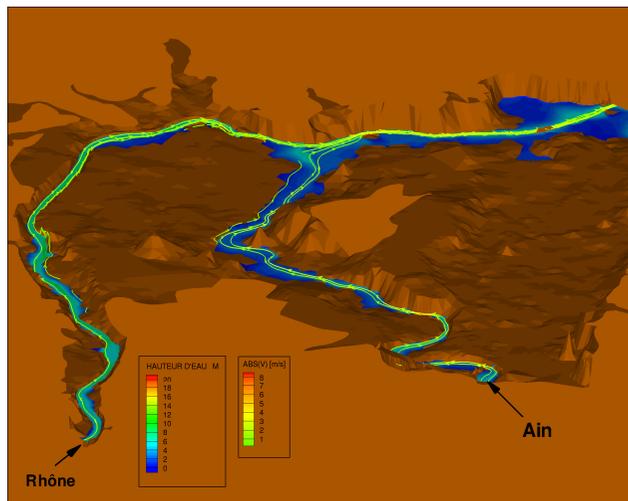
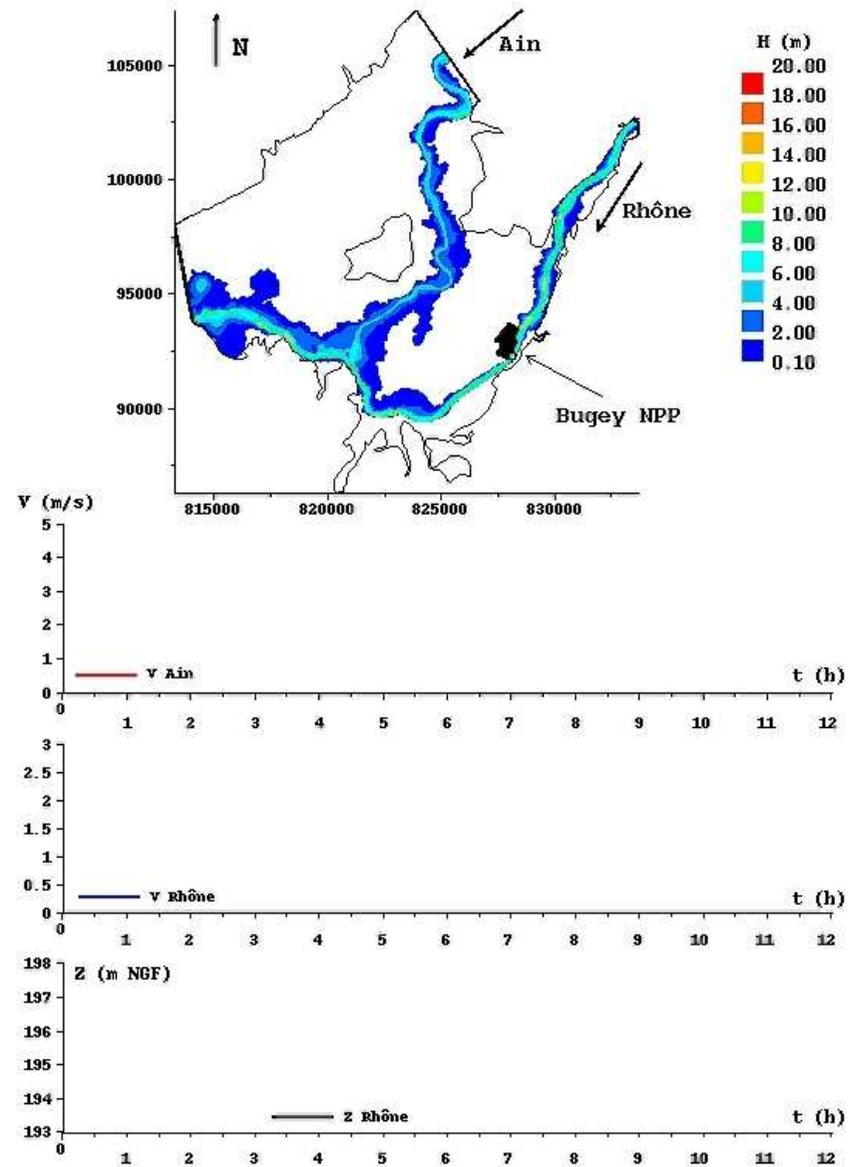


Endommagement du béton à $t = 15$ ms



Vue en coupe du plancher inférieur

Analyse d'une rupture de barrage sur la cote de rivière au niveau d'un site nucléaire



Aval du cycle nucléaire : Stockage des déchets HAVL

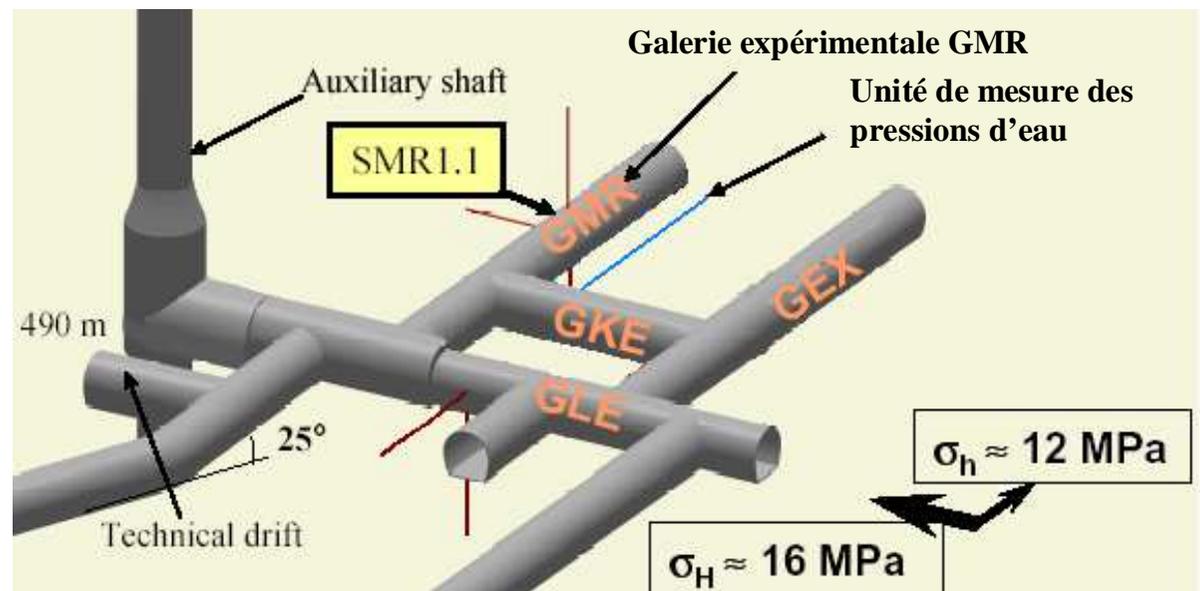
Site : Laboratoire ANDRA
de Bure Centre de Meuse / Haute-Marne

Objectif : Faisabilité d'un calcul couplé hydromécanique avec un modèle de comportement tenant compte des effets différés.



Etude sur la galerie GMR :

- ▶ Calcul d'excavation 2D puis 3D
- ▶ comparaison mesures - calculs



Aval du cycle nucléaire : Stockage des déchets HAVL

► Résultats de l'étude :

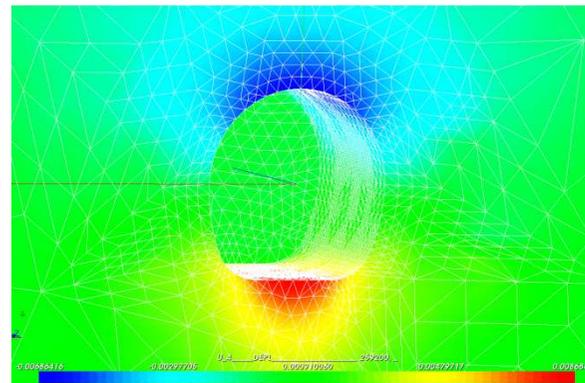
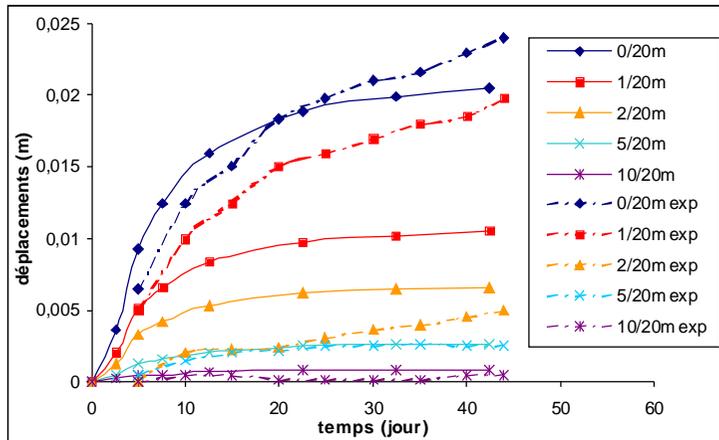
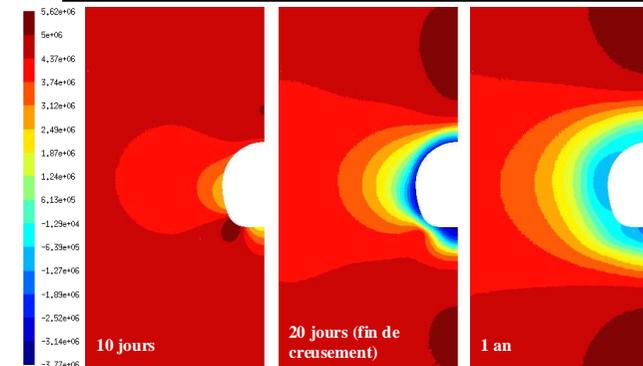
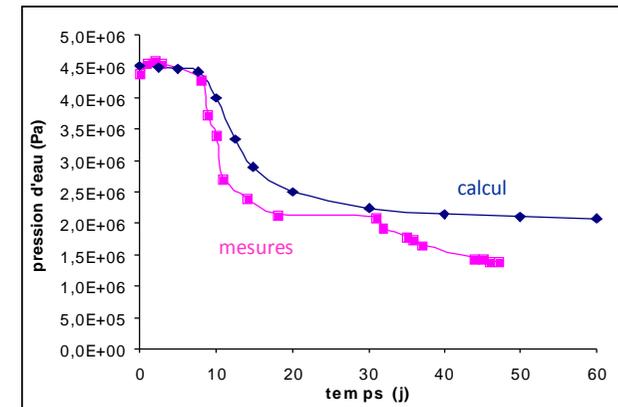
■ Faisabilité d'un calcul avec :

- Loi visqueuse fortement non linéaire (*L&K*)
- Couplage HM
- Régularisation par second gradient de dilatation
- Géométrie réelle difficile (en 3D)

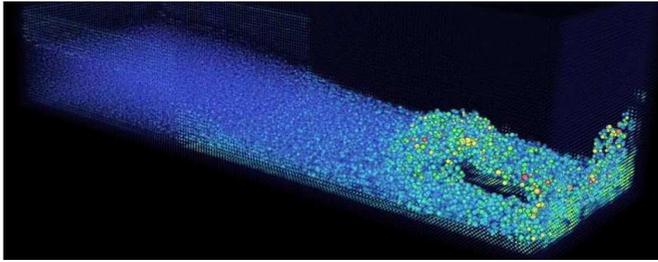
■ Calcul prédictif validé

► Perspectives :

- Prise en compte d'un soutènement béton
- Finaliser la méthodologie avec adaptation de maillage en 3D
- Améliorer l'aide au recalage des paramètres matériaux (*MACR_RECAL*)
- Faire évoluer *L&K* pour prendre en compte les aspects thermique (fluage)



Hydraulique : Simulation SPH



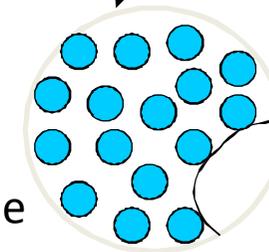
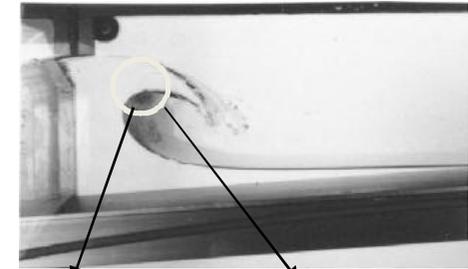
Les méthodes particulaires (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) sont en rupture avec les méthodes classiques de CFD qui nécessitent le maillage du domaine fluide



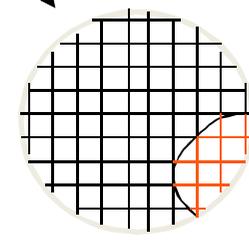
Elles permettent d'aborder des problèmes dans lesquels **la surface libre n'est pas connue à l'avance**.

Les applications visées :

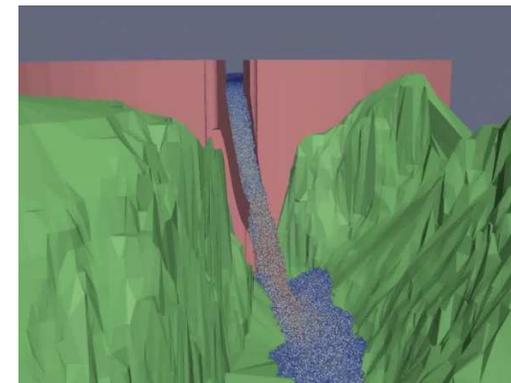
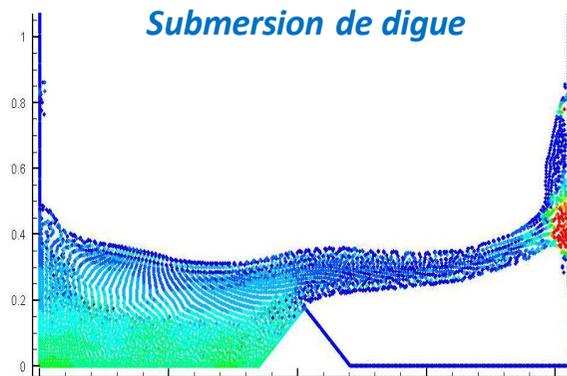
- Pour le parc hydraulique : passes à poissons, évacuateurs de crue, glissement de terrain en retenue
- Pour le parc nucléaire : oscillations des bâches sous séisme, déferlement de houle sur les digues, run-up de tsunami, passage sous les protections de nappes d'hydro-carbures



Méthode SPH
Discretisation **par**
particules de matière



Méthode usuelle
Discretisation des
équations de Navier
Stokes



Calculs
Spartacus 3D



Hydraulique : Calcul au séisme

ANR_SALADYN :
simulation des milieux
divisés

Plate-forme logicielle de couplage de codes pour la simulation de système multi-corps déformables ou indéformables soumis à des interactions non-régulières, (contact et frottement)

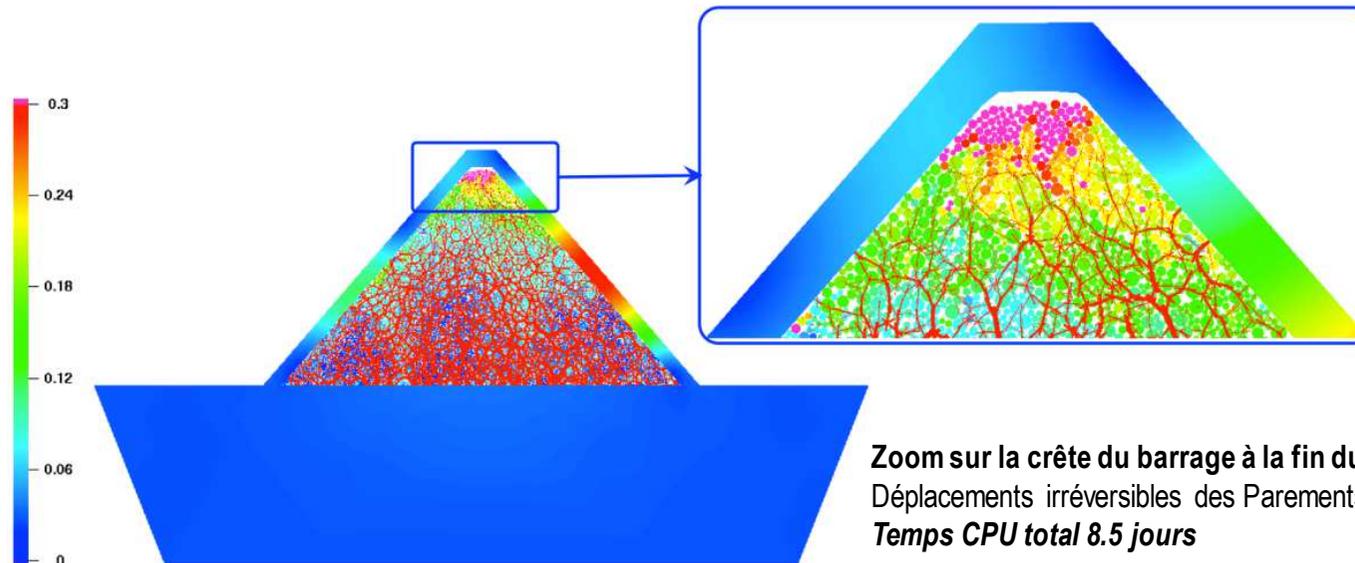
(INRIA/BIPOP ; SE ; LMGC ; EDF-LaMSID

Modélisation :

Construction des couches d'enrochements constituant le vrac (9 couches granulaires) + parements

Mise en eau de la retenue ;

Chargement sismique sur le barrage



Zoom sur la crête du barrage à la fin du séisme
Déplacements irréversibles des Parements et lignes de forces
Temps CPU total 8.5 jours

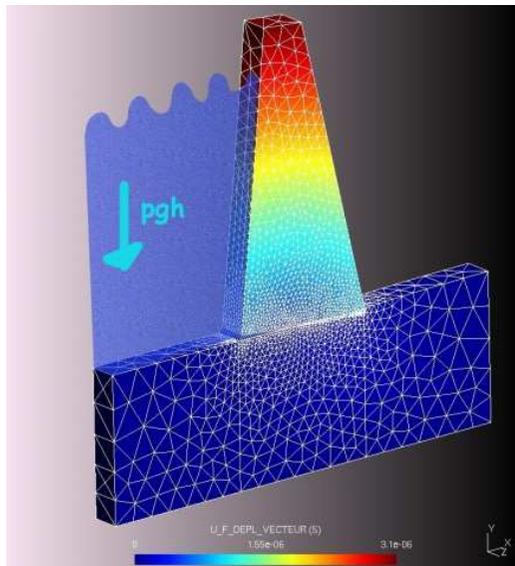
Hydraulique : Comportement des barrages voûtes

Objectif :

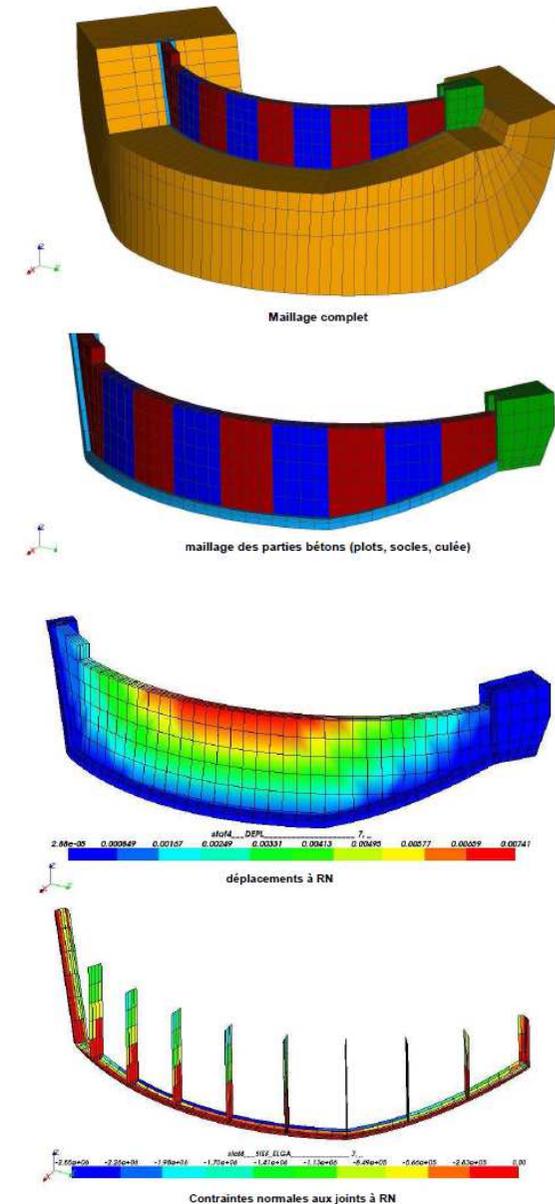
Barrages voûtes : structures béton assemblées

Nécessité de modéliser le comportement non linéaire des joints entre plots (clavage, rupture, sciage...) et entre le béton et le rocher

Savoir modéliser les circulation d'eau potentielle dans les joints (sous-pression => risque de rupture du barrage)



Ex : calculs sur barrage de Pontviel



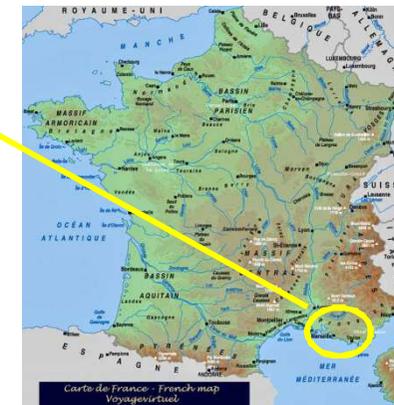
Analyse hydroécologique de l'étang de Berre

- ◆ Étang saumâtre peu profond
- ◆ Surface: 155 km²
- ◆ Volume: 980 10⁶ m³
- ◆ BV : 1700 km²
- ◆ Relié à la mer par le canal de Caronte

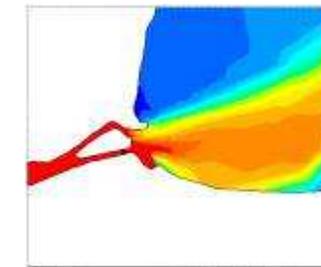
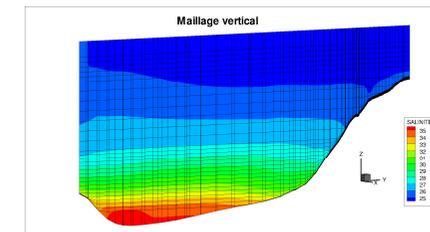
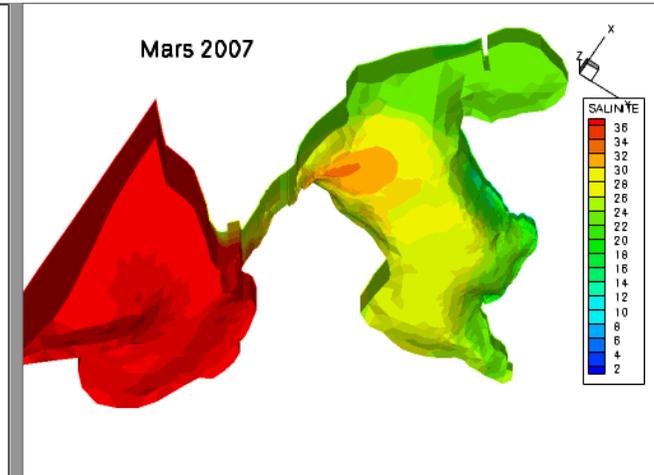
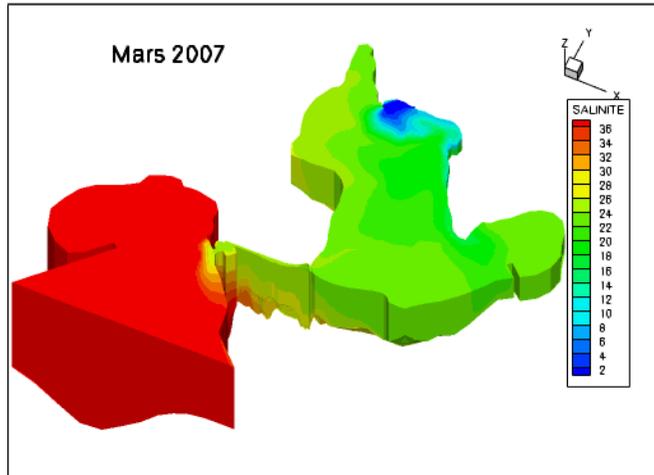


Un écosystème :

- ◆ fortement influencé par le vent et la marée
- ◆ soumis à de fortes pressions humaines

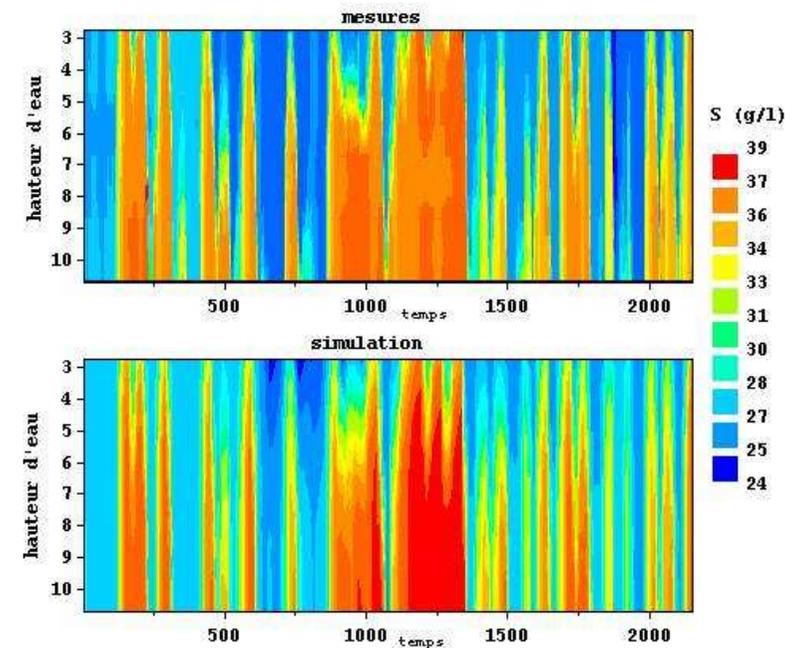
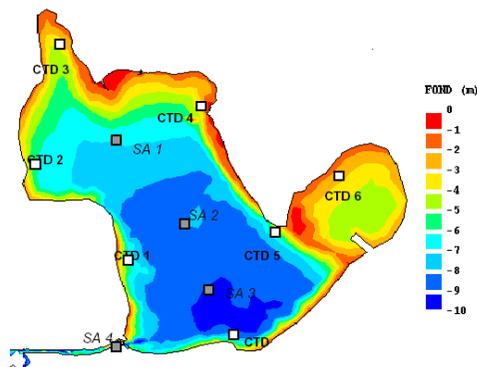


Evolution de la salinité dans l'étang

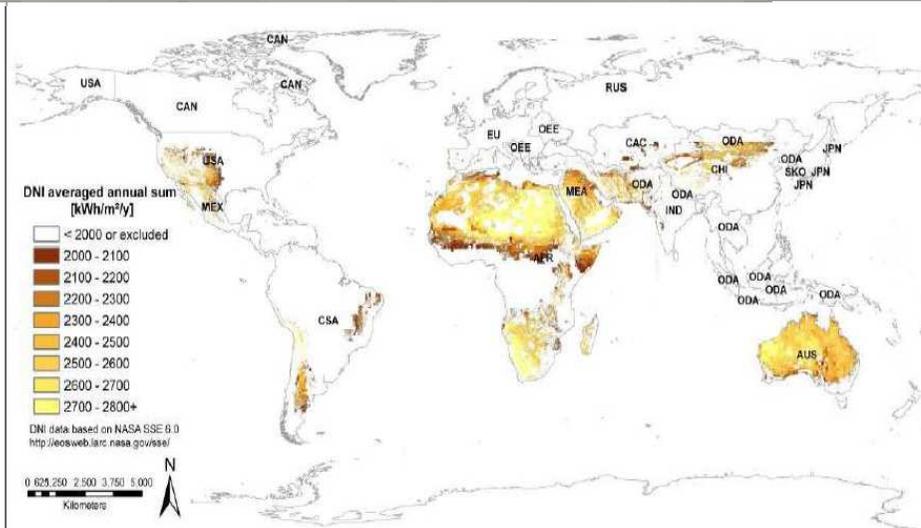


salinité dans le canal de Caronte
du 17 novembre au 2 décembre 2005
comparaion mesures et simulation

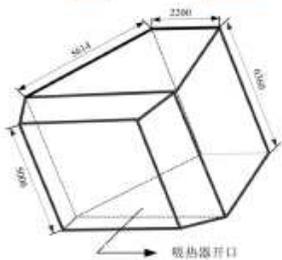
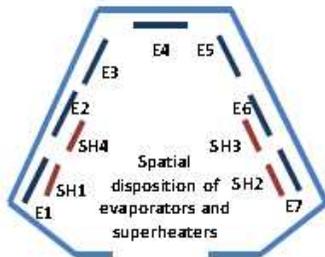
- Quantification des différents débits (entrants, sortants et total) et des échanges entre l'étang de Berre et la mer Méditerranée,
- Étude de l'influence des rejets de la centrale de Saint Chamas sur les débits du canal et la salinité de l'étang
- Proposition de scénarii de turbinage adaptés



Solaire à concentration



Intéressant sur la sun belt



- Tenue mécanique du concentrateur
- Thermodynamique et thermohydraulique des caloporteurs
- Modélisation du champ d'heliostats

