



Débat AFGC

Prise en compte des actions
accidentelles rapides

02/02/2016

Prise en compte de l'impact de
projectiles dans le dimensionnement
des ouvrages de génie civil

Mathieu GALAN (EDF/SEPTEN)



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Sommaire

- 1. Introduction sur l'agression externe de « chute d'avion »**
- 2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF**
- 3. Participation à des programme d'essais**
- 4. Justification d'une méthodologie d'étude « réaliste »**
- 5. Conclusion et perspectives**

1. Introduction sur l'agression externe de chute d'avion

► Prise en compte de différents types d'agressions de type « **projectiles** » dans le dimensionnement des ouvrages nucléaires du parc français

- Agressions internes aux ouvrages de l'îlot nucléaire
- Agressions externes aux ouvrages de l'îlot nucléaire
 - Projectiles générés par les vents extrêmes
 - Projectiles provenant des turbines
 - Projectiles générés par une agression externe liée à l'environnement industriel et aux voies de communication

- Aviation

1. Introduction sur l'agression externe de chute d'avion

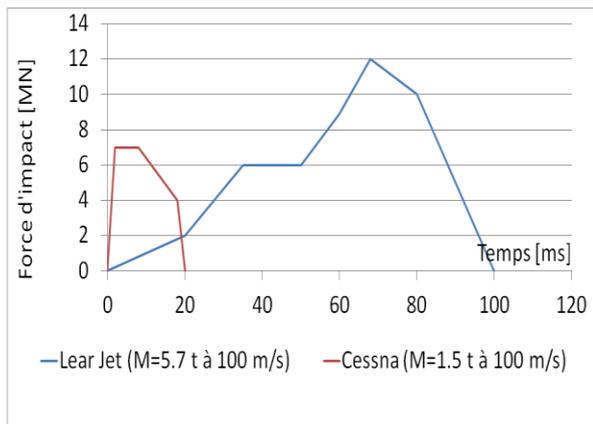
► Chute d'avion – ouvrages existants du parc EDF

- A la conception des REP actuellement en exploitation en France, trois familles d'avion ont été considérées, au titre de la chute accidentelle :

- Aviation commerciale
- Aviation militaire
- Aviation générale

} Risques écartés par des considérations probabilistes

→ Agression prise en compte dans le dimensionnement des ouvrages protégeant les principales fonctions de sûreté



CESSNA 210 (m = 1.5 t)

LEAR JET 23 (m = 5.7 t)

RCC-G

1. Introduction sur l'agression externe de chute d'avion

► Chute d'avion – évolution des chargements avec les réacteurs de GEN3 (ex. de l'EPR)

- Prise en compte de manière déterministe :

- de la chute d'un avion militaire

ETC-C

- de la chute d'un avion commercial

Complément de codification
d'accès « restreint »

- Scenarii dimensionnants pour la plupart des ouvrages de GC ayant un « requis avion » et pour certains équipements

- Evolution des méthodes de calculs

- Outils numériques
- Propriétés matériaux

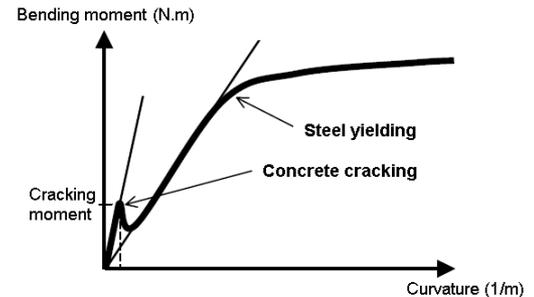
Sommaire

1. Introduction sur l'agression externe de « chute d'avion »
2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF
3. Programme d'essais d'impact
4. Justification d'une méthodologie d'étude « réaliste »
5. Conclusion et perspectives

2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF

► Loi de BA homogénéisé pour EF de coques dans EUROPLEXUS (outil industriel d'EDF)

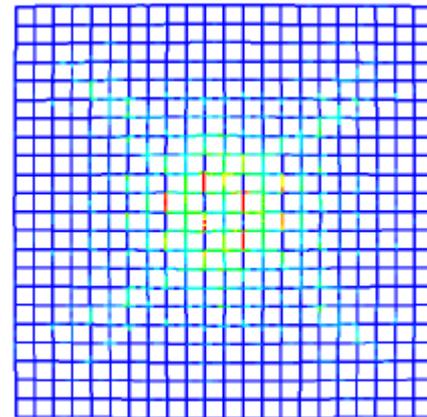
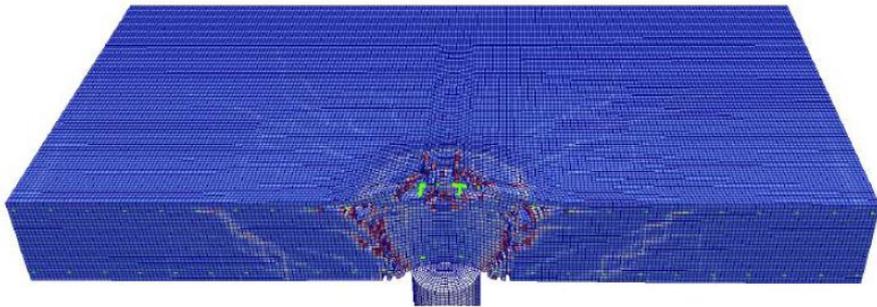
- Loi de comportement globale en efforts généralisés (efforts membranaires, efforts tranchants et moments de flexion)
- Tient compte de phénomènes dissipatifs représentatifs du comportement d'un mur en BA sous chargement dynamique de flexion :
 - endommagement du béton
 - plastification des aciers
- Modélisation du comportement de structures en flexion et en poinçonnement modéré, soumise à l'impact de projectiles déformables (découplage cible/projectile via approche de Riera => pression temporelle répartie sur une surface)
- Implantée dans le code de dynamique rapide EUROPLEXUS et utilisée pour les études industrielles de chute d'avion (EPR FA3, EPR UK, EPR NM)



2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF

► Loi d'endommagement du béton pour modèles 3D volumiques, dans EUROPLEXUS

- Modélisation d'un fort poinçonnement et de la perforation, sous l'impact de projectiles déformables et rigides
- Permet de représenter des phénomènes d'endommagement avancés (ruine du béton, rupture des aciers)



- En cours de validation grâce aux travaux conjoints CEA/EDF R&D

Sommaire

1. Introduction sur l'agression externe de « chute d'avion »
2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF
3. Programme d'essais d'impact
4. Justification d'une méthodologie d'étude « réaliste »
5. Conclusion et perspectives

3. Programmes d'essais d'impact

▶ Participation d'EDF à différents programmes internationaux

■ Objectifs

- O1 : Meilleure compréhension des phénomènes physiques
- O2 : Validation des outils numériques
- O3 : Justification d'une approche de calcul « réaliste »
- O4 : Confrontation des méthodes EDF avec la pratique internationale

■ Programme IMPACT-VTT (initié en 2004 ; phase 3 de 2012 à 2016), Espoo, Finlande

- Consortium restreint :
- ✓ Autorités de Sûreté : NRC, IRSN, CNSC, ONR, GRS, STUK, ENSI
- ✓ Electriciens : FORTUM, EDF, CANDU

■ Workshop OCDE_IRIS (initié en 2009)

- Ouvert aux organisations des pays membres de l'OCDE
- Phase 3 de 2015 à 2017

3. Programmes d'essais d'impact

▶ O1 : Meilleure compréhension des phénomènes physiques

- Focus sur les essais VTT – différents modes de ruine du GC

Flexion

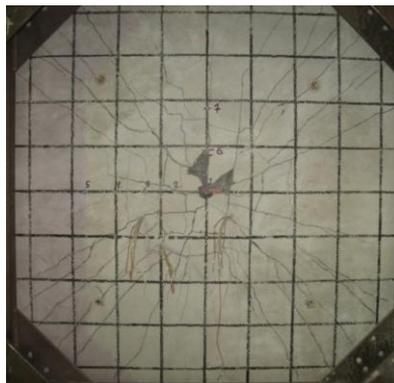
Flexion/Poinçonnement

Perforation

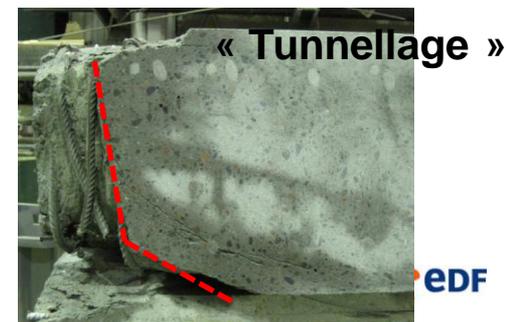
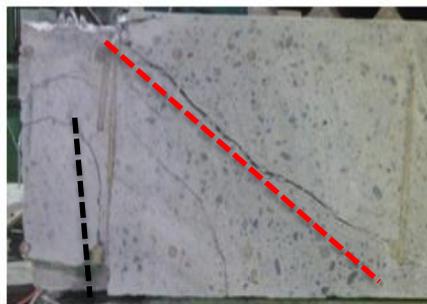
Projectile déformable



Projectile déformable



Projectile rigide



3. Programmes d'essais d'impact

► O2 : Validation des outils numériques d'EDF

- Loi de BA homogénéisé pour EF de coques dans EUROPLEXUS (outil industriel d'EDF)
 - Modélisation du comportement de structures en flexion et en poinçonnement modéré, soumise à l'impact de projectiles déformables
 - Applications possibles : chute d'avion, certains scénarii de chute de charge, projectiles tornades etc...



- Loi d'endommagement du béton pour modèles 3D volumiques, dans EUROPLEXUS
 - Modélisation d'un fort poinçonnement et de la perforation, sous l'impact de projectiles déformables et rigides
- + Formules empiriques de perforation (ex. EDF-CEA)



Sommaire

1. Introduction sur l'agression externe de « chute d'avion »
2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF
3. Participation à des programme d'essais
4. **Justification d'une méthodologie d'étude « réaliste »**
5. Conclusion et perspectives

4. Justification d'une méthodologie « réaliste »

▶ Projet EPR standard

▶ Projet EPR NM :

- Motivation industrielle
 - Simplification de la protection avion

- Démarche inspirée de l'approche « Best-Estimate » décrite dans le standard américain NEI-07-13



Principaux initiateurs de la démarche

4. Justification d'une méthodologie « réaliste »

▶ Conception des ouvrages neufs et vérification de l'existant

▶ Thèmes étudiés

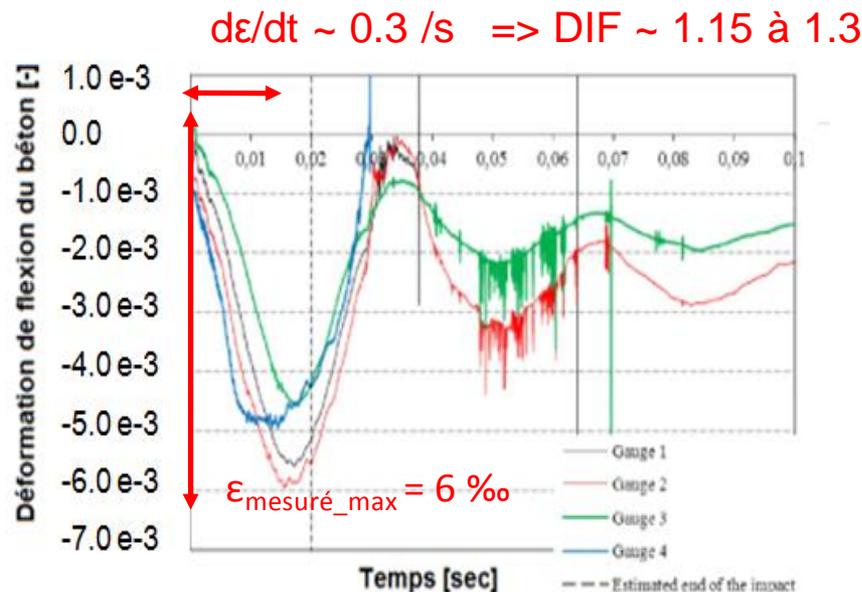
- Propriétés du béton et des aciers sous impact
- Perforation/écaillage sous l'impact de projectiles « rigides »
- Résistance locale du GC (flexion, poinçonnement etc...)
- Ebranlement (génie civil, équipements)

4. Justification d'une méthodologie « réaliste »

► Propriétés de calcul des matériaux et critères associés (1/2)

► Ex. 1 – Propriétés du béton comprimé

- Déformation ultime: Justification de $\epsilon_{cu} \leq -5.0 \text{ ‰}$
- Résistance en compression: Justification d'une augmentation de résistance liée à la vitesse de déformation du matériau $f_{ck,dyn} = DIF * f_{ck}$



[CEB-90]

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_{c0}} \right)^{1.026\alpha} \quad \text{si } \dot{\epsilon}_c \leq 30/s$$

Mesures de déformations du béton

4. Justification d'une méthodologie « réaliste »

► Propriétés de calcul des matériaux et critères associés (2/2)

► Ex. 2 – Poinçonnement sous impact et calcul d'épingles

- Adaptation de la formule [ETC-C 2012 Annexe 1.C] [RCC-CW 2015] pour le poinçonnement sous l'impact de projectiles

- Validation par rapport aux essais

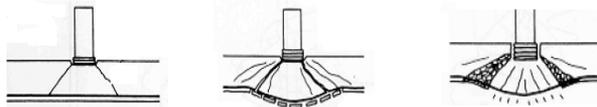
- IMPACT-VTT (h 15/25cm ; m 50kg)

- Meppen (h 70cm ; m 1000kg)

Analyse à différentes échelles

VTT \approx 1:10 à 1:5

Meppen \approx 1:2 à 1:1

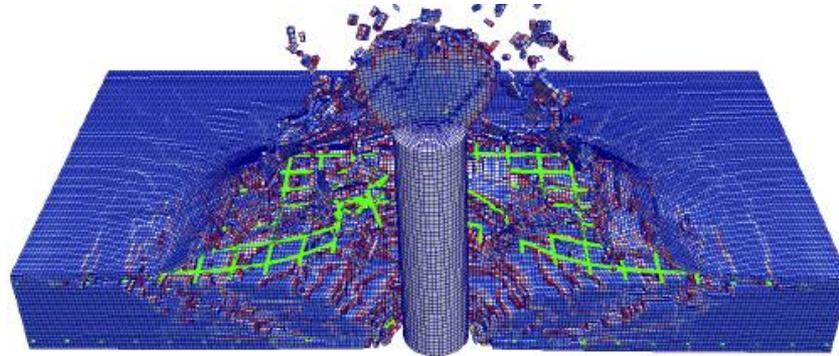


Analyse à différents niveaux d'endommagement

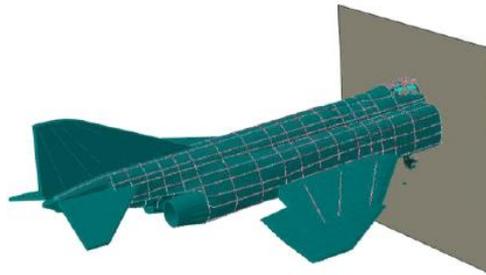
4. Justification d'une méthodologie « réaliste »

► Evolution des outils numériques

- Comportement des structures jusqu'à la ruine



- Modélisation en éléments finis des projectiles



Sommaire

1. Introduction sur l'agression externe de « chute d'avion »
2. Outils numériques à la disposition de l'ingénierie d'EDF
3. Participation à des programme d'essais
4. Justification d'une démarche générale « réaliste »
5. Conclusion et perspectives

5. Conclusion et perspectives

- ▶ Méthodologie industrielle EDF de chute d'avion
 - Résistance mécanique du GC sous impact
 - Ebranlement des structures et des matériels
 - Démarche s'appuyant sur les connaissances expérimentales

- ▶ Evolution des méthodologies grâce à des travaux de R&D
 - Outils numériques
 - Investigation expérimentale pour une meilleure compréhension des phénomènes physiques

- ▶ Améliorer les connaissances sur l'aspect « vibrations induites »
 - IMPACT-VTT
 - Programme OCDE IRIS phase 3 :
 - EDF pilote l'organisation du programme

Merci pour votre attention

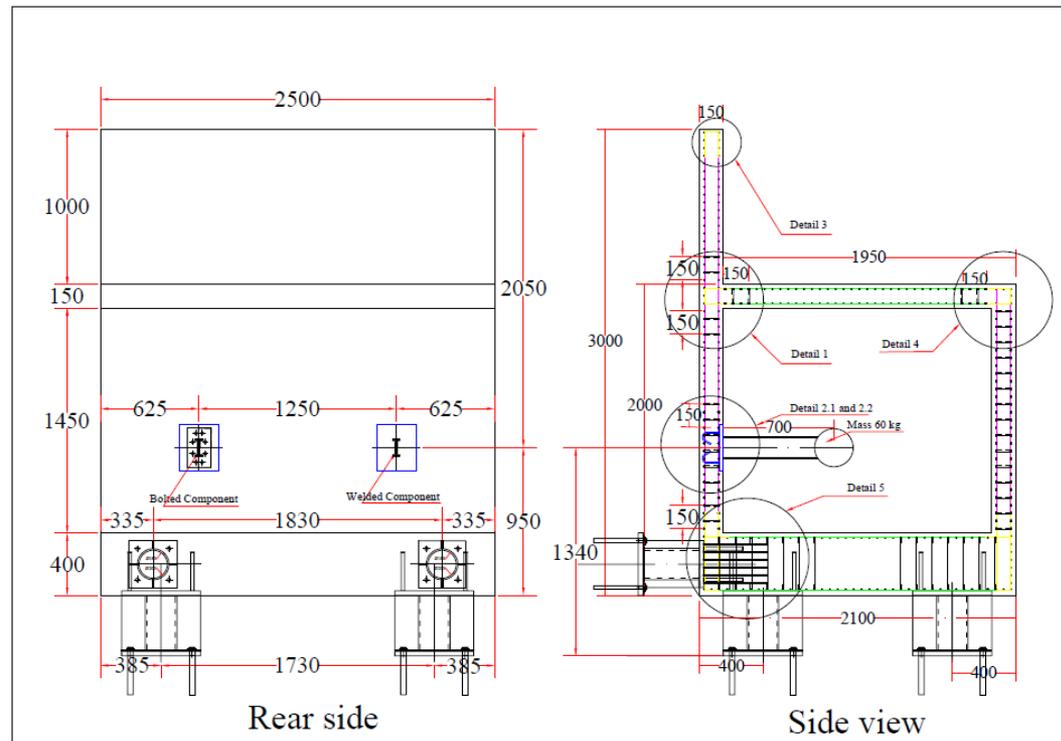
Annexes

Annexes

OCDE_IRIS phase 3

- Objectif : simuler la propagation des vibrations induites par un impact sur une structure en béton armé et recalibrer les modèles
EDF pilote le design des essais et l'organisation du workshop

- Maquette IRIS3



- Projectile

- Déformable en acier / Masse 50 kg
- 110 m/s (x 2) ; 160 m/s



Annexes

OCDE_IRIS phase 3

■ Planning indicatif

Activity	Description of the activity	Deadline
Beginning of Round-Robin "phase A"	Data for "phase A" numerical workshop are sent to the participants / VTT-IMPACT V1 + IRIS Phase 3 drawings and data	28/02/2016
Main issues from A1 to be sent to by the participants	The participants provide their first feedback based on the VTT-IMPACT V1 calculations (phase A1) and the set of data for the IRIS Phase 3 test to prepare phase A2	June 2016
<i>Teleconference</i>	<i>Organizing committee and all the participants in order to discuss on the first step calculations difficulties(A1)</i>	<i>July 2016</i>
Results "phase A" to be sent by the participants	Calibration calculations on a VTT test + Blind calculations on the IRIS 3 mockup	30/09/2016
Realization of impact tests	3 impact tests to be performed on the IRIS mockup	october 2016
	<i>Workshop phase A</i>	<i>15/12/2016</i>
Beginning of Round-Robin "phase B"	Data for "phase B" numerical workshop are sent to the participants (Test measurements gathered during the test)	end of december 2016
Results "phase B" to be sent by the participants	Calibration calculations on the IRIS 3 tests	30/06/2017
	<i>Workshop phase B</i>	<i>15/12/2017</i>
Report issuance	Issuance of the final version of the report including the conclusions of the workshop	30/06/2018
	A1- Calibration calculations on the VTT-IMPACT V1 test	
	A2- Blind calculations on the IRIS 3 mockup	